

Astronomie, Astrophysique

Observer et comprendre l'Univers

Université inter-âges
Paris-Sorbonne

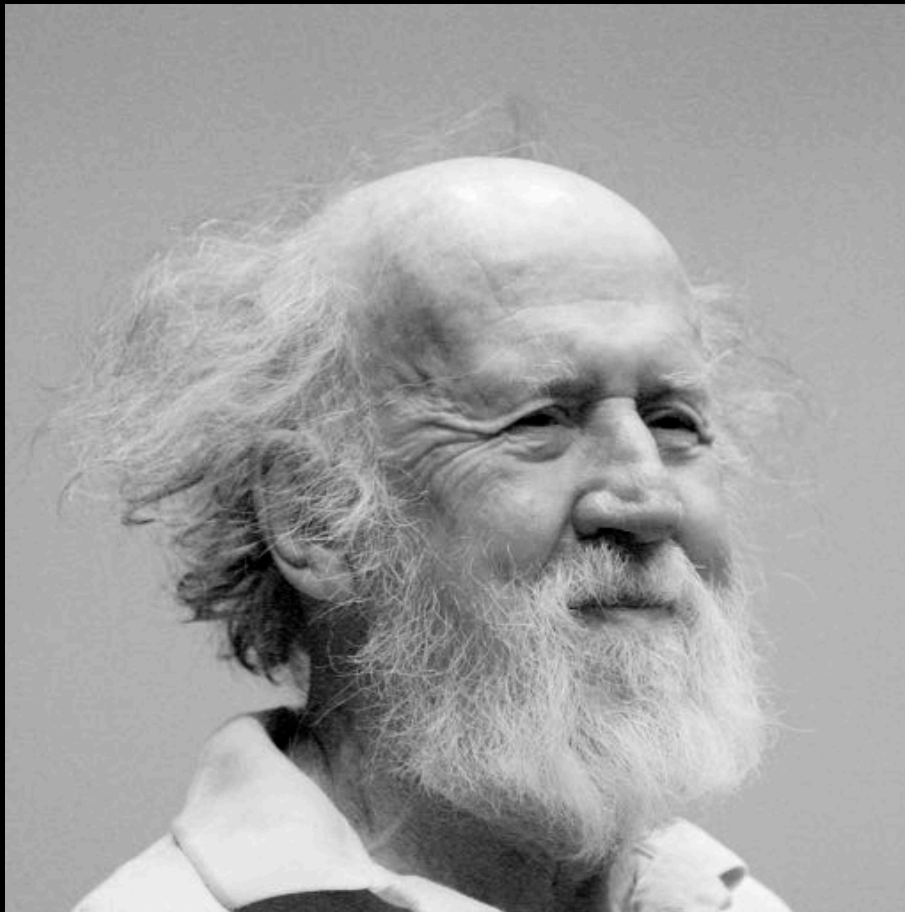
Frédéric Daigne & Patrick Boissé
Institut d'Astrophysique de Paris
Université Pierre et Marie Curie



Lundi 17 octobre 2011

**1.Introduction :
qu'est-ce que l'astrophysique ?**

Quelques astrophysiciens...



Hubert Reeves

Le professeur Calys



Quelques astrophysiciens...



Edwin P. Hubble



Quelques astrophysiciens...



Sir Arthur Eddington

Subrahmanyan Chandrasekhar



et astrophysiciennes...



Catherine Cezarsky

Jocelyn Bell



A deep field image of the universe, showing a vast field of galaxies in various colors and shapes against a dark background. The galaxies are scattered across the frame, with some appearing as bright, distinct points of light and others as more diffuse, elongated structures. The colors range from bright yellow and orange to deep red and purple, indicating different stages of stellar evolution or different types of galaxies. The overall appearance is a dense, multi-colored field of celestial objects.

Qu'est-ce que l'astrophysique ?

Universalité de la physique

Un exemple: les lois de Newton

$$m a = F = G \frac{M m}{d^2}$$

Avec l'information contenue dans cette formule, on peut comprendre une infinité de phénomènes :

- chute d'une pomme sur Terre
 - mouvement de la Lune autour de la Terre
 - les marées
 - mouvement des planètes du système solaire
 - mouvement des étoiles dans la Galaxie
- etc.

L'astrophysique se fonde sur l'hypothèse que les lois de la physique, déterminées sur Terre à notre époque, s'appliquent à tout l'Univers à toutes les époques... et ça marche !

Physique, astronomie, astrophysique

La physique se fonde sur l'expérience,
mais l'expérience est rare en astrophysique.



Le laboratoire de Rutherford
à Cambridge
dans les années 20



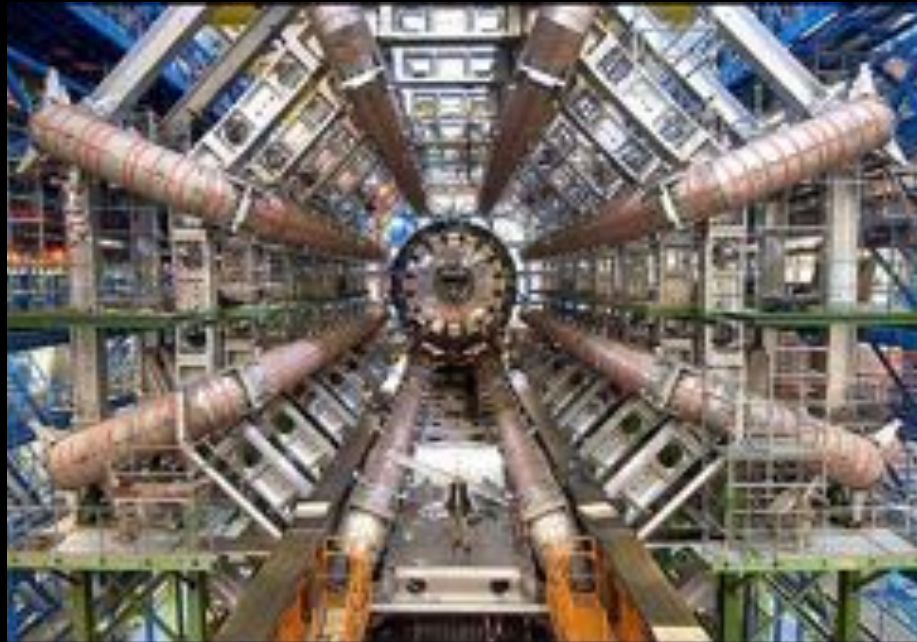
Hubble au télescope de 2,5 mètres
du Mont Wilson
dans les années 20



Le CERN à Genève



Le site astronomique du Mauna Kea



L'expérience ATLAS



Le télescope Canada-France-Hawaï

L'expérience est rare en
astrophysique...



L'observation remplace l'expérience

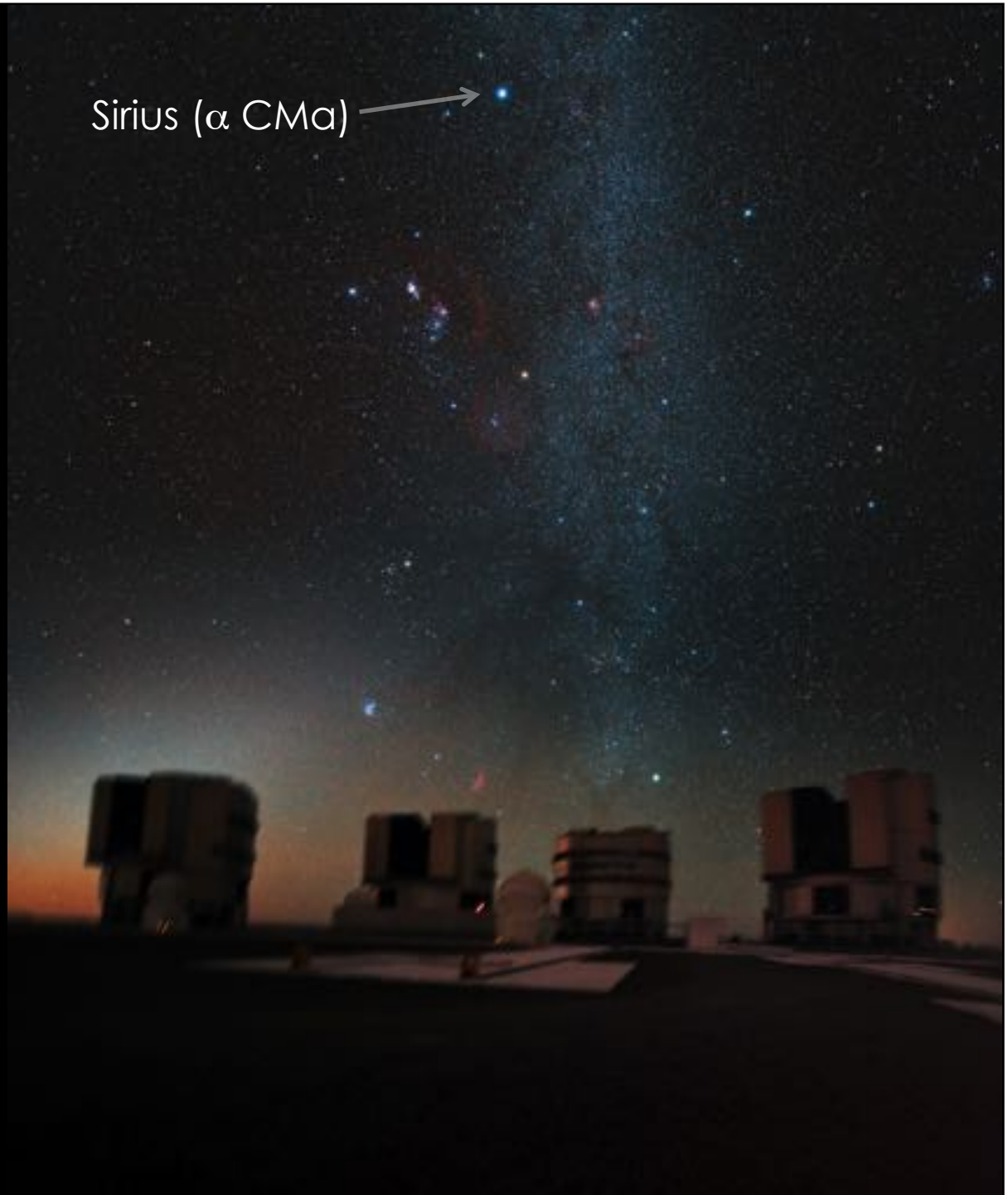
Des expériences irréalisables ?



Heureusement, il y a 100 milliards d'étoiles à observer dans notre Galaxie...

Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel terrestre (après le Soleil) est une étoile qui ressemble au Soleil mais est deux fois plus massive.

Sa température de surface est d'environ 10 000 degrés, contre 6 000 pour le Soleil. Elle apparaît effectivement plus bleue.



