

# Les distances dans l'univers

Fabrice Feinstein

CPPM

13 juin 2018

Summer Camp OCEVU 2018

Contact : [feinstein@cppm.in2p3.fr](mailto:feinstein@cppm.in2p3.fr)



# Déroulé

Comment mesurer et appréhender les distances	15
Les barreaux de l'échelle cosmique	20
Les distances cosmologiques et l'expansion de l'univers	15
Petite pause	10
Le diagramme de Hubble	10
Le Large Synoptic Survey Telescope	15
La chance que vous avez d'arriver maintenant !	15

Participez !

# Comment mesurer et appréhender les distances

13h35

# Trois méthodes (1)

**Arpenter :**

sur Terre, avec un mètre ou un laser  
distance Terre – Lune avec un laser  
écho radar entre la Terre et Vénus

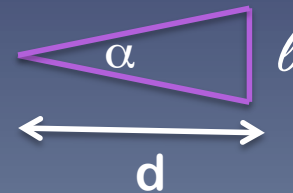
La vitesse de la lumière est fixée à : 299 792 458 m/s

Mesurer une distance revient à mesurer le temps  
que met la lumière à la parcourir

# Trois méthodes (2)

Triangler :

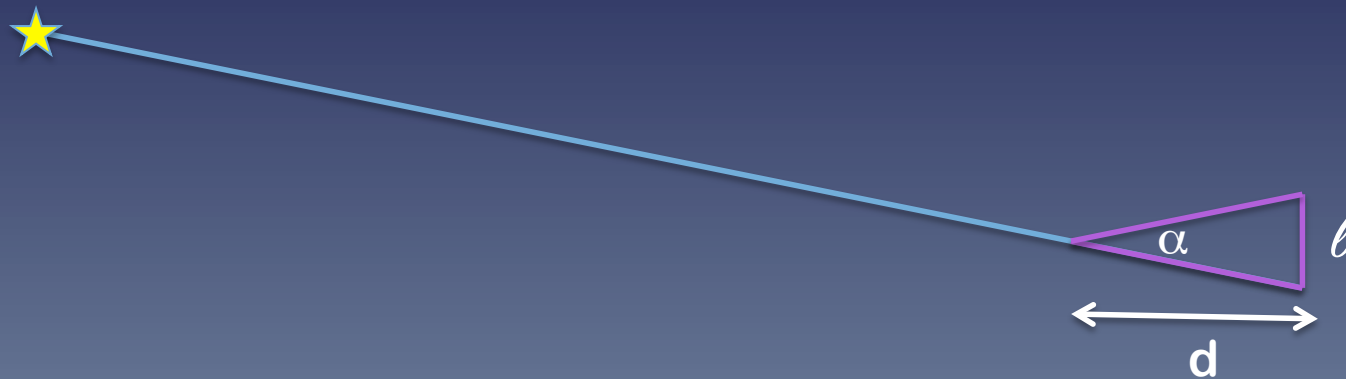
Dans le triangle violet, je connais l'angle  $\alpha$ , la base  $\ell$   
et la hauteur  $d$



# Trois méthodes (2)

Triangler :

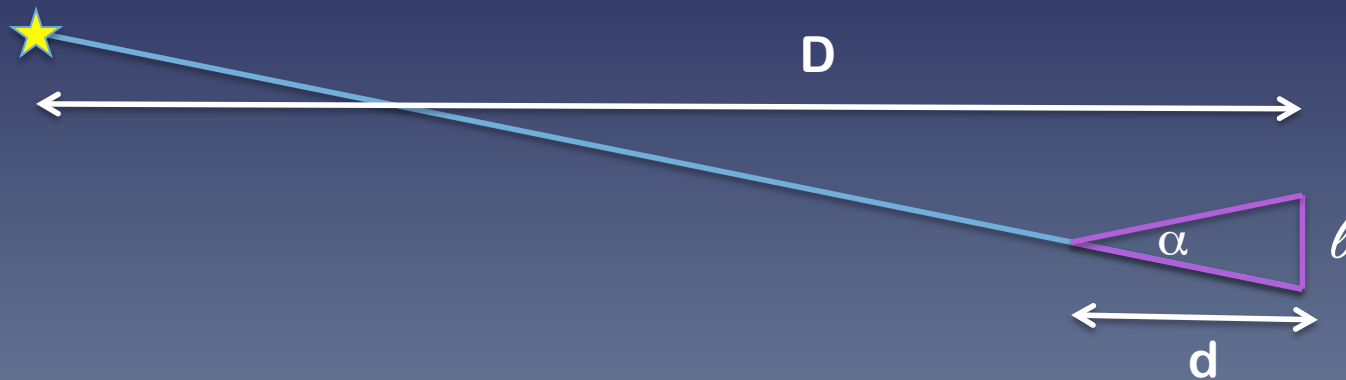
Je vise l'objet lointain.



# Trois méthodes (2)

Triangler :

Je vise l'objet lointain. A quelle distance  $D$  est-il ?

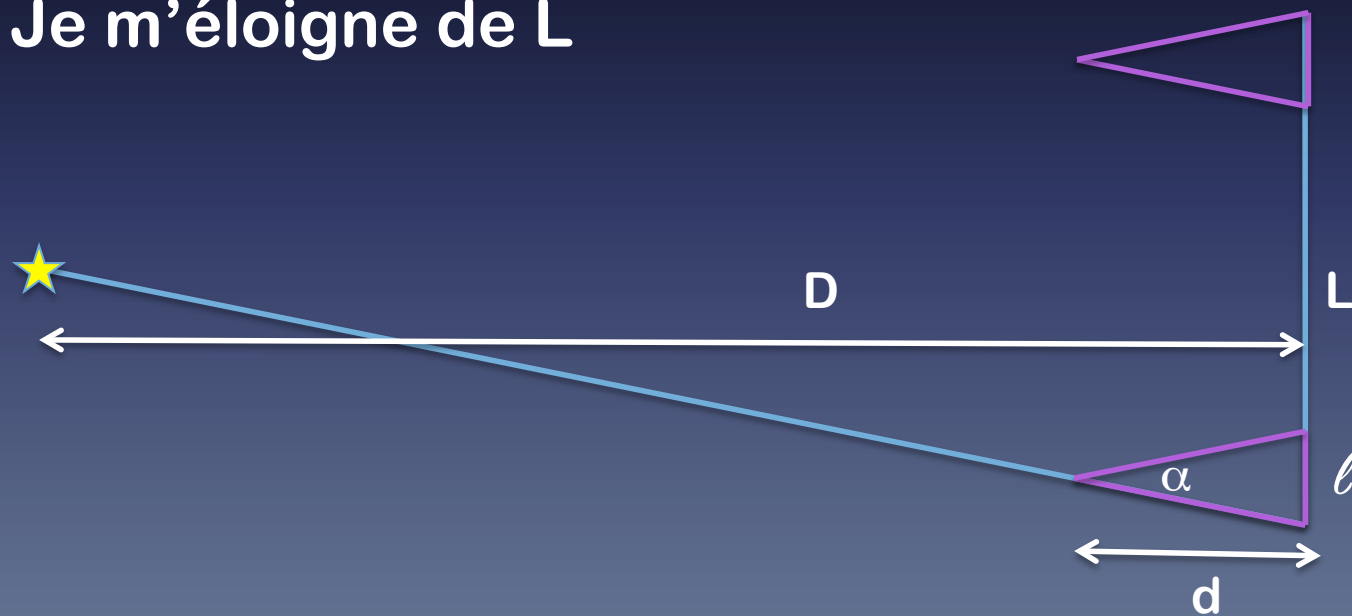




# Trois méthodes (2)

Triangler :

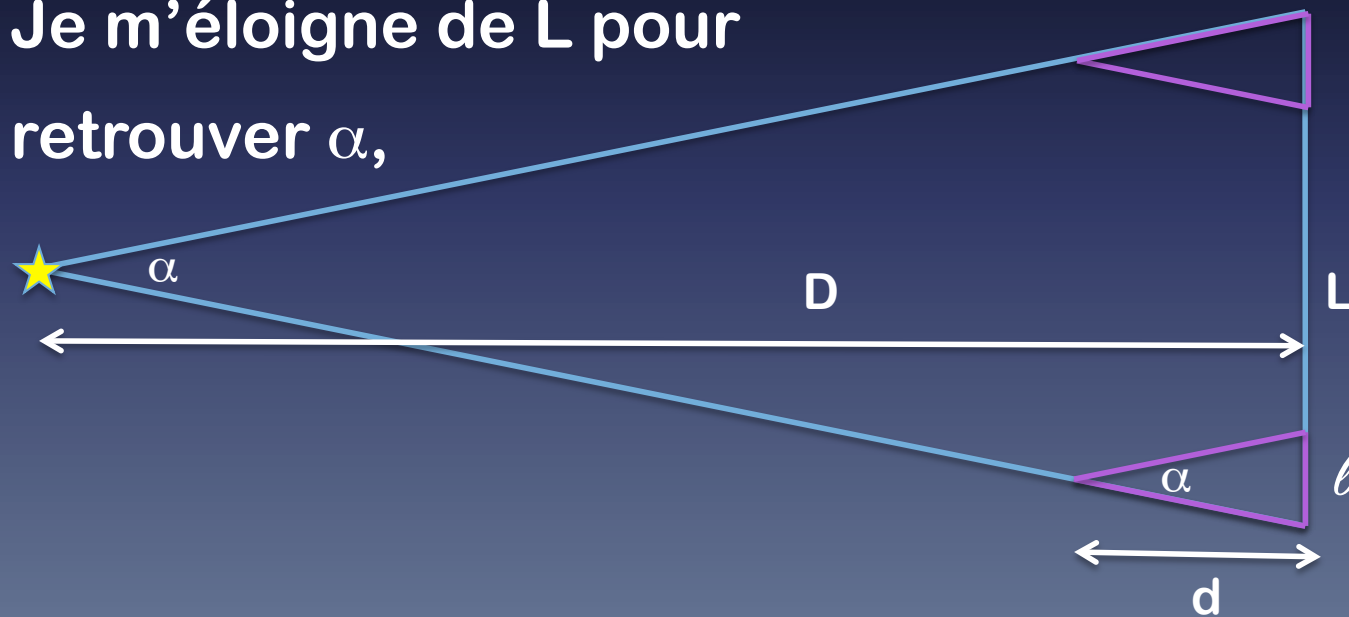
Je m'éloigne de L



# Trois méthodes (2)

Triangler :