La recherche en astrophysique

Observation



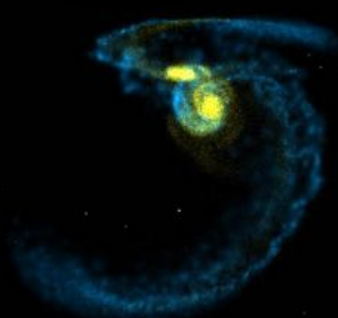
Instrumentation



Modélisation physique

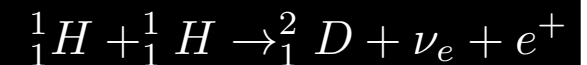
```

spectre.f90
DO i=1, N
  TABdnu(SAL(j)) = TABdnu(SAL(j)) + 0.5d0 * TABdnu(i) * (TABdnu(i-1, j) * TABdnu(i, j))
END DO
TABdnu(SAL(j)) = -(COEFSA * Tau / SQRT(GC * Tex)) * TABdnu(SAL(j)) / (TABnu(j) ** 2.0d0) * TABnu(j)
END DO
END IF
END IF
! Inverse Compton scatterings
PIC = 0.40
PICL = 0.40
IF (InverseCompton) THEN
  ! Electrons
  TABpIC = 0.40
  DO i=0, N
    DO j=1, M
      DO j2=1, M-1
        TABpIC(i, j) = TABpIC(i, j) + 0.5d0 * (TABnu(j2+1) - TABnu(j2)) *
          (TABnu(j2) * Kerm1IC(TABp(i), TABnu(j2)) - TABnu(j2) / TABnu(j2))
          + TABnu(j2+1) * Kerm1IC(TABp(i), TABnu(j2+1), TABnu(j2) / TABnu(j2+1))
        END DO
      END DO
      TABdgedtIC(i, j) = (4.00/3.00) * TauT * TABpIC(i, j) * TABnu(j) / (TABp(i) ** 2.00)
    END DO
    TABdgedtIC = 0.40
    DO j=1, M-1
      TABdgedtIC(i) = TABdgedtIC(i) + 0.5d0 * (TABnu(j+1) - TABnu(j)) * (TABpIC(i, j) * TABpIC(i, j+1))
    END DO
  END DO
  TABdnu(SAL(j)) = 0.40
  DO j=1, M
  
```



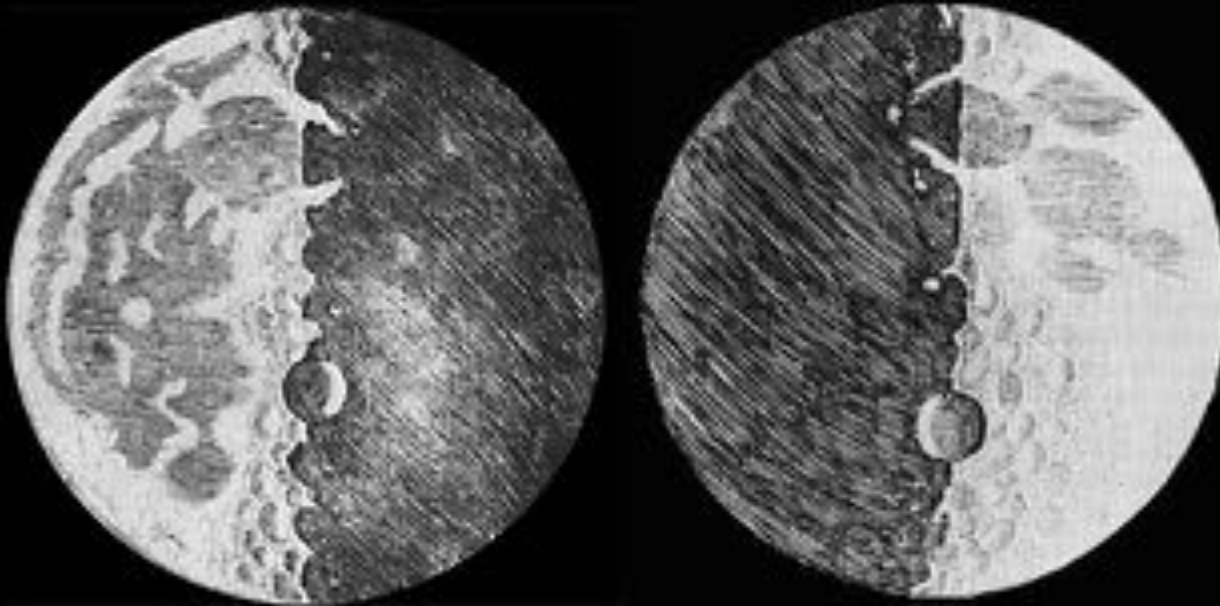
$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_\nu I_\nu + j_\nu$$

$$\ddot{I} = 2E_c + E_{grav}$$



Naissance de l'astrophysique

Galilée: naissance de la physique moderne, fondée sur l'expérience, et de l'astrophysique, fondée sur l'observation et l'utilisation de la physique comme cadre d'interprétation.



Galilée (1564-1642)



La lunette de Galilée (1609)

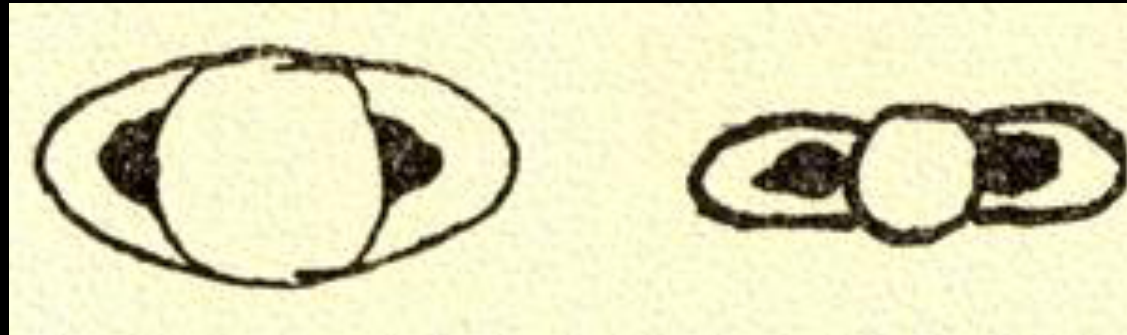
Le relief de la Lune
Les taches solaires
Les satellites de Jupiter
Les phases de Vénus

Le principe d'inertie
La loi de la chute des corps

Le rôle de l'instrumentation

Depuis Galilée, les progrès de l'astrophysique sont étroitement liés à ceux de l'instrumentation.

Un exemple: les anneaux de Saturne



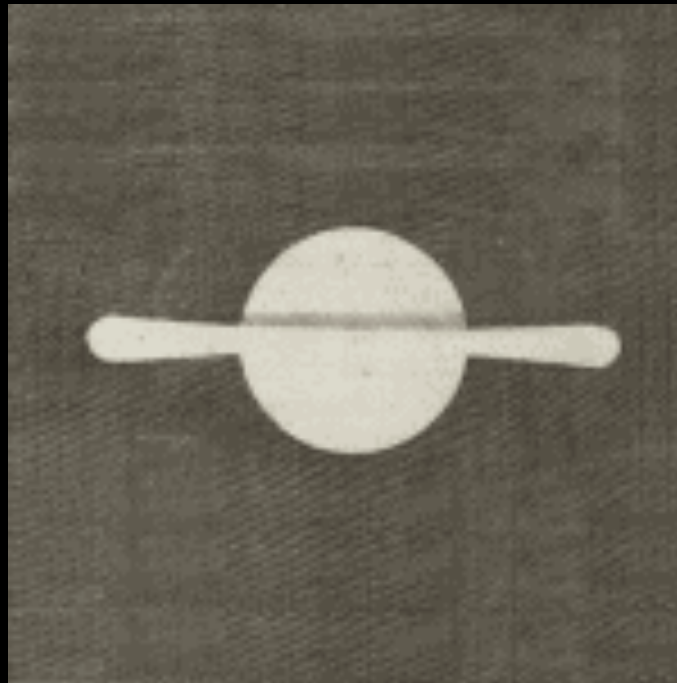
Dessin de Galilée
en 1616 (observation avec une
lunette grossissant 30 fois)

Saturne a des « oreilles »

Le rôle de l'instrumentation

Depuis Galilée, les progrès de l'astrophysique sont étroitement liés à ceux de l'instrumentation.

Un exemple: les anneaux de Saturne



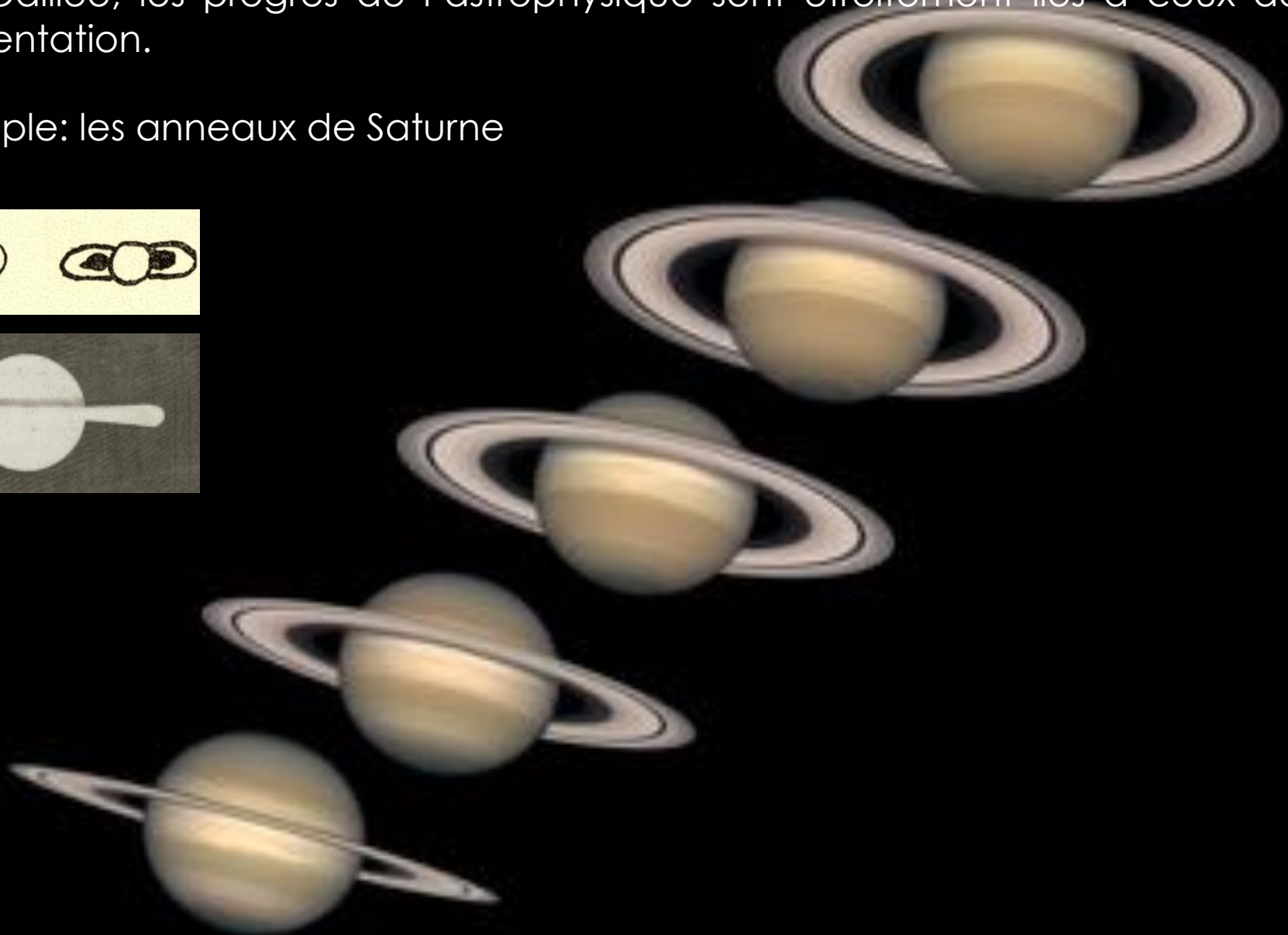
Dessin de Huygens
en 1655 (observation avec une
lunette grossissant 50 fois)

Découverte des anneaux de Saturne

Le rôle de l'instrumentation

Depuis Galilée, les progrès de l'astrophysique sont étroitement liés à ceux de l'instrumentation.