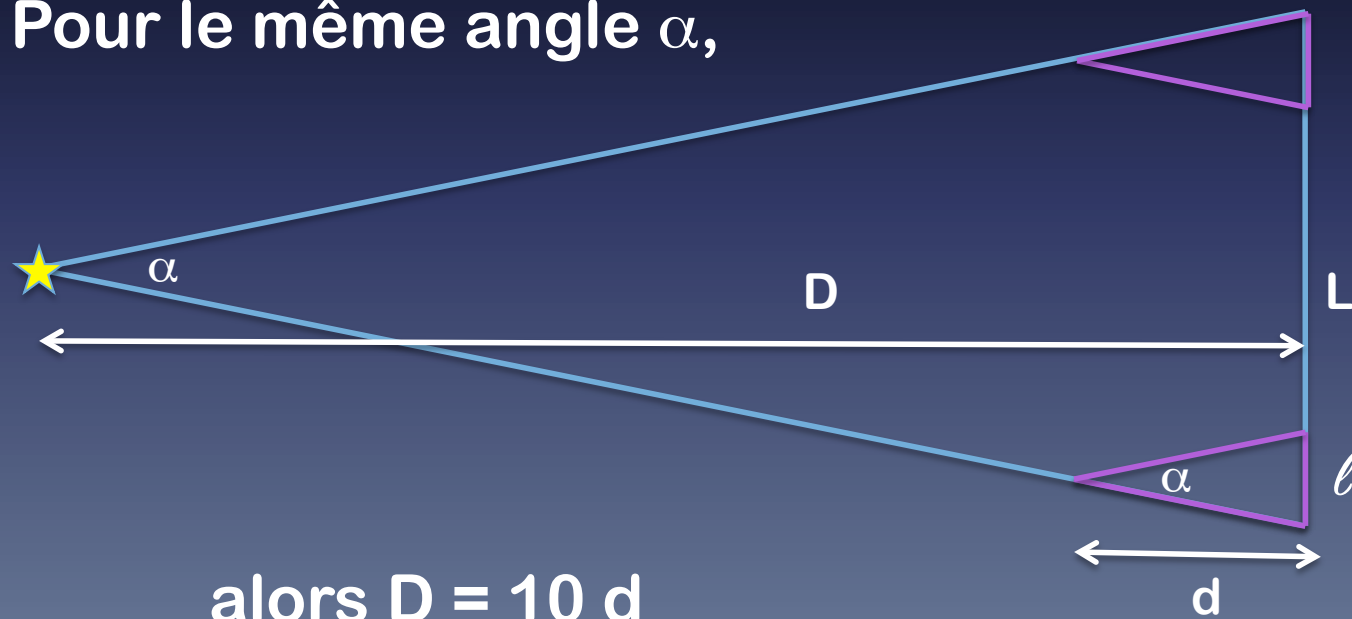
Je m'éloigne de L pour  
retrouver  $\alpha$ ,



# Trois méthodes (2)

Triangler :

Pour le même angle  $\alpha$ ,

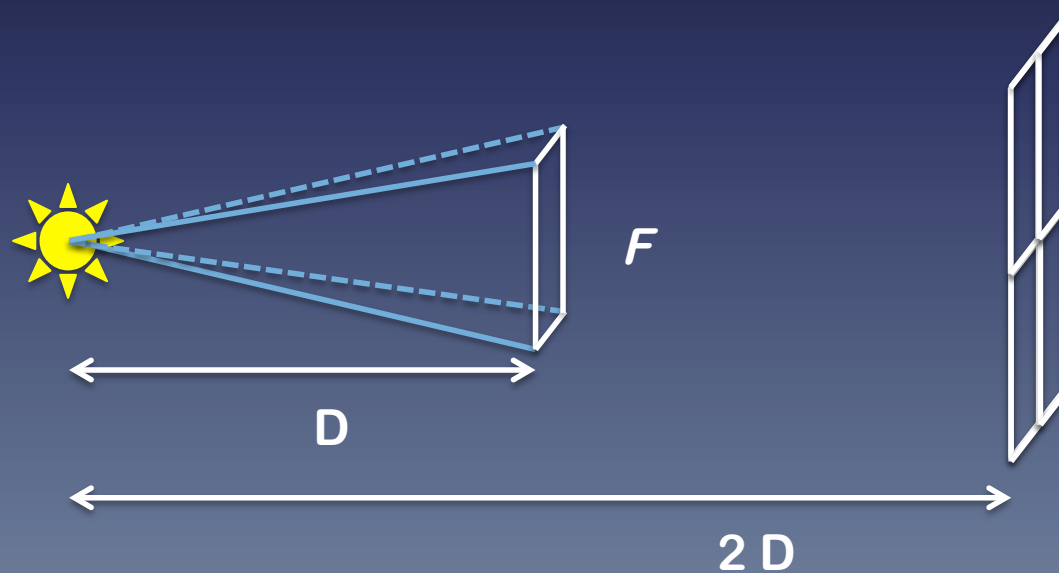


alors  $D = 10 d$

si  $L = 10 l$ ,

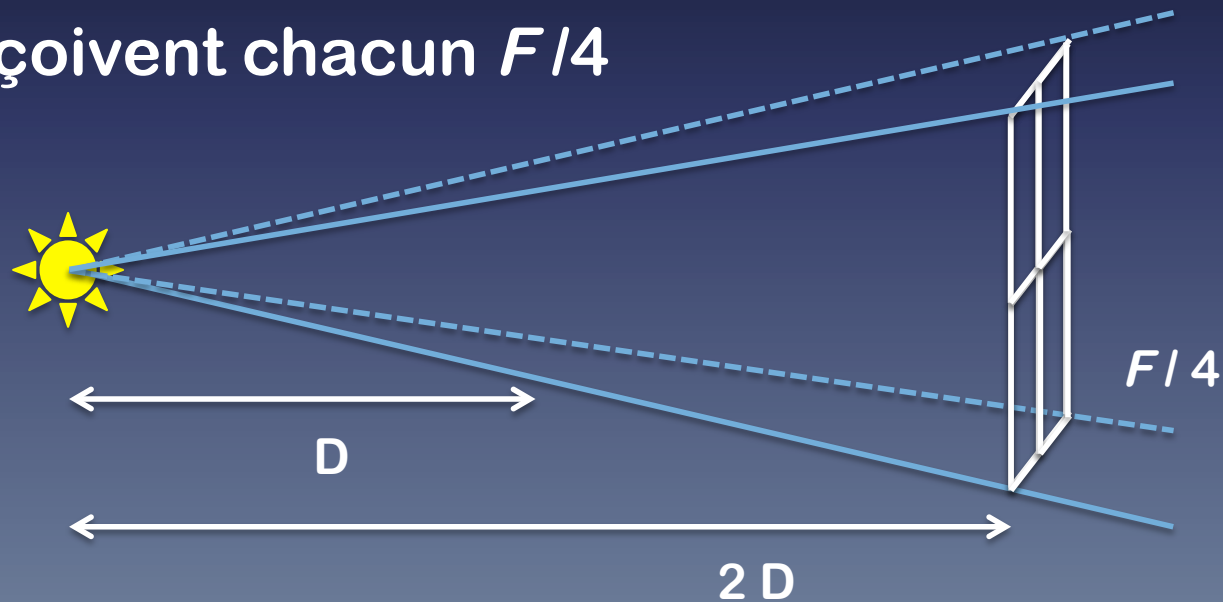
# Trois méthodes (3)

Comparer les éclats apparents à distances  $D$  et  $2D$  :  
Le même flux  $F$  de lumière tombe sur le 1<sup>er</sup> écran...



# Trois méthodes (3)

Comparer les éclats apparents à distances  $D$  et  $2D$  :  
Le même flux  $F$  de lumière tombe sur le 1<sup>er</sup> écran...  
que sur l'ensemble des 4 écrans situés 2 x plus loin,  
qui reçoivent chacun  $F/4$



# Les barreaux de l'échelle cosmique

13h50

# La taille de la Terre

Mesure d'Eratosthène (-276 – -194)

Le 21 juin à midi :

À Syène, le Soleil est vertical,  
il se reflète dans un puits

A Alexandrie, 5000 stades plus  
au Nord, on voit une ombre,

le Soleil fait un angle de  $1/50^{\text{e}}$  de tour

Pour  $360^{\circ}$ , il faut 250 000 stades, soit  $\sim 39\,000$  km



# La distance de la Lune (1)

Mesure d'Hipparque (-190 – -120)

Eclipse de Lune

L'ombre de la Terre :

4 x diamètre de la Lune

La Terre a un diamètre de :

$40\,000 \text{ km} / \pi = 12\,700 \text{ km}$

La Lune a un diamètre de  $12\,700 \text{ km} / 4 = 3200 \text{ km}$



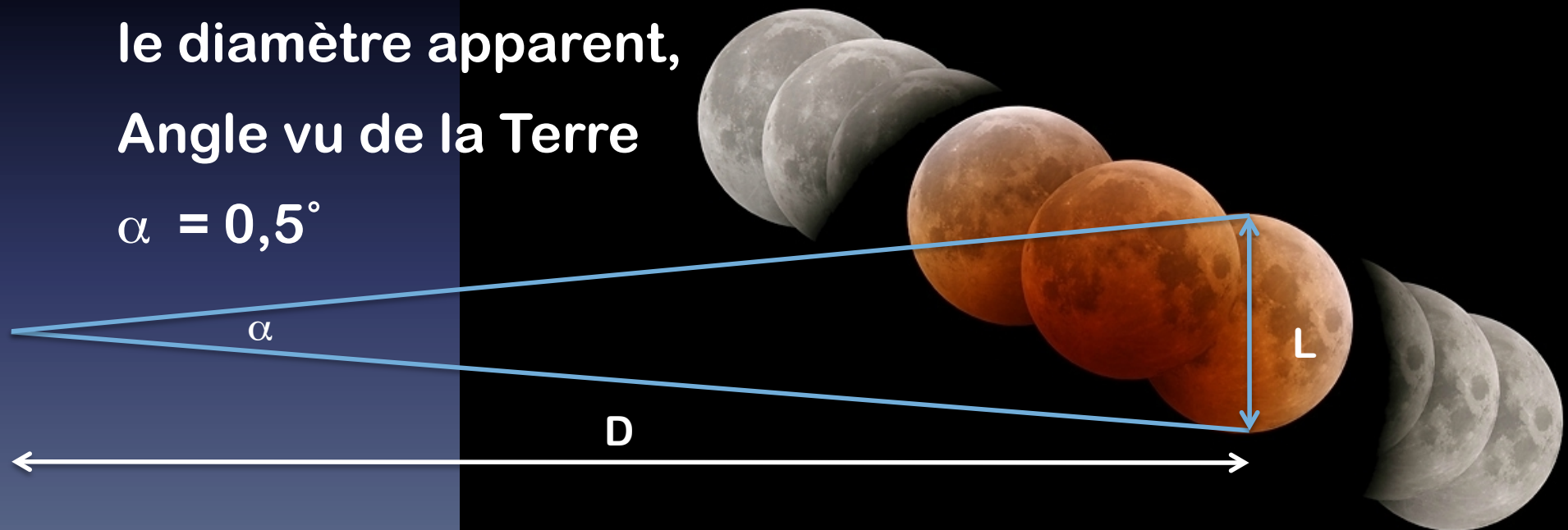


# La distance de la Lune (2)

On mesure l'angle entre les deux bords de la Lune,  
le diamètre apparent,

Angle vu de la Terre

$$\alpha = 0,5^\circ$$



Comme  $L = 3200$  km, on trouve  $D = 365\,000$  km

# La distance de la Lune



A l'échelle, on ne voit pas grand chose... c'est loin !

Il faudrait 384 h en avion, soit 16 jours pleins

Apollo 11 a fait le voyage en 3 jours

Pour parvenir à mesurer cette distance, il a fallu :

arpenter la distance Syène – Alexandrie

en déduire la taille de la Terre

l'ombre de la Terre a donné la taille de la Lune

une triangulation a donné la distance de la Lune

# Le système solaire

Kepler (1618), après 6 ans de calculs pour Mars :

Orbites des planètes sont des ellipses

Un des foyers est le Soleil

$T^2 / a^3 = \text{constante}$  (T = période, a = demi grand axe)

« année » 8 x plus longue  $\Rightarrow$  4 x plus loin

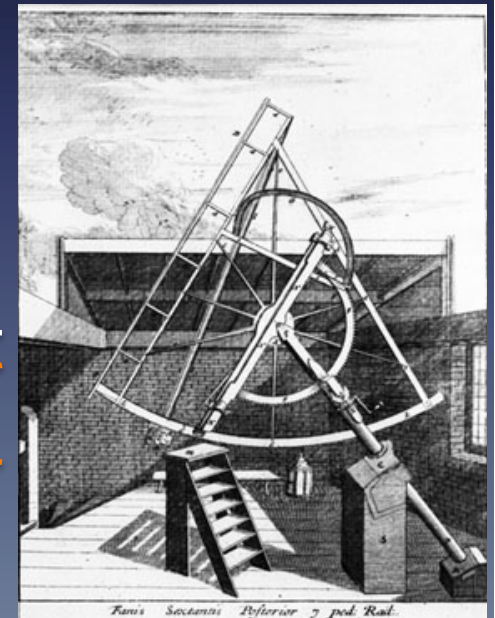
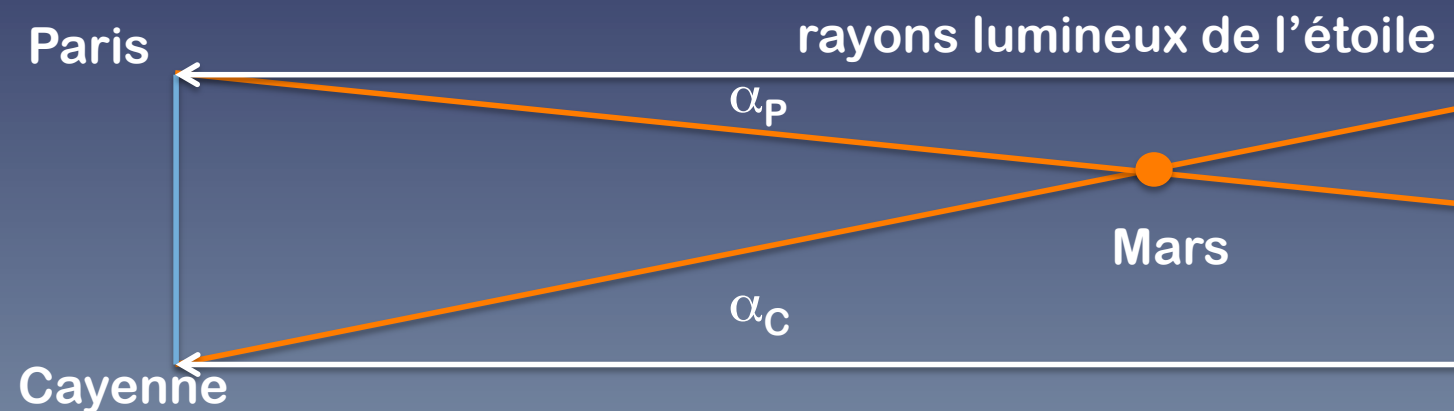
Kepler connaît les rapports des distances, mais sans échelle absolue, pas la distance Terre – Soleil

# L'Observatoire de Paris

Cassini arrive à Paris en 1669 comme astronome royal de Louis XIV, l'Observatoire se construit

Programme : déterminer la distance Terre – Soleil

observer Mars de deux lieux éloignés et mesurer l'angle entre Mars et les étoiles



# La parallaxe de Mars

Richer passe 1672 et 1673 à Cayenne et observe Mars pendant que Cassini fait de même à Paris

la différence d'angle  $\alpha_P - \alpha_C$  et

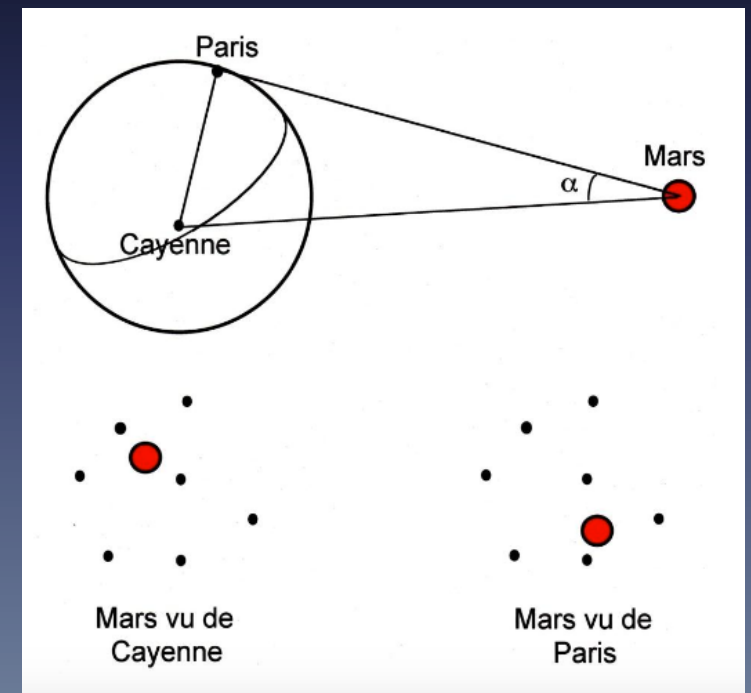
la distance Paris – Cayenne

donnent la distance Terre – Mars

La 3<sup>e</sup> loi de Kepler donnera

la distance Terre – Soleil :

138 millions de km



# La vraie taille du système solaire

1<sup>e</sup> constatation : le Soleil est 20 fois plus loin qu'on ne le pensait. Il est donc 20 fois plus gros.

Comme il est à 150 millions de km, que la Lune est à 384 000 km, et qu'il fait la même taille apparente que la Lune, il est  $150\,000\,000 / 384\,000 = 400$  fois plus grand, soit  $400 \times 3474 = 1,4$  millions de km

# La vraie taille du système solaire

1<sup>e</sup> constatation : le Soleil est 20 fois plus loin qu'on ne le pensait

=> 20 fois plus gros, diamètre = 1,4 millions de km

2<sup>e</sup> constatation : comme il est à 150 millions de km, la distance fait 107 diamètres solaires

•

S

T

Très difficile à représenter ! Apollo mettrait 3 ans.

# La distance des étoiles

parallaxe pour la distance Terre – Mars :

entre Paris et Cayenne = 7000 km

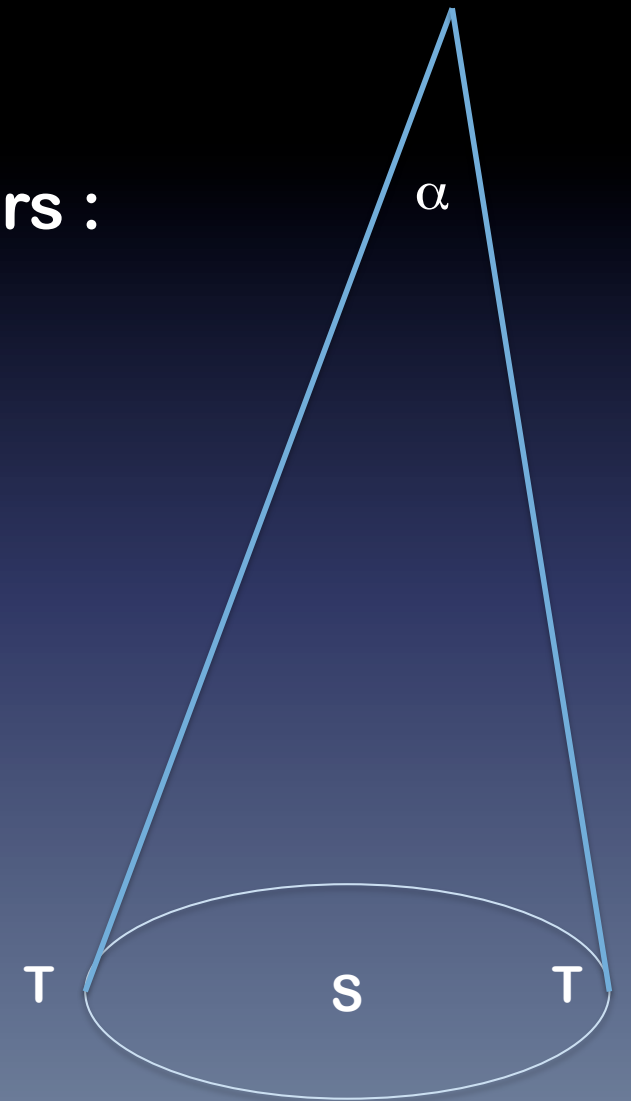
parallaxe pour une étoile :

à 6 mois d'écart = 300 millions de km

Bradley (~ 1725) observe gamma du

Dragon => balancement de 20" d'arc

Mais... pas les bonnes propriétés

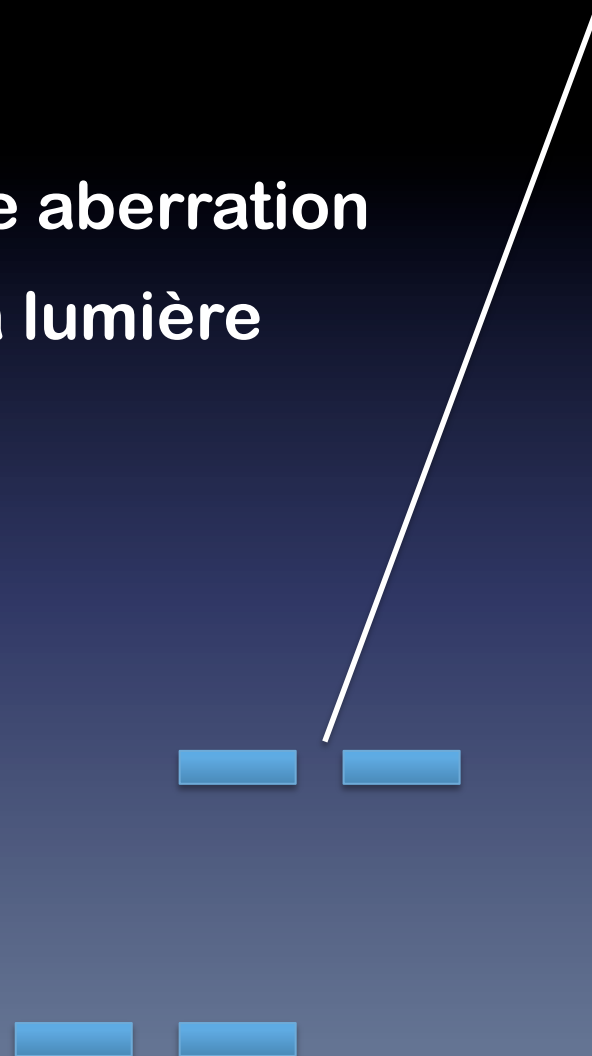




# Bradley et la vitesse de la lumière

Il comprend (1728) que c'est une aberration  
vitesse de la Terre / vitesse de la lumière