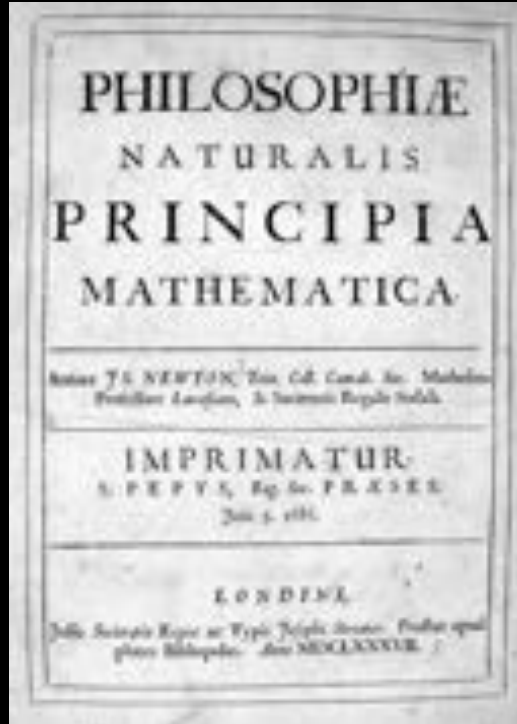
Un exemple: les anneaux de Saturne



Images HST (1996-2000)

Naissance de l'astrophysique

Newton: le fondateur de la physique classique, avec son « axiomatique » (*Les Principia*) et ses lois mathématiques.



Newton (1643-1727)

Lois de mouvement (mécanique classique)
Loi de la gravitation universelle

Optique : théorie de la couleur
Le télescope

Calcul infinitésimal

Naissance de l'astrophysique

Newton: le fondateur de la physique classique, avec son « axiomatique » (Les Principia) et ses lois mathématiques.

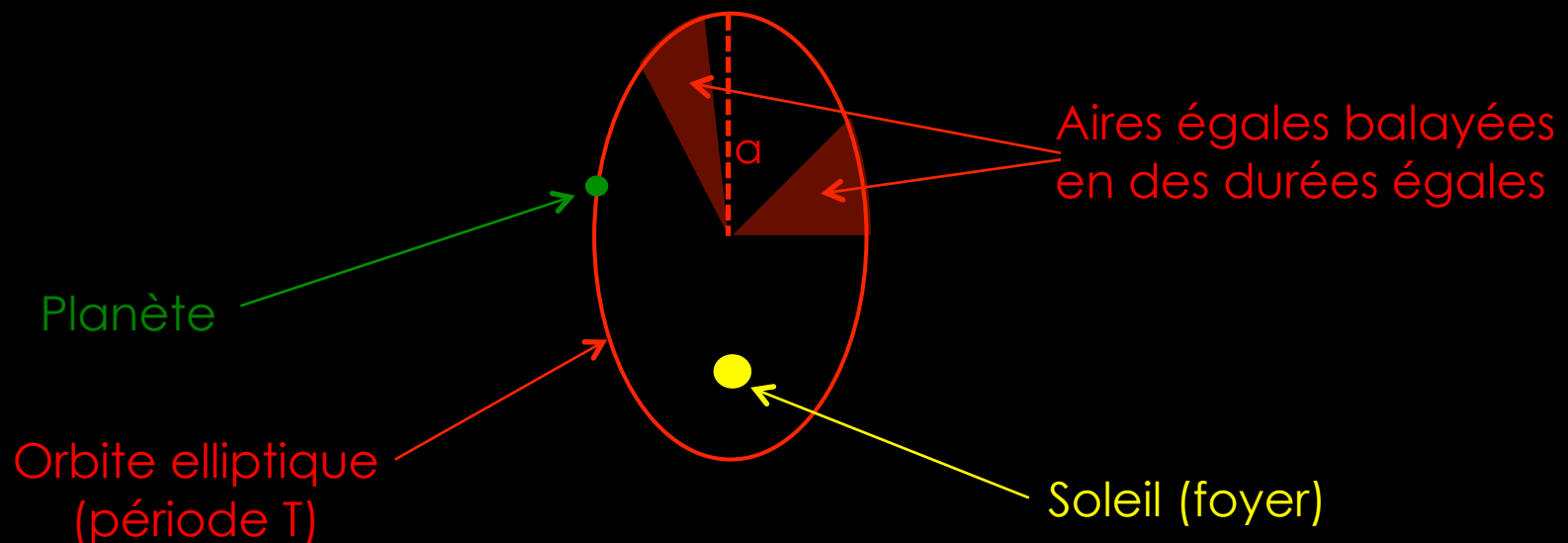
Quelques exemples de la puissance de la mécanique de Newton :

- les lois de Kepler (1609, 1618) sont démontrées par Newton en 1684-1687 à partir de lois plus simples et plus fondamentales.

1^{ère} loi : les orbites des planètes sont des ellipses dont le soleil est un foyer;

2^{ème} loi : les planètes balayent des aires égales en des durées égales;

3^{ème} loi : la période T et le demi grand-axe a de l'orbite sont reliés par $T^2/a^3 = c^{st}$.

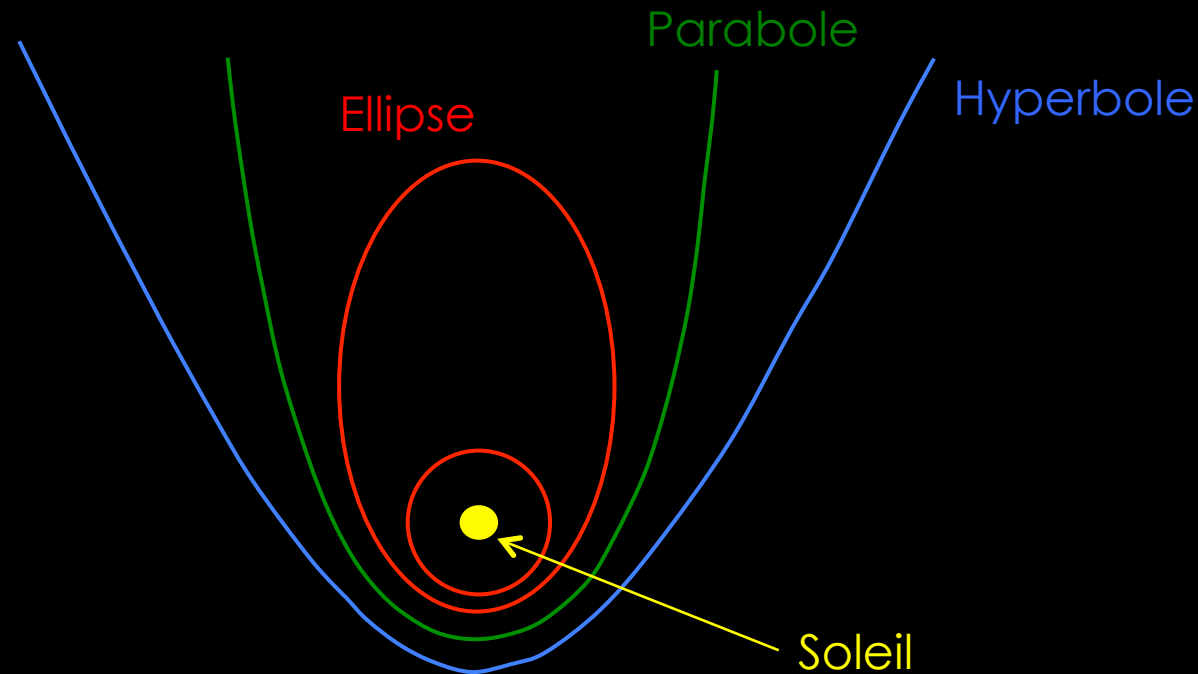


Naissance de l'astrophysique

Newton: le fondateur de la physique classique, avec son « axiomatique » (Les Principia) et ses lois mathématiques.

Quelques exemples de la puissance de la mécanique de Newton :

- les lois de Kepler (1609, 1618) sont démontrées par Newton en 1684-1687 à partir de lois plus simples et plus fondamentales.
- l'existence d'autres solutions que le mouvement elliptique est trouvée (paraboles, hyperboles) : ceci explique les comètes périodiques et les autres.



Le rôle de la théorie physique

La physique tient sa légitimité de son pouvoir prédictif.

1758, le triomphe posthume de Halley (période de 76 ans de « sa » comète).

La comète de Halley le 8 mars 1986 (W. Liller)



*Il avait dit : — Tel jour cet astre reviendra. —
Quelle huée !*

[...]

*Et le pauvre homme errait triste sous les huées.
Il mourut.*

L'ombre est vaste et l'on n'en parla plus.

[...]

Trente ans passèrent.

*On vivait. Que faisait la foule ? Est-ce qu'on sait ?
Et depuis bien longtemps personne ne pensait
Au pauvre vieux rêveur enseveli sous l'herbe.
Soudain, un soir, on vit la nuit noire et superbe,
[...]*

Et l'astre effrayant dit aux hommes : « Me voici ! »

Victor Hugo, La légende des Siècles, La comète

Le rôle de la théorie physique

La physique tient sa légitimité de son pouvoir prédictif.

1846, la découverte de la planète Neptune, dont l'existence a été prédite par les calculs de Le Verrier (1845).



Le Verrier (1811-1877)

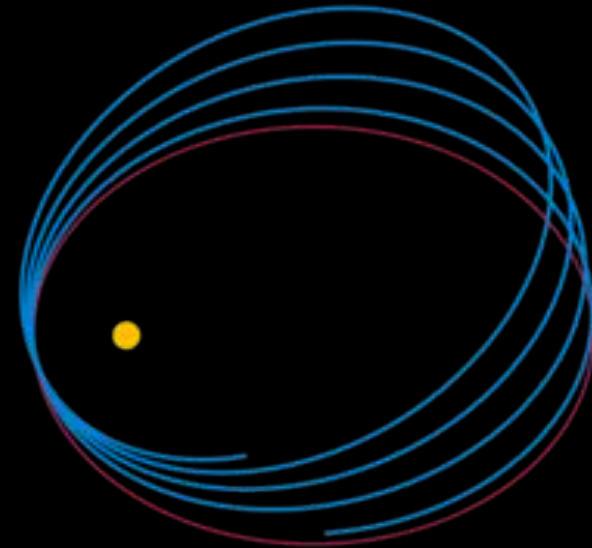


Neptune observée par la sonde Voyager 2 en 1989

Le rôle de la théorie physique

L'astrophysique permet de tester les lois de la physique.

- Le Verrier : avance du périhélie de Mercure
43'' de trop par siècle
(0,013 degré)
- Explication de cette avance: la relativité générale d'Einstein (1916)



La relativité générale a un domaine d'application plus large que la mécanique de Newton, qui apparaît comme une version simplifiée, valable aux faibles vitesses et dans les champs gravitationnels faibles. Elle reste donc tout à fait valable dans de très nombreuses situations.