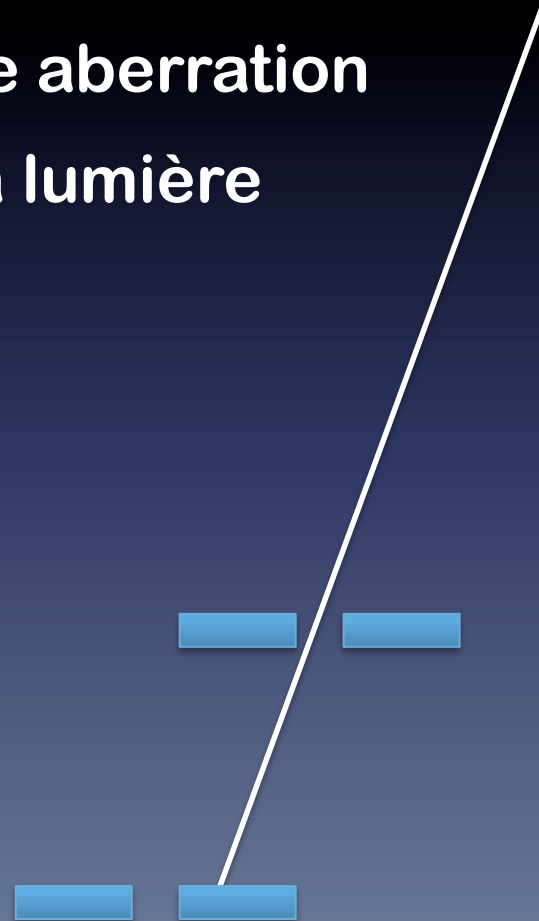
Si les 2 fentes sont immobiles



# Bradley et la vitesse de la lumière

Il comprend (1728) que c'est une aberration  
vitesse de la Terre / vitesse de la lumière

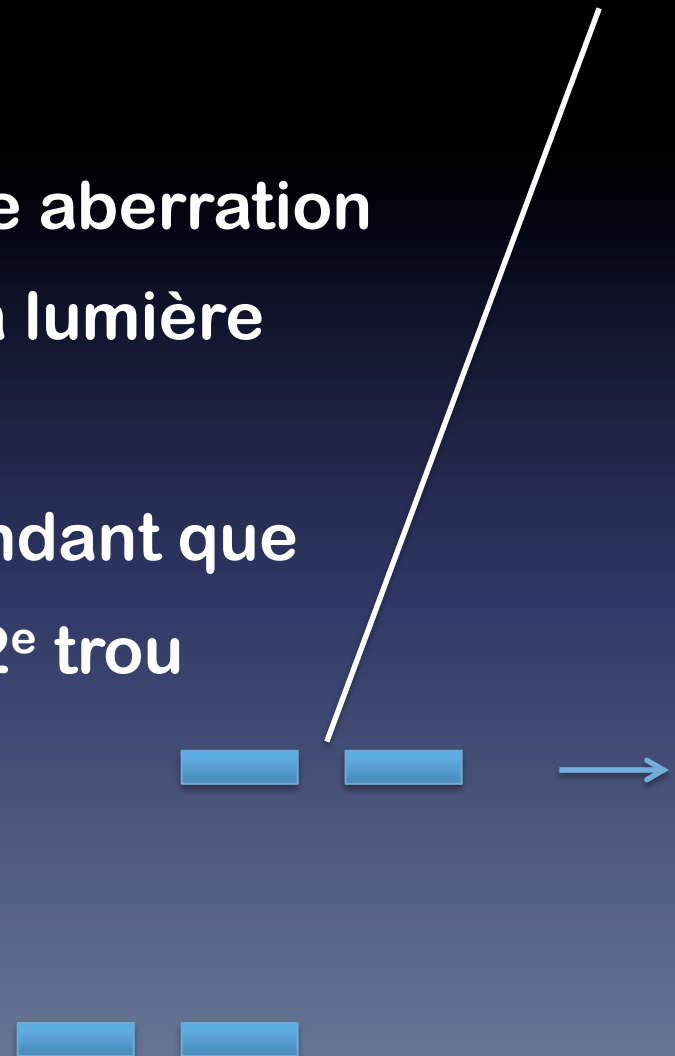
L'étoile n'est pas observée



# Bradley et la vitesse de la lumière

Il comprend (1728) que c'est une aberration  
vitesse de la Terre / vitesse de la lumière

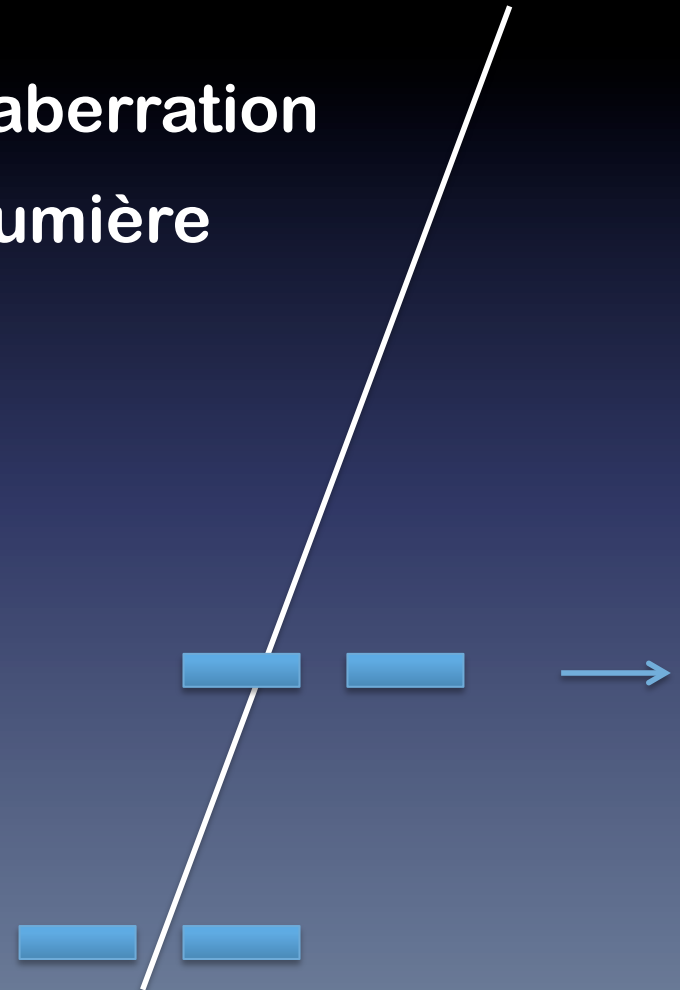
Mais, la Terre avance un peu pendant que  
la lumière se propage du 1<sup>er</sup> au 2<sup>e</sup> trou



# Bradley et la vitesse de la lumière

Il comprend (1728) que c'est une aberration  
vitesse de la Terre / vitesse de la lumière

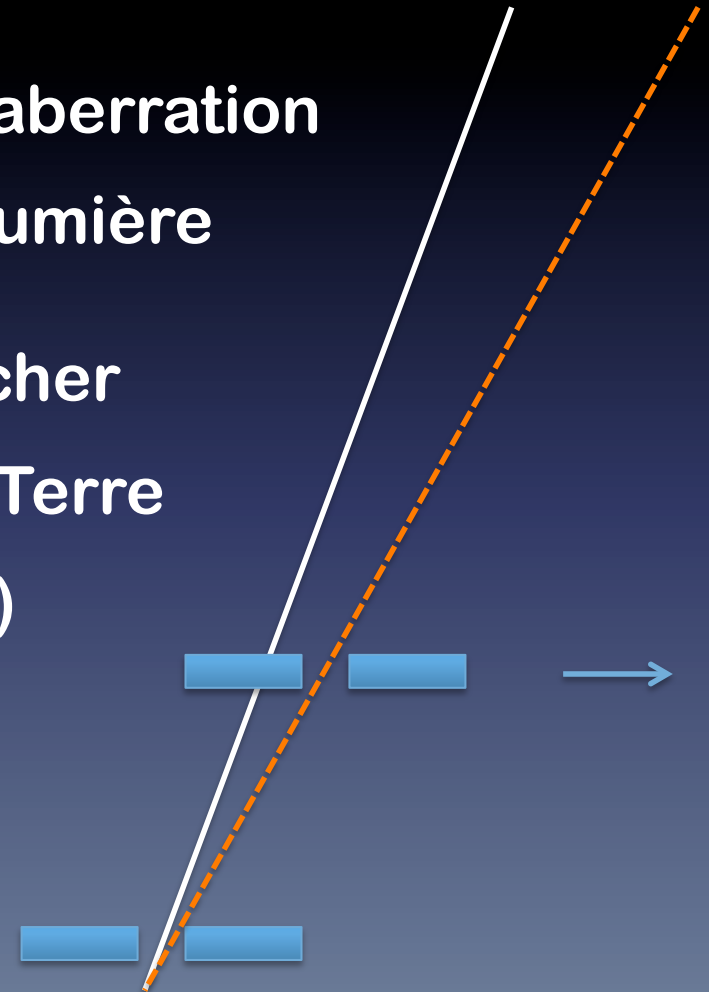
Cette fois, l'étoile est observée



# Bradley et la vitesse de la lumière

Il comprend (1728) que c'est une aberration  
vitesse de la Terre / vitesse de la lumière

La **direction** de l'étoile paraît pencher  
dans le sens du mouvement de la Terre  
(comme la pluie sur un pare-brise)



# Bradley et la vitesse de la lumière

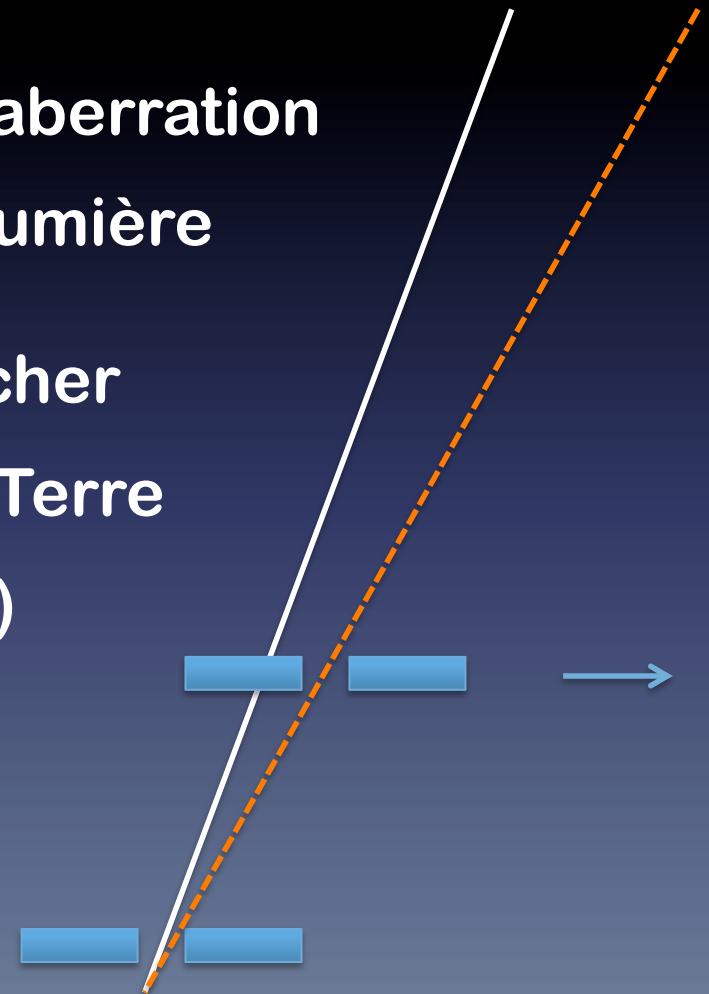
Il comprend (1728) que c'est une aberration  
vitesse de la Terre / vitesse de la lumière

La direction de l'étoile paraît pencher  
dans le sens du mouvement de la Terre  
(comme la pluie sur un pare-brise)

Il trouve :  $V_l = 10\,000 \times V_T$

$V_T = 30 \text{ km/s}$

$\Rightarrow V_l = c = 300\,000 \text{ km/s}$



# La 1<sup>e</sup> parallaxe stellaire

Bessel, en 1838, étudie 61 dy Cygne et trouve une parallaxe de 0,35'', soit :

$$D_{61\text{Cyg}} = 590\,000 \text{ UA}$$

Cette fois on connaît enfin la distance aux étoiles...

et c'est très loin ! 100 000 milliards de km.

Apollo mettrait 2 millions d'années

# La méthode des éclats apparents

Gregory propose en 1668 de comparer l'éclat de Sirius et celui des planètes.

Connaissant leurs distance au Soleil, on estime combien elles réfléchissent.

On compare alors l'éclat du Soleil à celui de Sirius.

Si Sirius est un soleil, le rapport des éclats donne le rapport des distances au carré



# La méthode des éclats apparents

Huygens, en 1698, compare directement l'éclat du Soleil et celui de Sirius et trouve :

$$D_{\text{Sirius}} = 28\,000 D_{\text{soleil}} = 28\,000 \text{ UA}$$

Newton, en 1728, compare Sirius avec Saturne et trouve :