- L'astronomie fournit un test des prédictions de cette nouvelle théorie, avec l'observation d'une éclipse de Soleil en 1919 par Eddington (il voit une étoile « derrière » le Soleil).

Le rêve de tout physicien...

Lettre d'Albert Einstein à sa mère indiquant qu'une «expédition anglaise» a vérifié la déviation de la lumière par le Soleil, prédite par la relativité générale (1916).



(29 mai 1919 à São Tomé-et-Principe par Eddington, lors d'une éclipse solaire)

Etoile



Soleil



Obs.

24. IX. 19

Liebe Mutter!

Heute eine freudige Nachricht. H. A. Lorentz hat mir telegraphiert, dass die englischen Expeditionen die Lichtablenkung in der Sonne wirklich bewiesen haben. Maja schreibt mir leider, dass Du nicht nur viel Schmerzen hast, sondern dass Du Dir auch noch trübe Gedanken machst. Wie gern würde ich Dir wieder Gesellschaft leisten, dass Du nicht dem hässlichen Gefühlsnibelassen wärest! Aber ein Weilchen werde ich doch hier bleiben müssen und arbeiten. Auch nach Holland werde ich für einige Tage fahren, um mich ehrenf. dankbar zu erweisen, obwohl der Zeitverlust recht schmerzhaft ist.

Un exemple : mesurer les longueurs

Mesurer les tailles et les longueurs dans l'Univers paraît une chose impossible car nous ne voyons le ciel qu'en projection : on ne peut mesurer que des distances et des tailles *apparentes* (c'est à dire des angles).

Pour les objets proches, notre cerveau reconstruit la distance en utilisant la parallaxe entre nos deux yeux. Pour les objets célestes, cette parallaxe oculaire est trop faible.

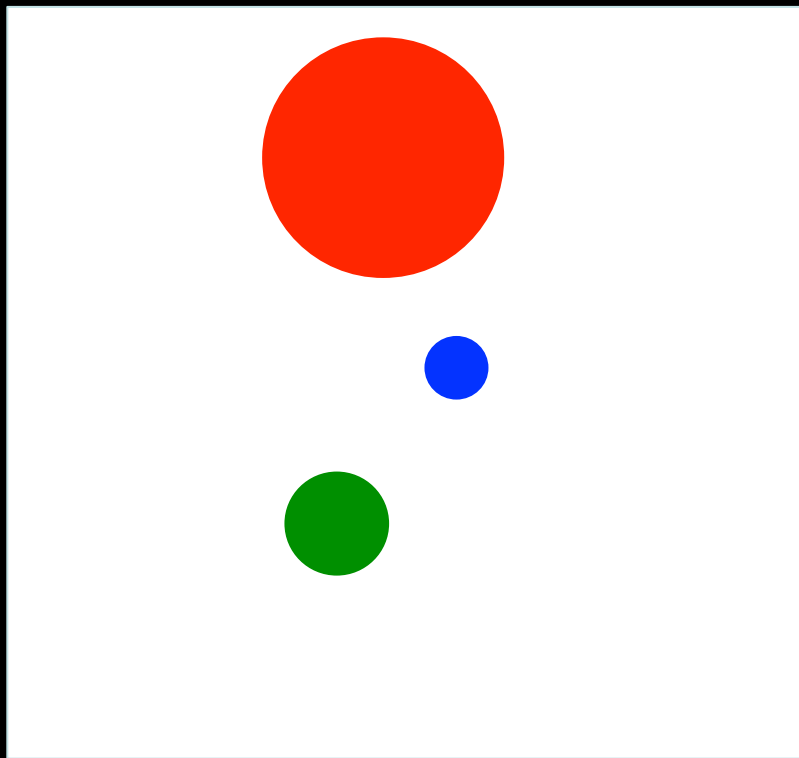
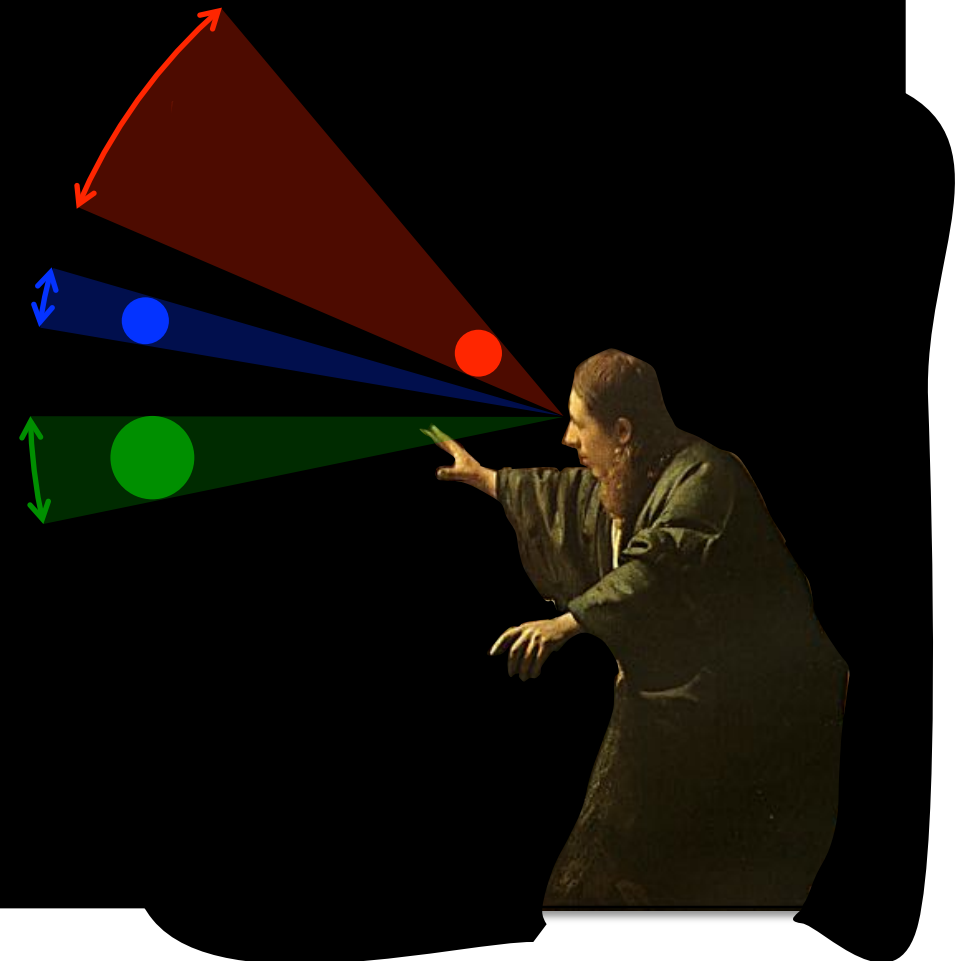


Image projetée



Antiquité : deux mesures précises

A l'aide de la géométrie élémentaire (triangle rectangle, cercle), deux mesures précises ont pu être effectuées dans l'Antiquité : le rayon de la Terre (à 2 % près) et la distance de la Lune (à 15 %).

- Rayon de la Terre : Eratosthène, Alexandrie (Egypte), III^{ème} siècle av JC

$$R_{\text{Terre}} \approx 6300 \text{ km}$$

La méthode est purement géométrique et utilise la mesure de l'ombre d'un obélisque à Alexandrie au moment où le Soleil est au zénith à Syène. Il faut connaître comme référence la distance Alexandrie-Syène.

- Distance de la Lune : Aristarque de Samos (Grèce) , III^{ème} siècle av JC
Hipparque, II^{ème} siècle av JC (pour les mesures)

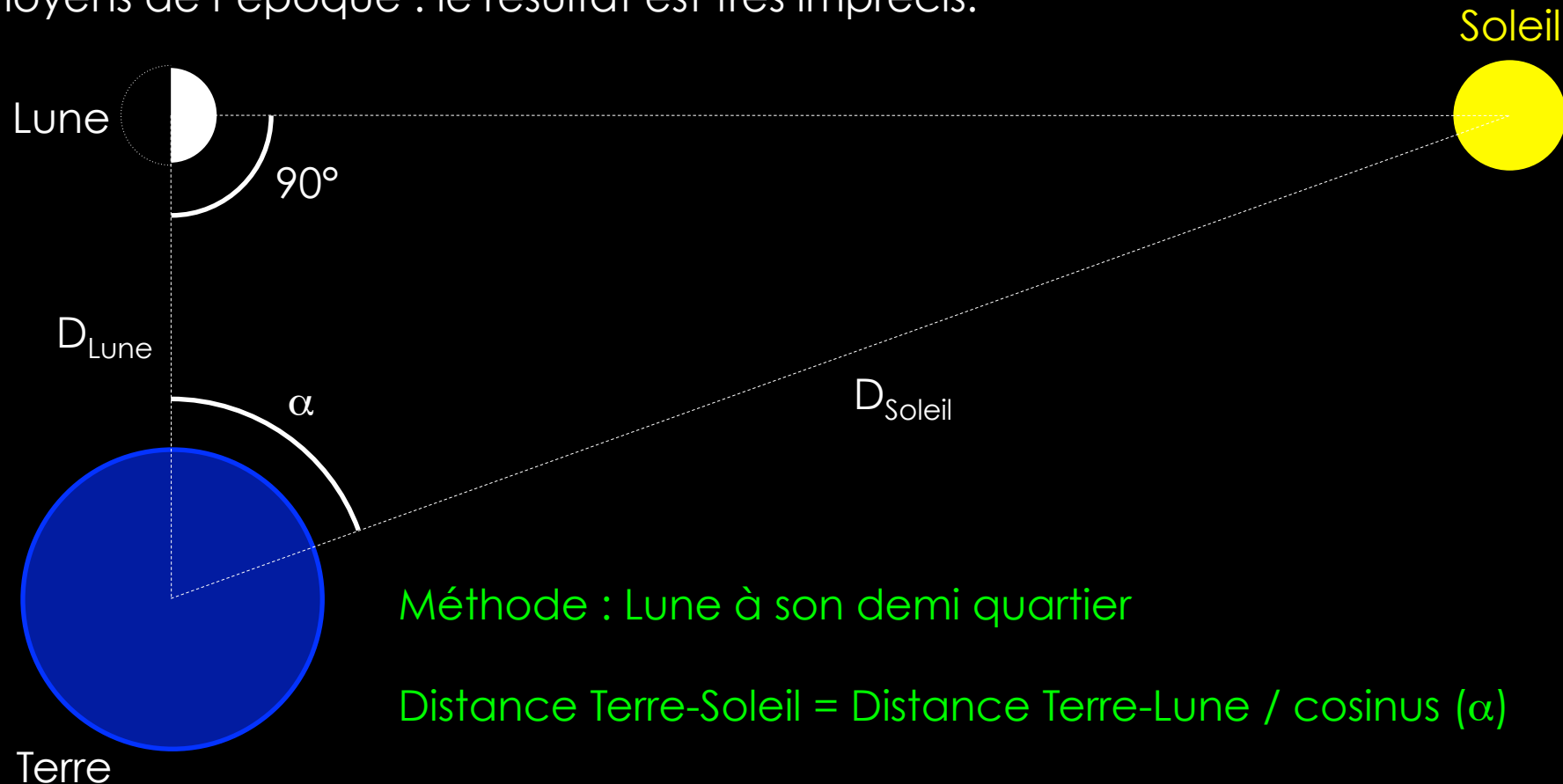
$$D_{\text{Lune}} \approx 70 R_{\text{Terre}} \text{ (plutôt 60 en réalité)}$$

On peut en déduire la taille de la Lune grâce à sa taille apparente : $R_{\text{Lune}} \approx R_{\text{Terre}} / 3$ (plutôt 3.7 en réalité)

La méthode est purement géométrique et utilise le chronométrage d'une éclipse de Lune. Il faut connaître comme référence la durée du mois lunaire et la taille de la Terre.

Antiquité : un échec

Avec les mêmes méthodes géométriques, Aristarque & Hipparque essaient de mesurer la distance Terre-Soleil. Mais il y a un angle impossible à mesurer avec les moyens de l'époque : le résultat est très imprécis.



Méthode : Lune à son demi quartier

Distance Terre-Soleil = Distance Terre-Lune / cosinus (α)

Problème : α très proche de 90° (89.85°) soit $D_{Soleil}/D_{Lune} = 382$

Aristarque mesure $D_{Soleil}/D_{Lune} \approx 19$

Hipparque mesure $D_{Soleil}/D_{Lune} \approx 60-80$

Mesurer les distances : comment progresser ?

Entre l'Antiquité et l'époque moderne :

- Des progrès instrumentaux : mesures précises des angles et des durées
- Des progrès théoriques : la 3^{ème} loi de Kepler (1618)

$$\text{Période}^2 / \text{Distance}^3 = c^{\text{ste}}$$

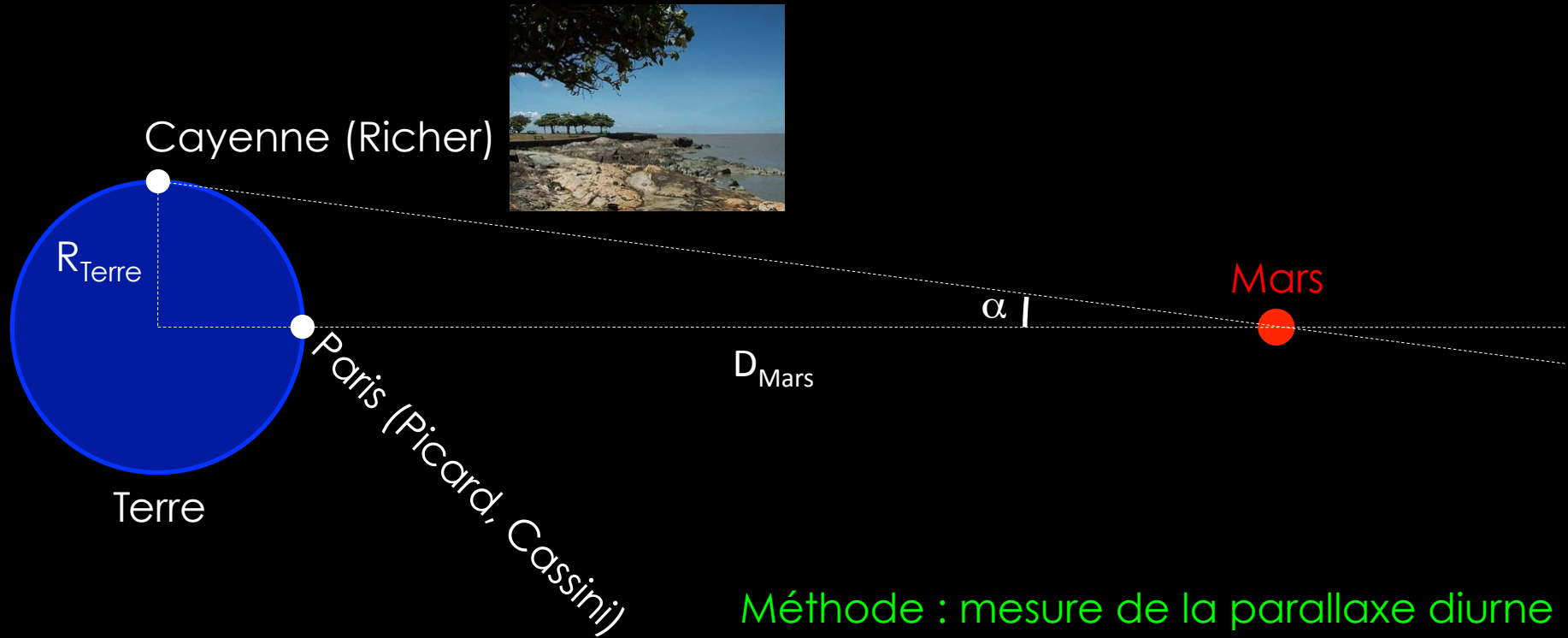
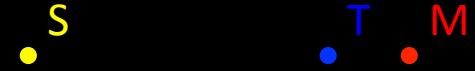
Planète	Distance au Soleil (en U.A.)	Période autour du Soleil (en années)	Période ² / Distance ³ (mêmes unités)
Terre	1	1	1/1=1
Mars	1,52	1,88	3,5/3,5 = 1
Jupiter	5,20	11,86	141/141 = 1
Neptune	30,07	164,89	27200/27200 = 1

Les périodes sont facile à mesurer et sont toutes connues.
Si on connaît la distance au Soleil d'une planète (la Terre), on connaît la distance de toutes les autres planètes.

XVII^{ème} siècle : distance Terre - Soleil

Picard, Cassini & Richer (Paris), 1672

Etape 1 : mesure de la distance de Mars en opposition



Méthode : mesure de la parallaxe diurne

Distance Terre-Mars = Rayon Terre / $\tan(\alpha)$

Mesure : $\alpha = 24''$

Distance : $D_{\text{Mars}} = 5.5 \times 10^7 \text{ km}$

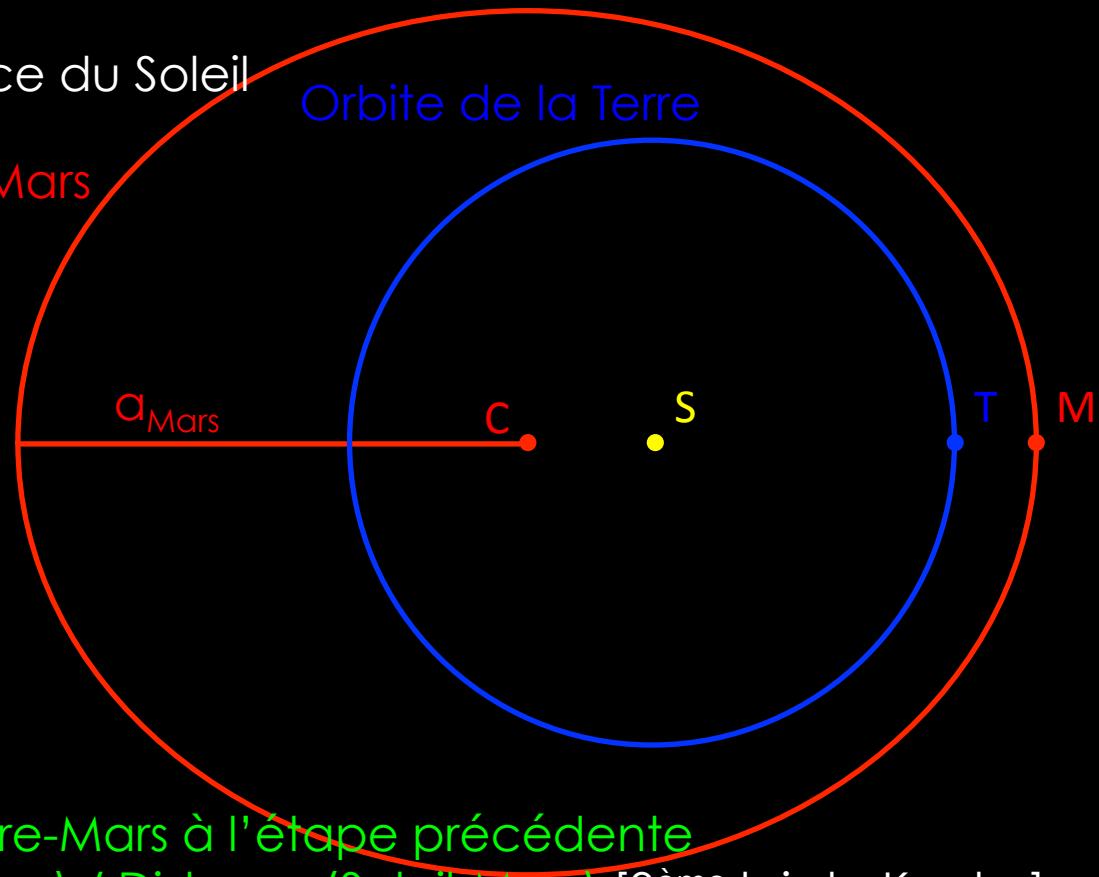
Distance Terre - Soleil

Picard, Cassini & Richer (Paris), 1672

Etape 2 : mesure de la distance du Soleil

Orbite de Mars

Orbite de la Terre



Méthode : on combine

- La mesure de la distance Terre-Mars à l'étape précédente
- Le rapport Distance(Soleil-Terre) / Distance(Soleil-Mars) [3^{ème} loi de Kepler]
- Les propriétés des ellipses dont le Soleil est un foyer [1^{ère} loi de Kepler]

Résultats : la distance Terre-Soleil

Picard, Cassini & Richer calculent $a_{\text{Terre}} \approx 142\,000\,000$ km

(Valeur moderne : 149 597 886 km)

L'observatoire de Paris

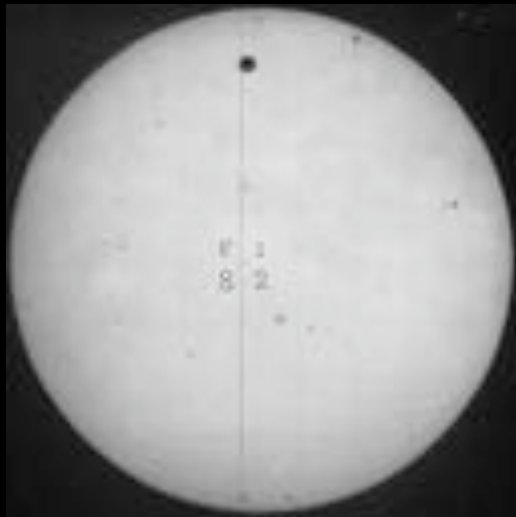
Louis XIV, Colbert (1666) : académie des sciences & observatoire de Paris



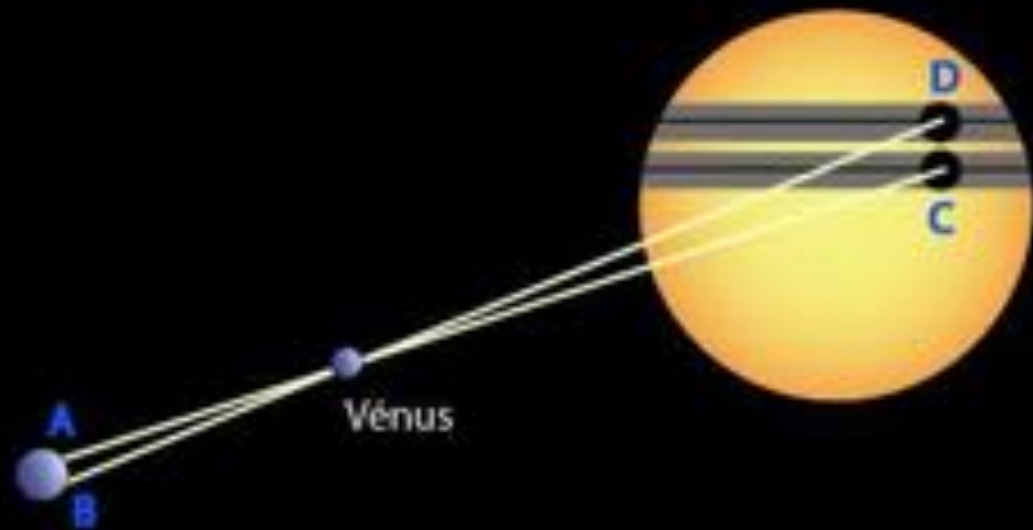
Etablissement de l'Académie des Sciences et Fondation de l'Observatoire de Paris – 1666, Testelin d'après Le Brun

Distance Terre - Soleil

Passages de Vénus devant le Soleil en 1761 & 1769 et en 1874 & 1882
(depuis 2004 & 2012)



1882



Principe simplifié : vue de A et B sur Terre, Vénus semble suivre deux cordes différentes sur le disque solaire et le passage n'a donc pas la même durée.