$$D_{\text{Sirius}} = 1\,000\,000 \text{ UA}$$

Trop d'incertitude et d'hypothèses

# Petit voyage vers les étoiles

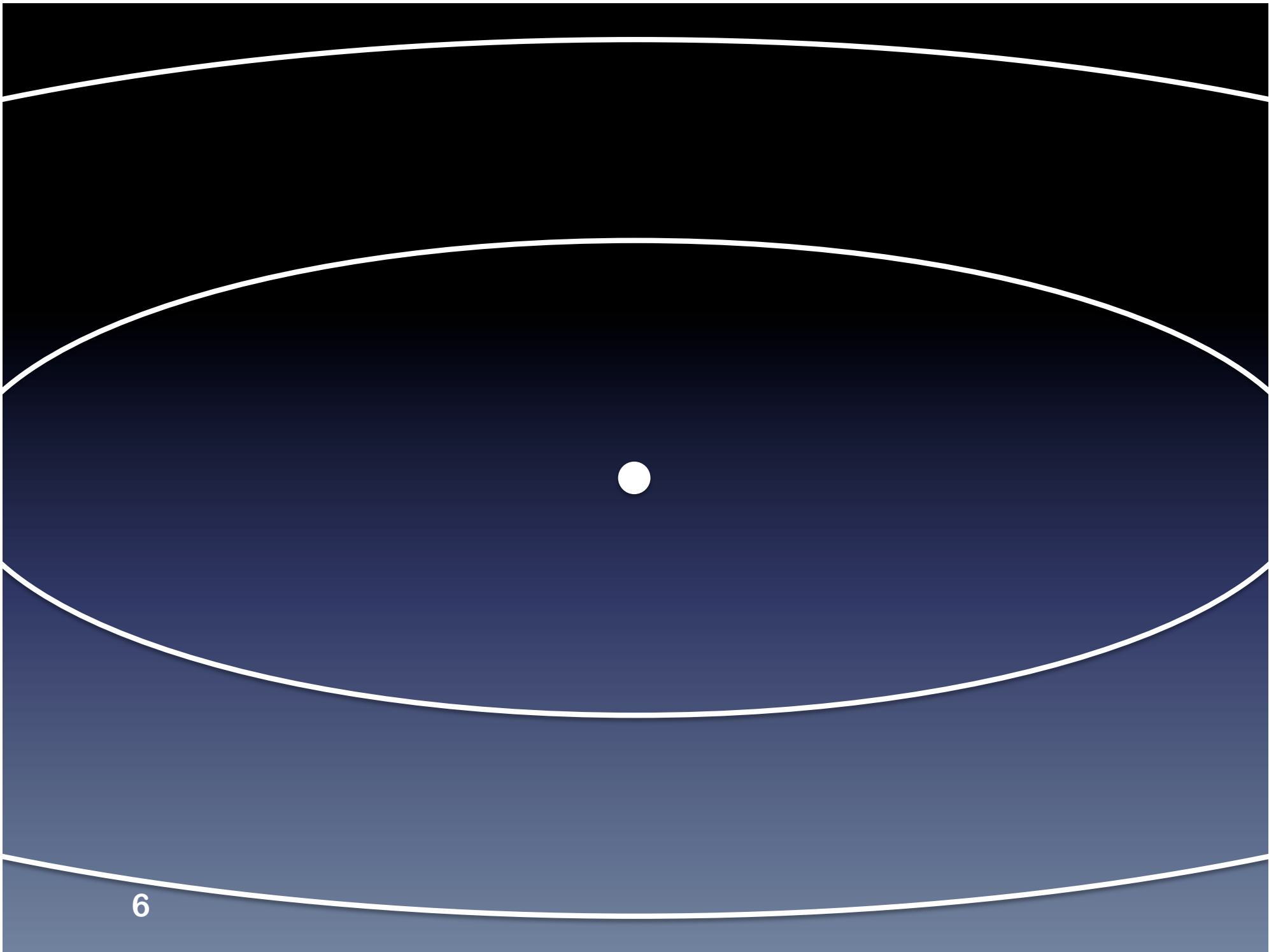




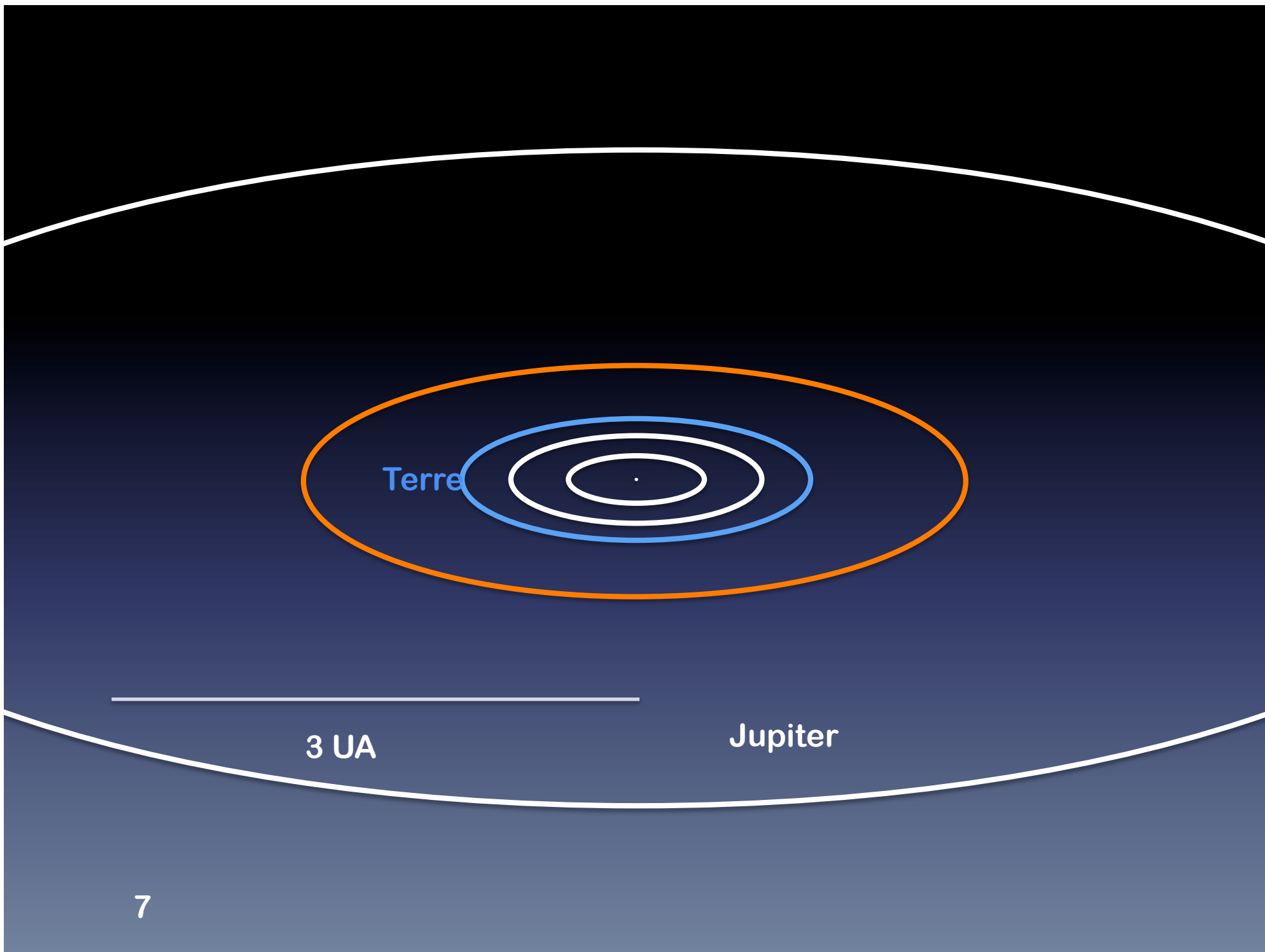




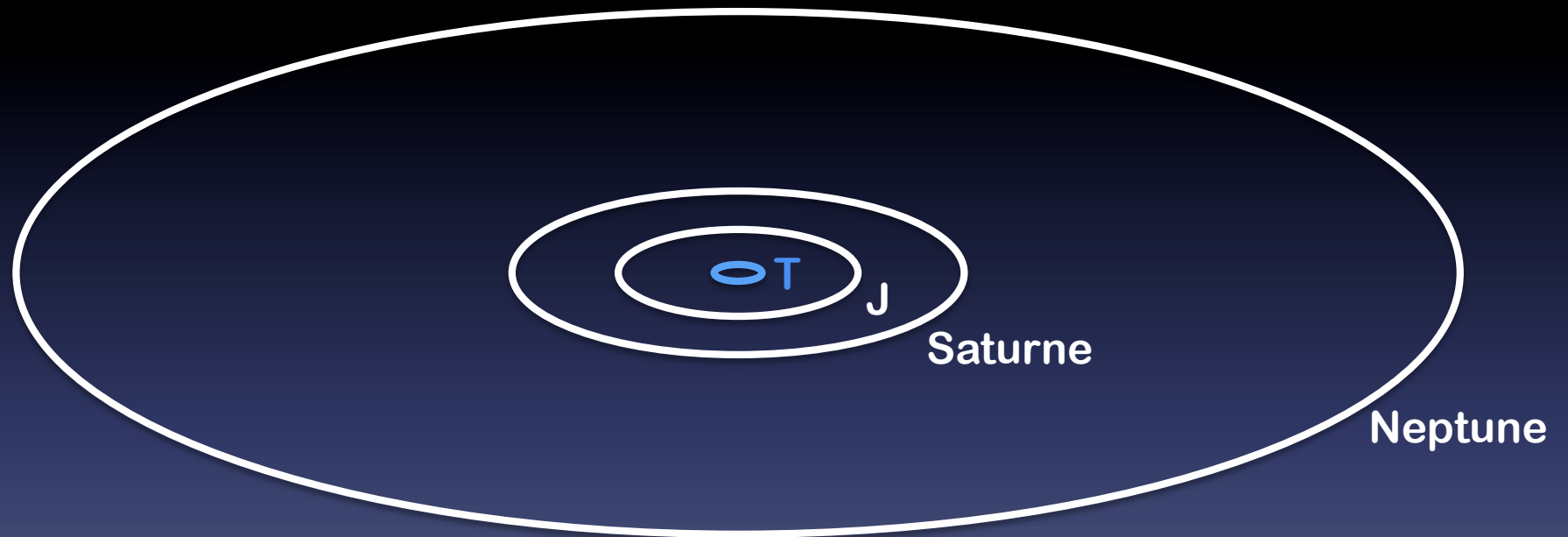




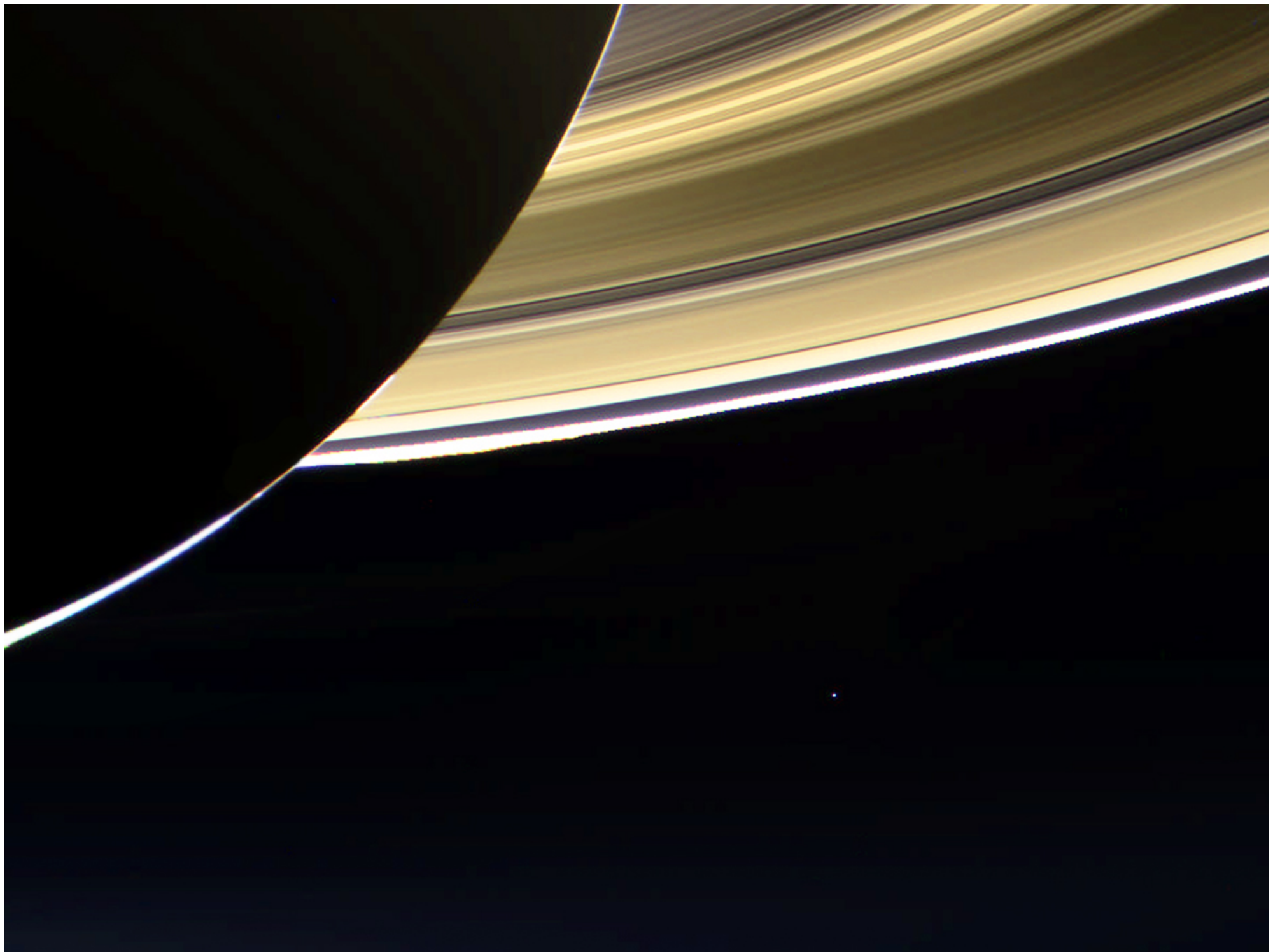
6

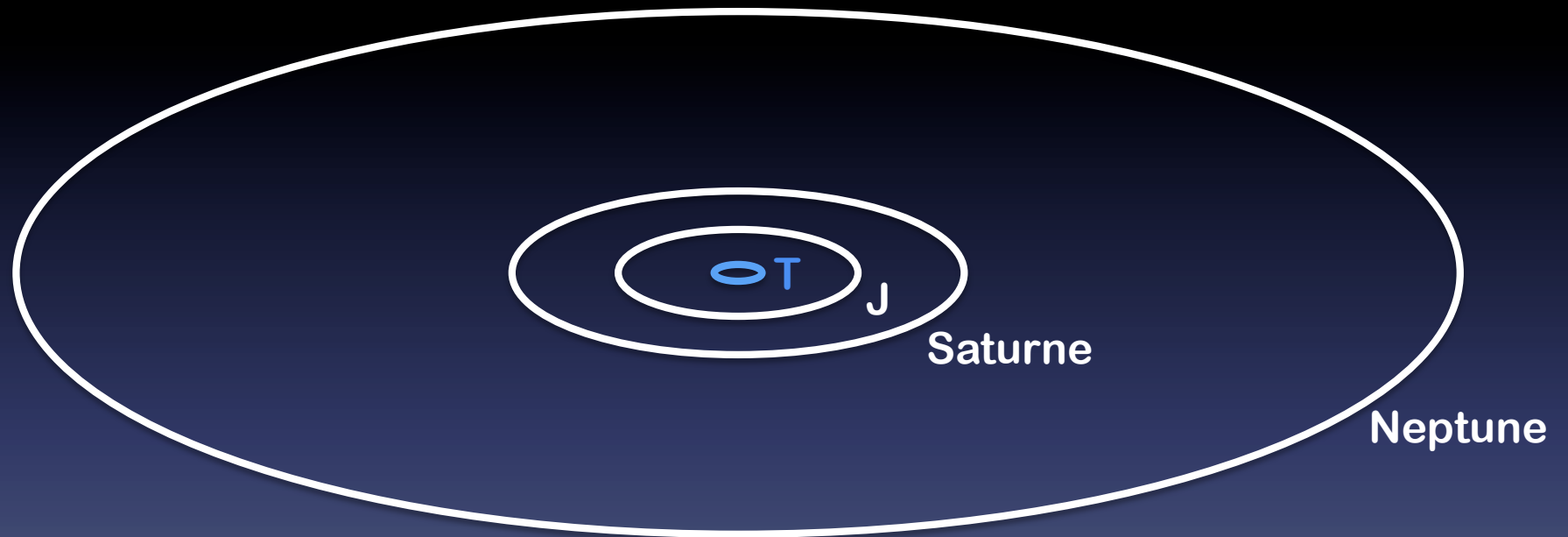






30 UA





30 UA



300 UA



3000 UA



30 000 UA

Proxima  
du  
Centaure



300 000 UA

# parsec ou année-lumière ?

L'année-lumière, c'est embarquer sur un photon

1 UA = 8 min-lumière

Mars = entre 4 et 20 min-l, Neptune = 4h-l

Proxima du Centaure = 4,2 a-l

Le parsec, distance pour la parallaxe de 1'' d'arc

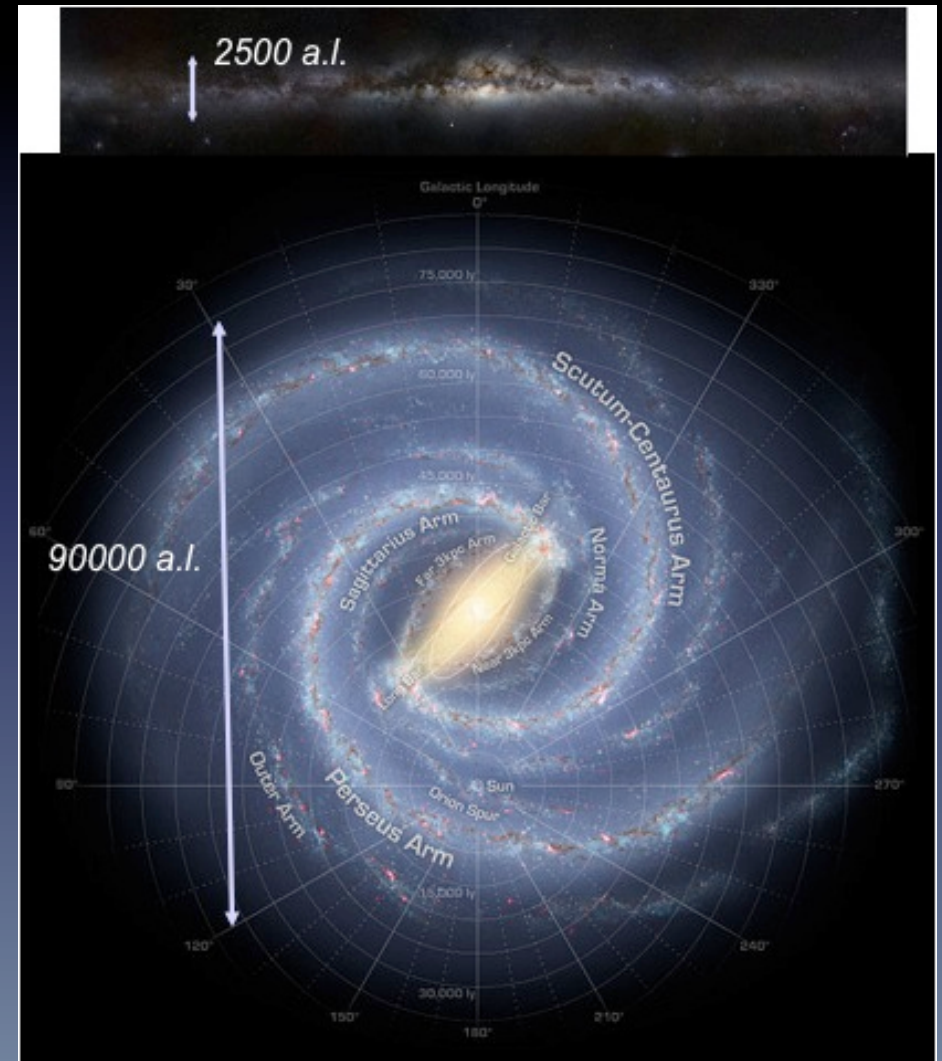
ex : parallaxe de 0,5'' => 2 parsec



# Notre galaxie

Nous sommes à 27 000 a.l.  
ou 8,5 kpc du centre de la  
Galaxie, qui contient  
~ 200 milliards d'étoiles

Gaia mesure la parallaxe  
de 1 milliard d'étoiles  
Précision  $24 \mu\text{-arcsec}$   
distance jusqu'à 10 kpc



The image is split into two parts. The left part shows the Gaia satellite in space, with its large solar panels and central instrument housing, set against a background of the Milky Way galaxy. The right part shows a wide-field view of the Milky Way galaxy, illustrating the vast area of the sky that Gaia surveys.