Si on chronomètre les temps de passage en A et en B et qu'on connaît la distance AB sur Terre, on peut déduire la distance Terre-Soleil (calcul un peu compliqué à nouveau fondé sur les règles de géométrie et la 3^{ème} loi de Kepler).

Distance Terre - Soleil

Passages de Vénus devant le Soleil en 1761 & 1769 et en 1874 & 1882

Transits de 1761 & 1769 : nombreuses explorations
(Royaume-Uni, Autriche, France)

Lieux d'observations : Europe

- + Sibérie, Norvège, Terre-Neuve, Madagascar, ... en 1761
- + Baie d'Hudson (basse Californie), Norvège, ... en 1769
(et expédition Cook vers Tahiti)

Dans la plupart des cas : observation impossible ou incomplète (météo)
(cf. l'histoire de l'astronome français Le Gentil)

Meilleure observation : Dixon & Mason au cap de Bonne Espérance en 1761

Regroupement de toutes les mesures en 1771 par Lalande (Obs. de Paris) :

1 Unité Astronomique (UA) = (153 ± 1) millions de km

Transits de 1874 & 1882 : collecte des observations par Newcomb (USA) :

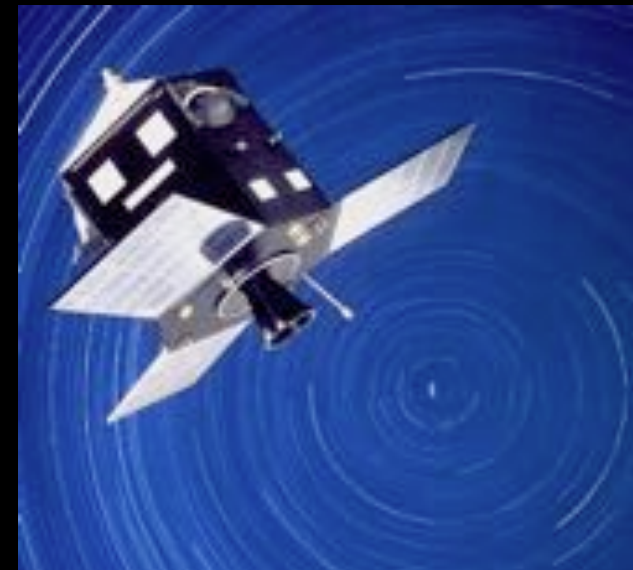
1 UA = (149.9 ± 0.3) millions de km

La distance des étoiles

Bessel (Allemagne), 1838

Méthode : mesure de la parallaxe annuelle

La mesure est rendue possible par les progrès des instruments d'optique (instrument construit par Fraunhofer).



Hipparcos, ESA

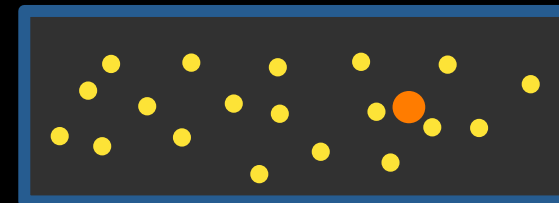
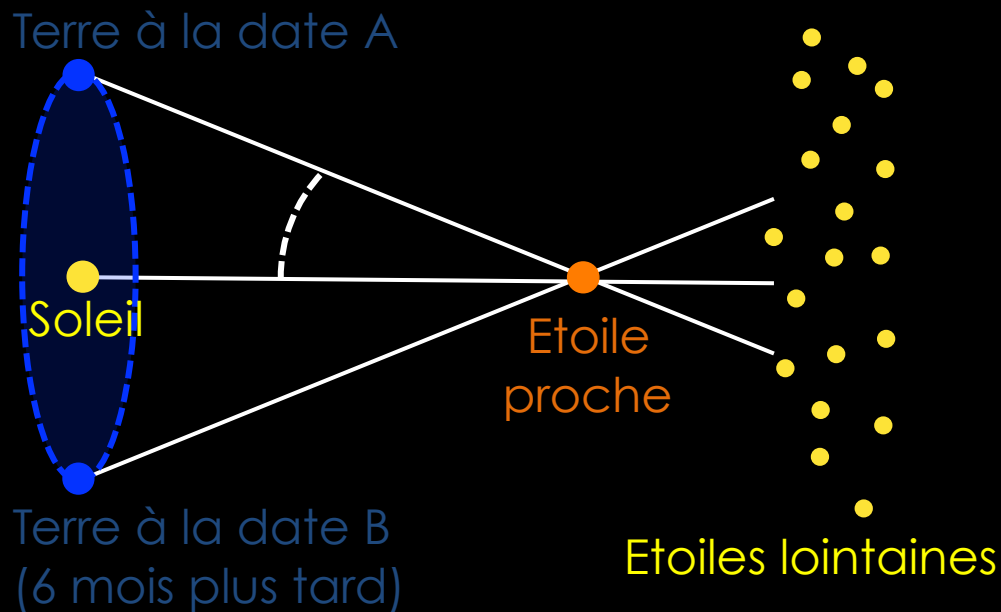


Image à la date A

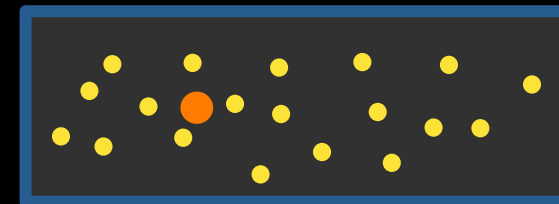


Image à la date B

Bessel (1838) : distance de 61 Cygni = 10,5 années lumière

Satellite Hipparcos (années 90) : distance de 2,5 millions d'étoiles dans la Galaxie

Et la vitesse de la lumière ?

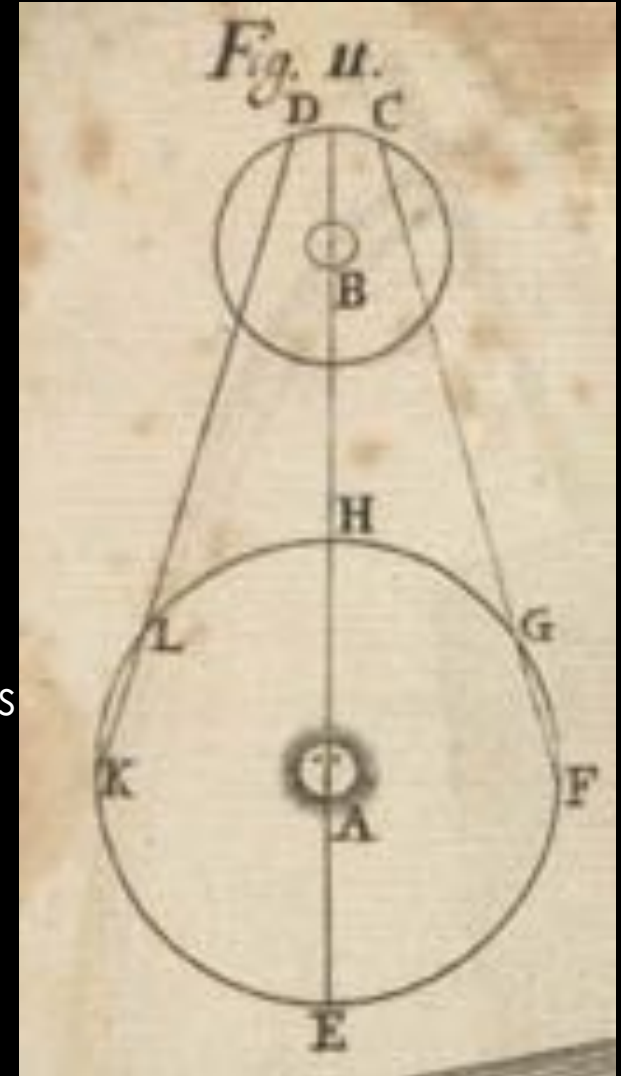
La première mesure « précise » (à 30 % près) est fournie par l'astronomie.

Roëmer, Paris, 1676 – Observation des éclipses d'Io

- la période (~ 42.5 h) varie de ± 10 minutes suivant la position de la Terre.
- Contradiction apparente avec la 3^{ème} loi de Kepler.
- Interprétation de Roëmer : vitesse finie de la lumière.
- En quelques années, il mesure $c = 212\,000$ km/s.
(source d'erreur : le chronométrage mais aussi l'UA).

Delambre, Paris, 1791 – Analyse de 140 ans de données

- Mesure précise du temps de parcours de l'U.A. par la lumière : $\Delta t = 8.13$ minutes
- Vitesse de la lumière :
 - $c = 2.05$ mUA/s (très précis)
 - $= 313\,000$ km/s
 - (encore imprécis à cause de la valeur de l'UA).



Rayon moyen de la Terre = 6 371 km

Distance du Soleil 1 U.A = 149 600 000 km

Année lumière 1 a.l. = 9 461 000 000 000 km

Résumé du cours 1

L'astrophysique est la science qui étudie tout ce qui est observé dans l'Univers en dehors de l'atmosphère terrestre.

Elle s'appuie sur

- l'observation, qui remplace l'expérience, hélas le plus souvent impossible ;
- la physique, qui lui donne un cadre théorique pour l'interprétation des phénomènes observés.

L'astrophysique entretient donc des liens étroits avec :

- l'instrumentation, qui fait progresser l'observation ;
- la théorie physique, qui lui sert de cadre interprétatif et à qui elle fournit des tests impossibles au laboratoire ;
- la simulation numérique, car les objets et phénomènes étudiés sont complexes et que l'ordinateur est donc souvent indispensable pour résoudre les équations qui décrivent les lois physiques qui les gouvernent ;
- les mesures physiques expérimentales, qui fournissent des données indispensables aux modèles physiques ;
- etc.

L'observation du ciel est sans doute aussi vieille que l'humanité, mais l'astrophysique est une science jeune: la physique nécessaire pour comprendre le Soleil et les étoiles est née au XX^e siècle seulement... (⇒ Cours n°2)

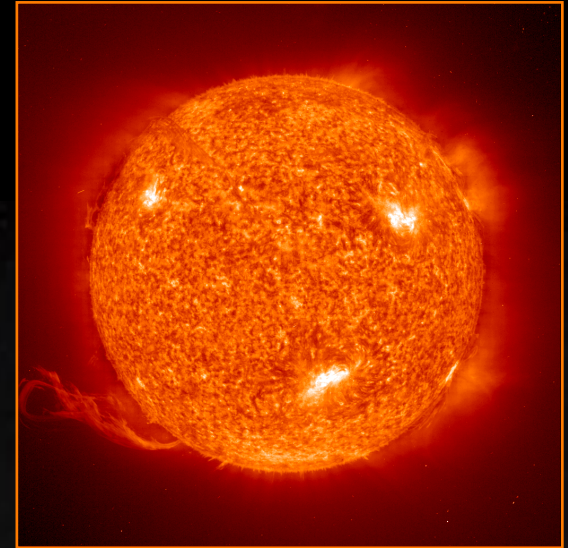
Prochains cours



Montage ESO de photographies prises au Chili (La Silla & Paranal) et aux Canaries (La Palma)

Prochains cours

Cours n°2 – Notre étoile, le Soleil



Le Soleil à 1 U.A.
(non visible la nuit...)

Prochains cours

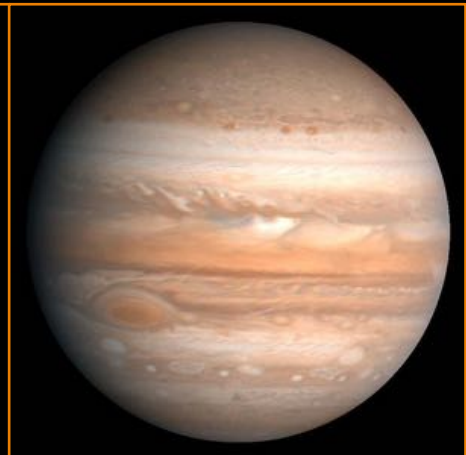
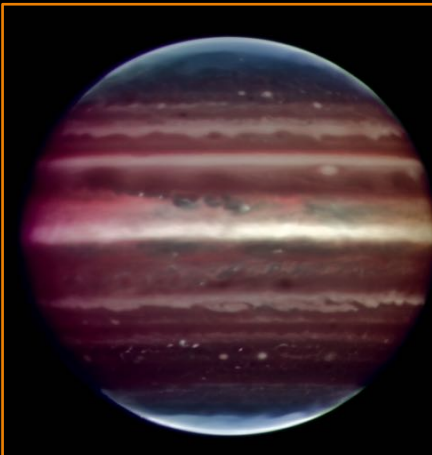
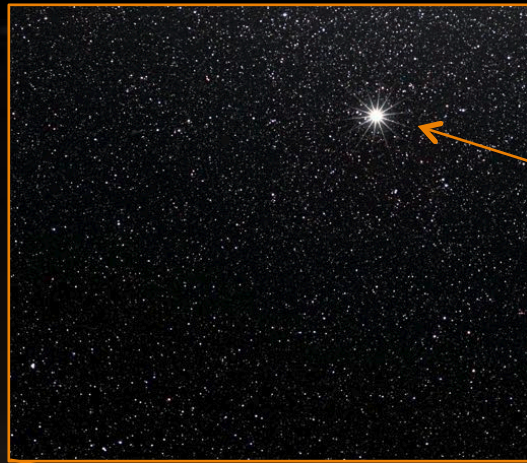
Cours n°3 – De la lunette de Galilée aux télescopes spatiaux:
l'observation en astronomie



Le télescope spatial Hubble

Prochains cours

Cours n°4 – Panorama du système solaire



Infrarouge (VLT) Visible (Voyager 2)

La planète Jupiter
à 720 millions de km soit 4.8 U.A.



Plan de l'écliptique

Vénus



Prochains cours

Cours n°5 – A la recherche d'autres mondes : les exoplanètes

Cours n°6 – Vie et mort des étoiles

Etoile
polaire



Les « 7 sœurs »
des Pléiades

Sirius

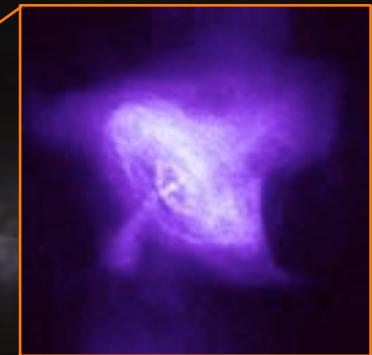


L'amas ouvert des Pléiades
à 440 années lumière

Prochains cours

Cours n°7 – Explosions et monstres cosmiques:
supernovae, étoiles à neutrons et trous noirs

La nébuleuse du Crabe
à 6 300 années lumière (ESO-VLT)

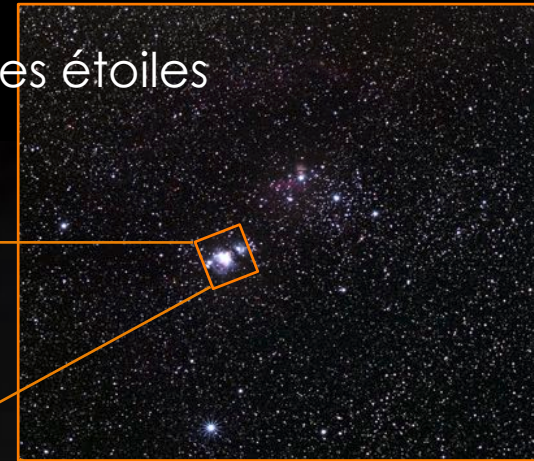
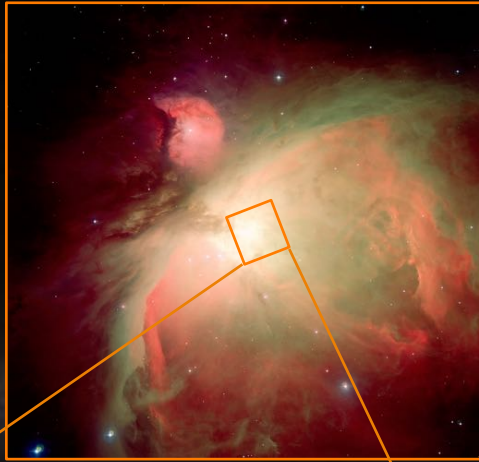


Rayons X (Chandra)

Prochains cours

Cours n°8 – Les nuages interstellaires et la formation des étoiles

La nébuleuse d'Orion
(ESO-2.2 m)



Amas du trapèze
(HST)

La nébuleuse d'Orion
à 1350 années lumière



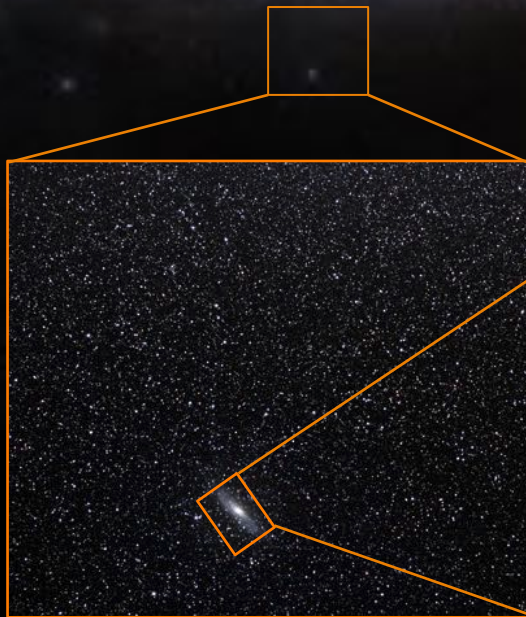
Orion

Prochains cours

Cours n°9 – La Voie Lactée et les galaxies proches



Le centre galactique
à 27 000 a.l.

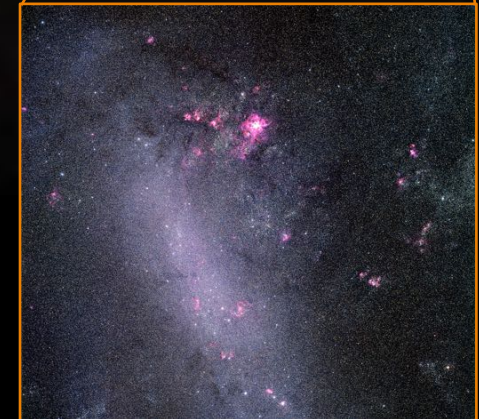
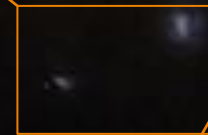


La galaxie d'Andromède
à 2,5 millions d'a.l.



(T-30 cm) (ESO-1m)

Les nuages de Magellan
à 160 000 (LMC)
et 190 000 (SMC) a.l.

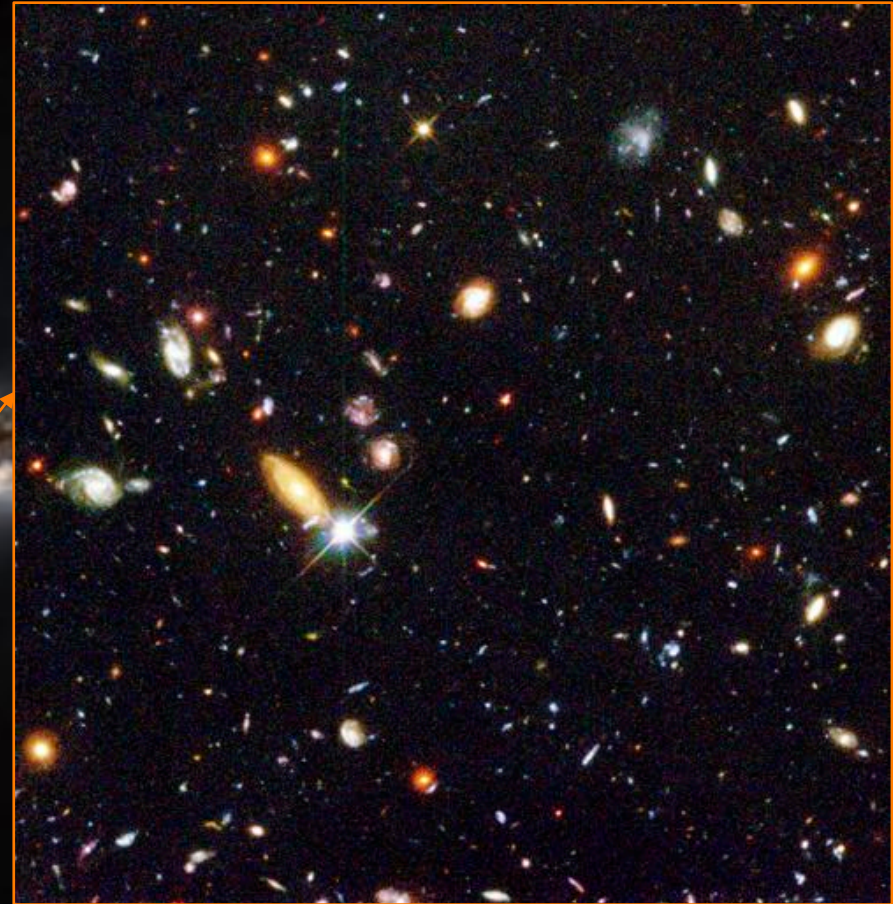


Prochains cours

Cours n°10 – L'Univers lointain

Cours n°11 – La cosmologie moderne: un Univers en évolution

Grande ourse



Le ciel profond de Hubble
Des milliers de galaxies jusqu'à
quelques milliards d'années lumière
(HST)