# Gaia

Gaia mesure la parallaxe de 1 milliard d'étoiles

Précision  $24 \mu\text{-arcsec}$  :

~ la taille d'une clémentine sur la Lune

mesure de distances jusqu'à 10 kpc

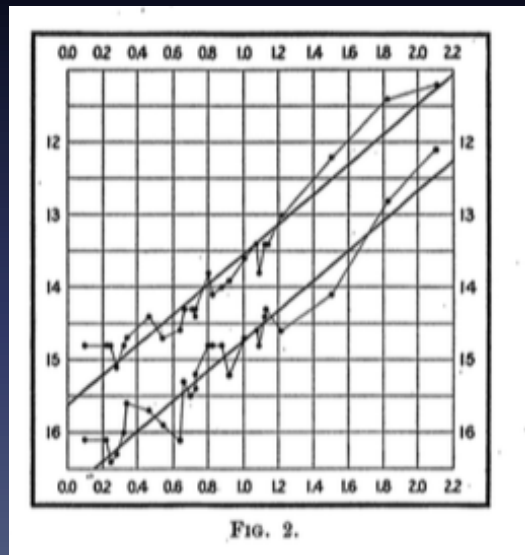
On reste à l'intérieur de notre Galaxie

# Les distances cosmologiques et l'expansion de l'univers

14h10

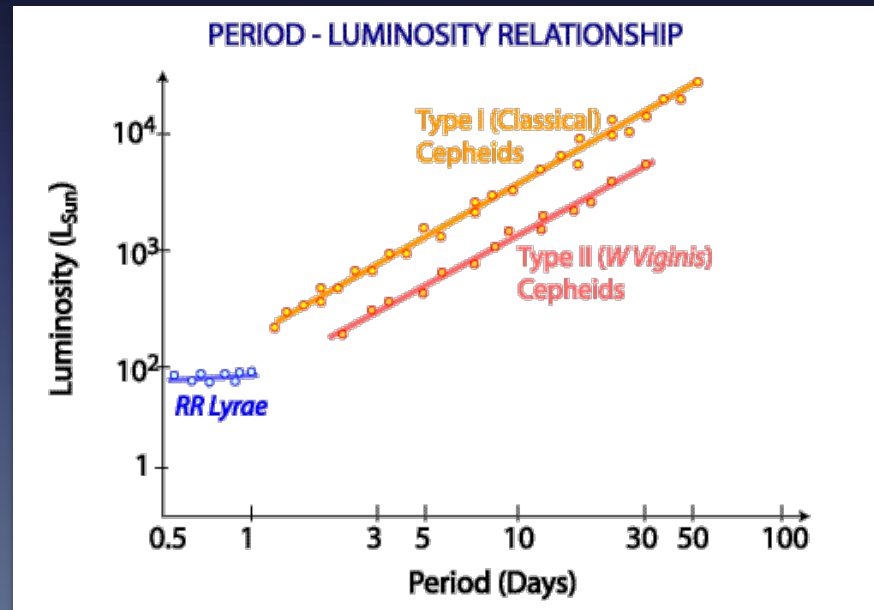
# La découverte de Henrietta Leavitt

Les variables Céphéides du petit Nuage de Magellan



(Leavitt, 1912)

suivent une loi simple



⇒ si on mesure la période, on connaît la luminosité

# La distance des galaxies

En 1924, Hubble mesure la période d'une Céphéide dans la nébuleuse d'Andromède : 300 kpc (~800 kpc)  
=> c'est une autre galaxie que la nôtre !

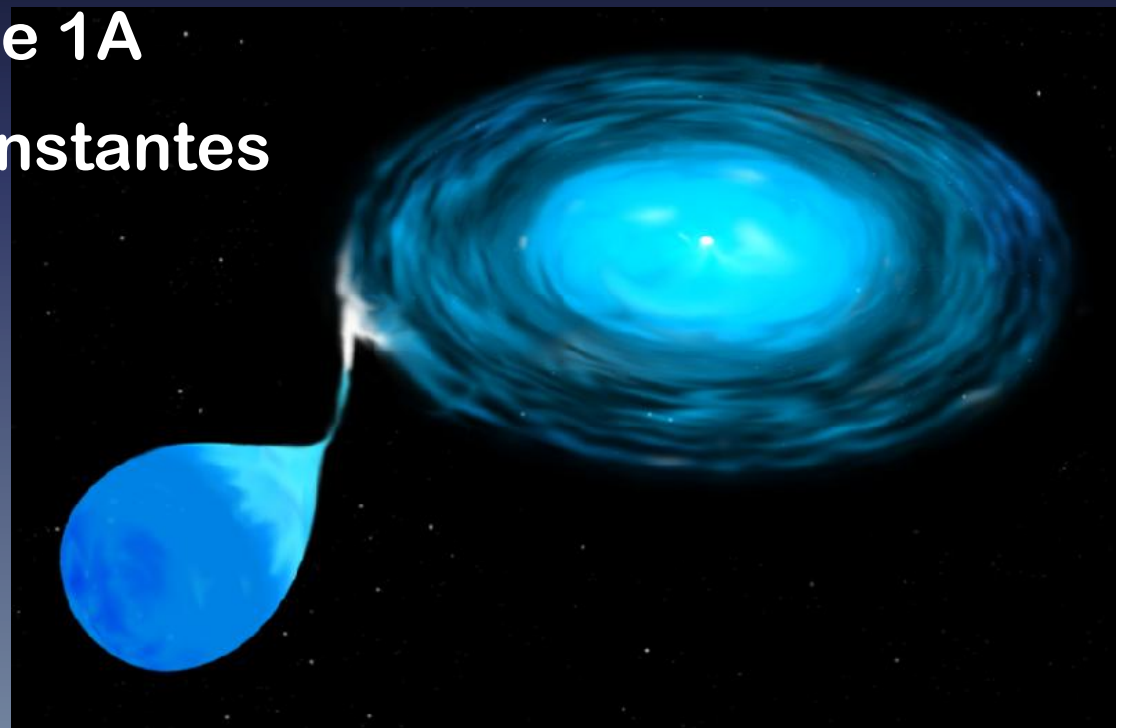
# Comment aller plus loin ?

Les Céphéides conviennent pour les galaxies proches. Il faut une source plus brillante.

les supernovae de type 1A

⇒ très brillantes et constantes

La mesure du flux de lumière donne la distance



# Une explosion de SN 1a

~ 1 explosion par siècle, par galaxie



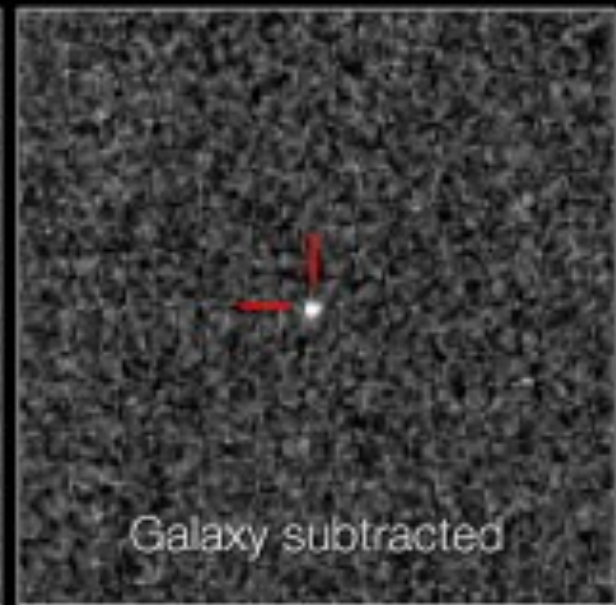
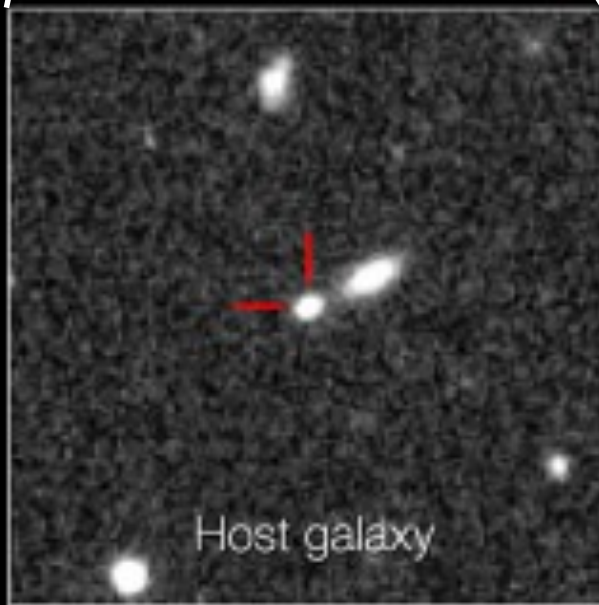
# La plus distante SN 1a