Prochains cours

Construire la vision moderne de l'Univers

1. Introduction: qu'est ce que l'astrophysique
2. Notre étoile, le Soleil
3. De la lunette de Galilée
aux télescopes spatiaux :
l'observation en astronomie
4. Panorama du système solaire
5. A la recherche d'autres mondes,
les exoplanètes
6. Vie et mort des étoiles
7. Explosions et monstres cosmiques :
supernovae, étoiles à neutrons, trous noirs
8. Les nuages interstellaires
et la formation des étoiles
9. La Voie Lactée et les galaxies proches
10. L'Univers lointain
11. La cosmologie moderne :
un Univers en évolution
12. Conclusion :
les défis pour l'astrophysique contemporaine

$D_{\text{Soleil}} = 1 \text{ U.A.}$
(Picard, Cassini, Richer, 1672)

$D_{\text{étoiles proches}} = 10 - 100 \text{ a.l.}$
(Bessel, 1838)

$\varnothing_{\text{Galaxie}} = \text{quelques } 10^4 \text{ a.l.}$
 $D_{\text{galaxies proches}} = \text{quelques } 10^6 \text{ a.l.}$
(Début XX^e)

$D_{\text{univers observable}} = \text{quelques } 10^{10} \text{ a.l.}$
(Fin XX^e)

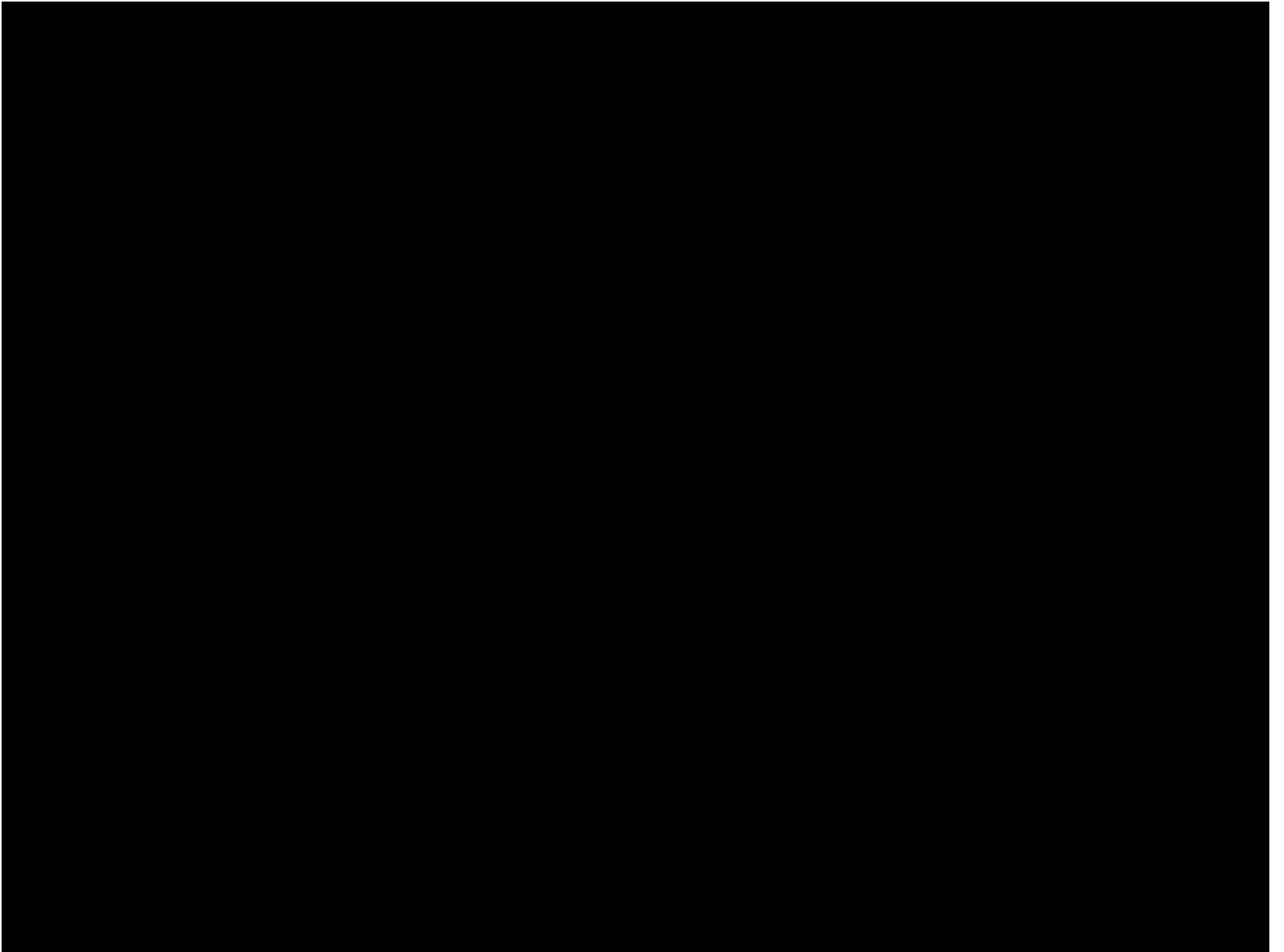
Page web du cours

Les transparents + quelques liens

http://www.iap.fr/users/daigne/FD_IAP/UIA2011.html

Courriels :

Patrick Boissé :	boisse@iap.fr
Frédéric Daigne :	daigne@iap.fr

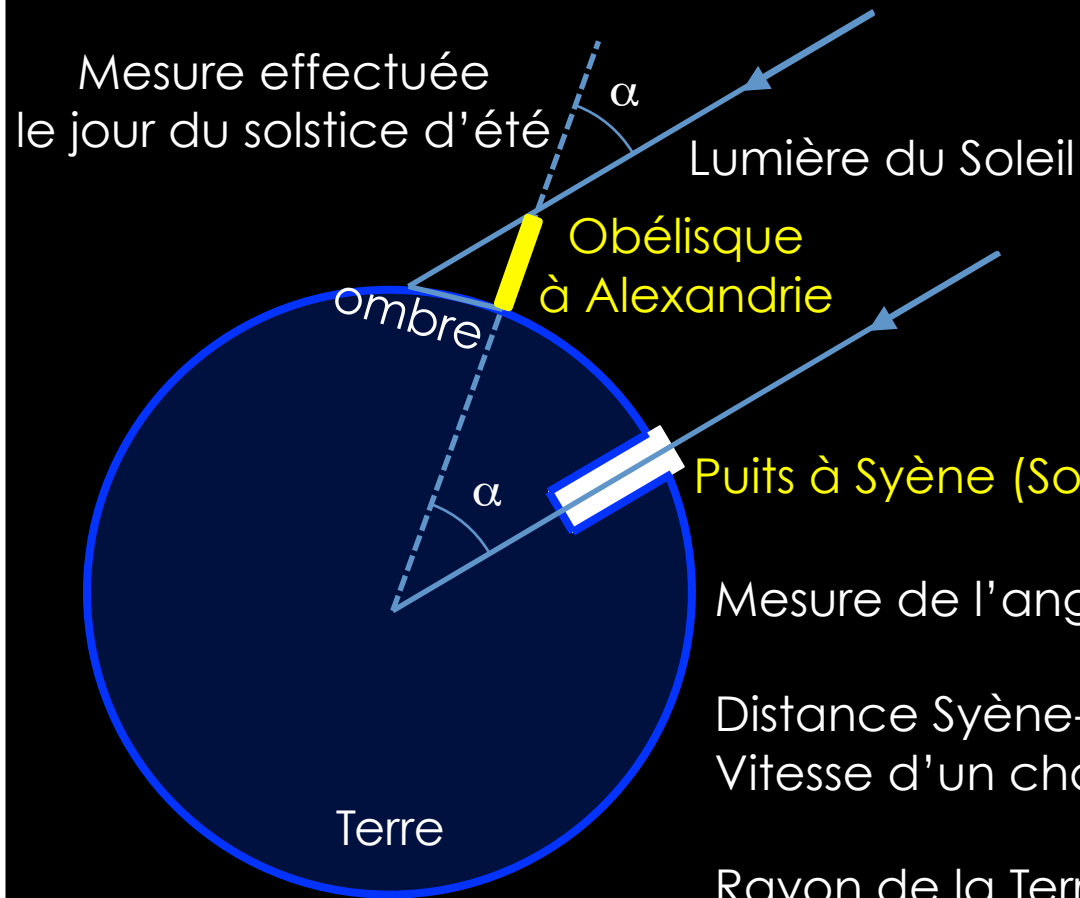


Quelques suppléments

Rayon de la Terre

Eratosthène, Alexandrie (Egypte)

III^{ème} siècle av JC



Mesure effectuée
le jour du solstice d'été

Lumière du Soleil

Obélisque
à Alexandrie

Puits à Syène (Soleil au zénith)

Mesure de l'angle : $\alpha \approx 2\pi/50$ (Eratosthène)

Distance Syène-Alexandrie : 50 jours de chameaux

Vitesse d'un chameau : 100 stades par jour

Rayon de la Terre : $R = \text{distance} / \alpha$
 ≈ 40000 stades

1 stade = 158 m $R = 6300$ km

Distance Terre – Lune et taille de la Lune

Aristarque de Samos, Samos (Grèce), III^{ème} siècle av JC
& Hipparque, II^{ème} siècle av JC



Aristarque développe une méthode géométrique utilisable lors d'une éclipse de Lune.

Mesure effectuée par Hipparque : Distance(Terre-Lune) \sim 70 Rayon(Terre)
Rayon(Lune) \sim Rayon(Terre)/3

Distance Terre – Lune et taille de la Lune



Méthode :	Durée du passage	$\Delta t \approx 3 \text{ h}$
	Distance parcourue	$d \approx 2 R_{\text{Terre}}$
	Période orbitale de la Lune	$T \approx 1 \text{ mois}$
« Règle de 3 »	Périmètre de l'orbite	$P = d \times T / \Delta t \approx 480 R_{\text{Terre}}$
	Rayon de l'orbite	$D_{\text{Lune}} = P / 2 \pi \approx 76 R_{\text{Terre}}$
	Taille apparente de la Lune	$2 \alpha \approx 0.5^\circ$
	Taille réelle de la Lune	$R_{\text{Lune}} = D_{\text{Lune}} \times \tan(\alpha) \approx R_{\text{Terre}} / 3$ $\approx 2100 \text{ km}$

Distance Terre - Soleil

Passages de Vénus devant le Soleil en 1761 & 1769

Le Gentil (1725-1792) à Pondichéry: « Est-ce cela le sort des astronomes ? Je me suis exilé de ma patrie, uniquement pour être spectateur d'un nuage fatal. Je fus plus de quinze jours dans un abattement singulier, à ne pas avoir le courage de prendre la plume...elle me tomba plusieurs fois des mains lorsque le moment vint d'annoncer en France le sort de mon opération. »



Distance Terre - Soleil

Passages de Vénus devant le Soleil en 1761 & 1769

Nicole-Reine Lepaute (1723-1788)

Jérôme Lalande (1732-1807) : en 1771, il obtient:

1 Unité Astronomique (UA) = (153 ± 1) millions de km



*De tables de Sinus toujours environnée,
Vous suivez avec nous Hipparque et Ptolémée ;
Mais ce serait trop peu que de suivre leurs traces,
Et d'être au rang de ceux que nous comblons
d'honneurs,
Reine, si vous n'étiez et le sinus des Grâces,
Et la tangente de nos cœurs.*

(Lalande)



Phases de Vénus

Découvertes par Galilée en 1610, elles apportent un argument très fort en faveur du système héliocentrique.