Une lumière qui a voyagé 10 milliards d'années





# La plus distante SN 1a



# Encore plus loin (dans le temps) ?

Si on veut voir plus loin, à cause de  $c = 0,3 \text{ pc / an}$ ,  
on voit des sources anciennes

loin = signal ténu

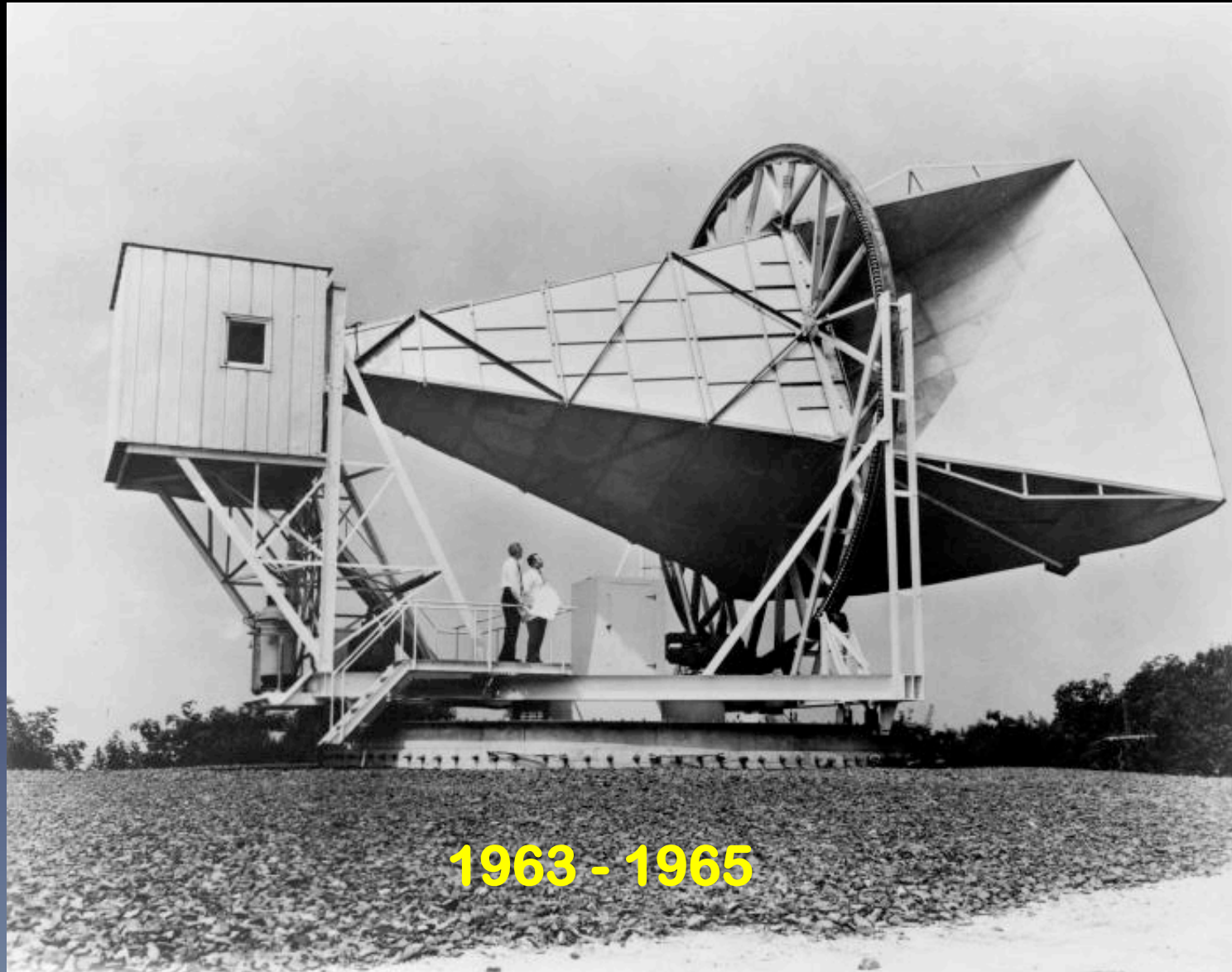
⇒ source très intense indispensable : l'Univers lui-même

loin = ancien

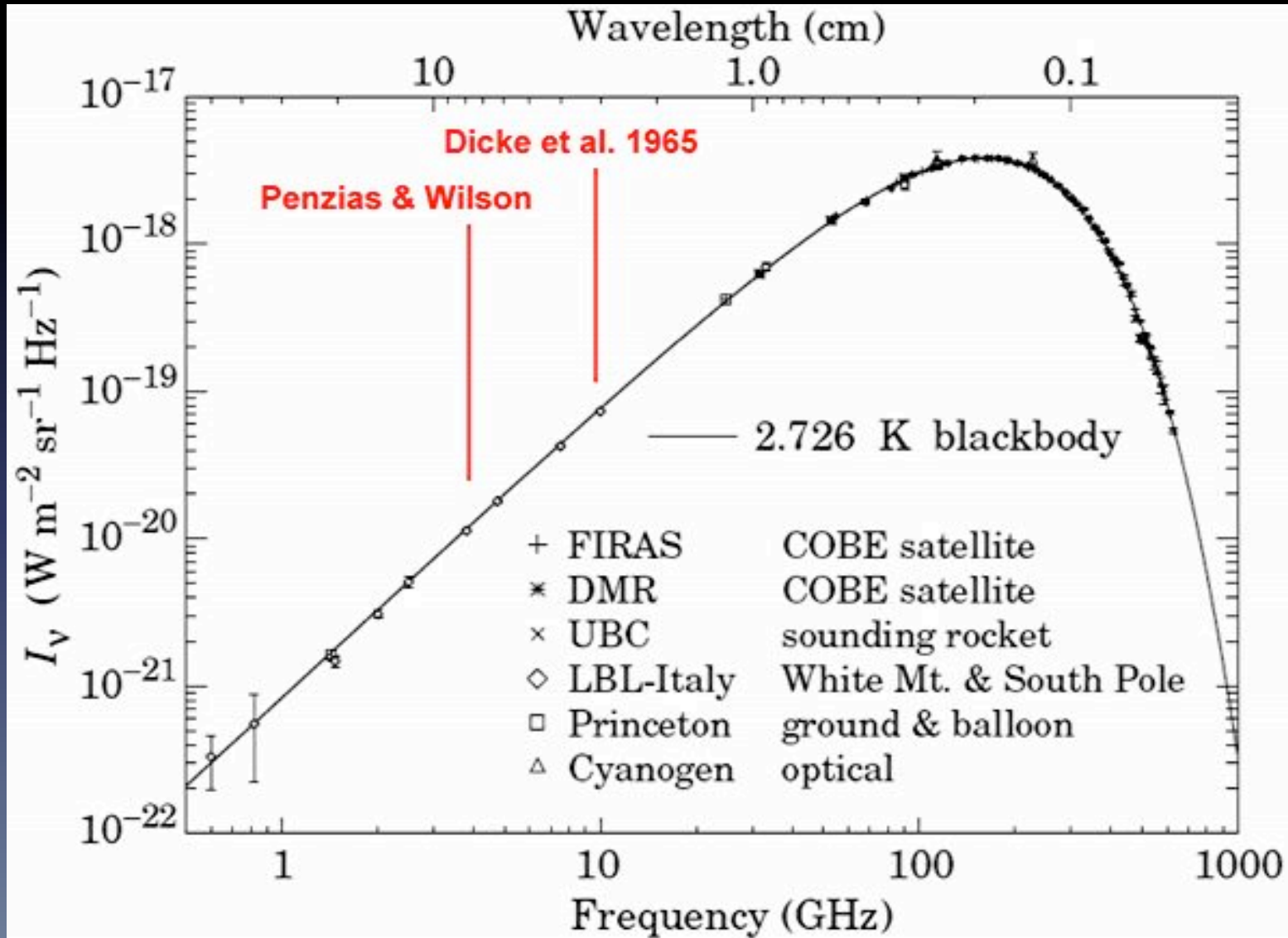
⇒ expansion de l'univers durant le trajet

⇒ signal décalé vers le rouge, puis IR, puis radio

# Penzias et Wilson



# COBE



# Que doit-on comprendre ?

Cela a bien un sens de considérer l'Univers comme un objet d'étude puisque un paramètre clé,  $T$  est homogène.

Toutes les parties de l'Univers ont été connectées à une période.

# Que doit-on comprendre ?

Cela a bien un sens de considérer l'Univers comme un objet d'étude puisque un paramètre clé,  $T$  est homogène.

Toutes les parties de l'Univers ont été connectées à une période.

La cosmologie n'est pas un délire ! OUF !

# Encore plus loin (dans le temps) !

## **Le bruit de fond cosmologique à 2,7 K**

Le BdFC est le résidu d'un rayonnement émis par l'Univers lorsqu'il était dans une phase très chaude et dense

Prédit par Lemaître dans les années 1920,

Puis par Gamow, Alpher et Herman dans les années 1950.

Emis par l'univers tout entier, 380 000 ans après le Big Bang

Aujourd'hui, refroidi 1100 x par l'expansion de l'Univers.

Petite pause  
de 14h25 à 14h35



# Le diagramme de Hubble

14h35

# Que veut-on mesurer ?

**des distances** : jusqu'où peut-on aller avec les SN Ia ?

$M = -19,3$  (à 10 pc)

$m \sim 23$  limite de LSST pour avoir de bonnes mesures de flux

# Que veut-on mesurer ?

**des distances** : jusqu'où peut-on aller avec les SN Ia ?

$$M = -19,3 \text{ (à } 10 \text{ pc)}$$

$m \sim 23$  limite de LSST pour avoir de bonnes mesures de flux

$$m - M \sim 42$$

Tous les 5, on s'éloigne d'un facteur 10

$$\Rightarrow 10^{42/5} = 3 \cdot 10^8 \times 10 \text{ pc} = 3 \text{ Gpc}$$

# Que veut-on mesurer ?

**des distances** : jusqu'où peut-on aller avec les SN Ia ?

$M = -19,3$  (à 10 pc)

$m \sim 23$  limite de LSST pour avoir de bonnes mesures de flux

$m - M \sim 42$

Tous les 5, on s'éloigne d'un facteur 10

$\Rightarrow 10^{42/5} = 3 \cdot 10^8 \times 10 \text{ pc} = 3 \text{ Gpc}$

**des redshifts** :  $z=1 \Rightarrow \lambda' = \lambda \times (1 + z) = 2 \lambda$

proche UV  $\rightarrow$  rouge,                      vert                       $\rightarrow$  proche IR

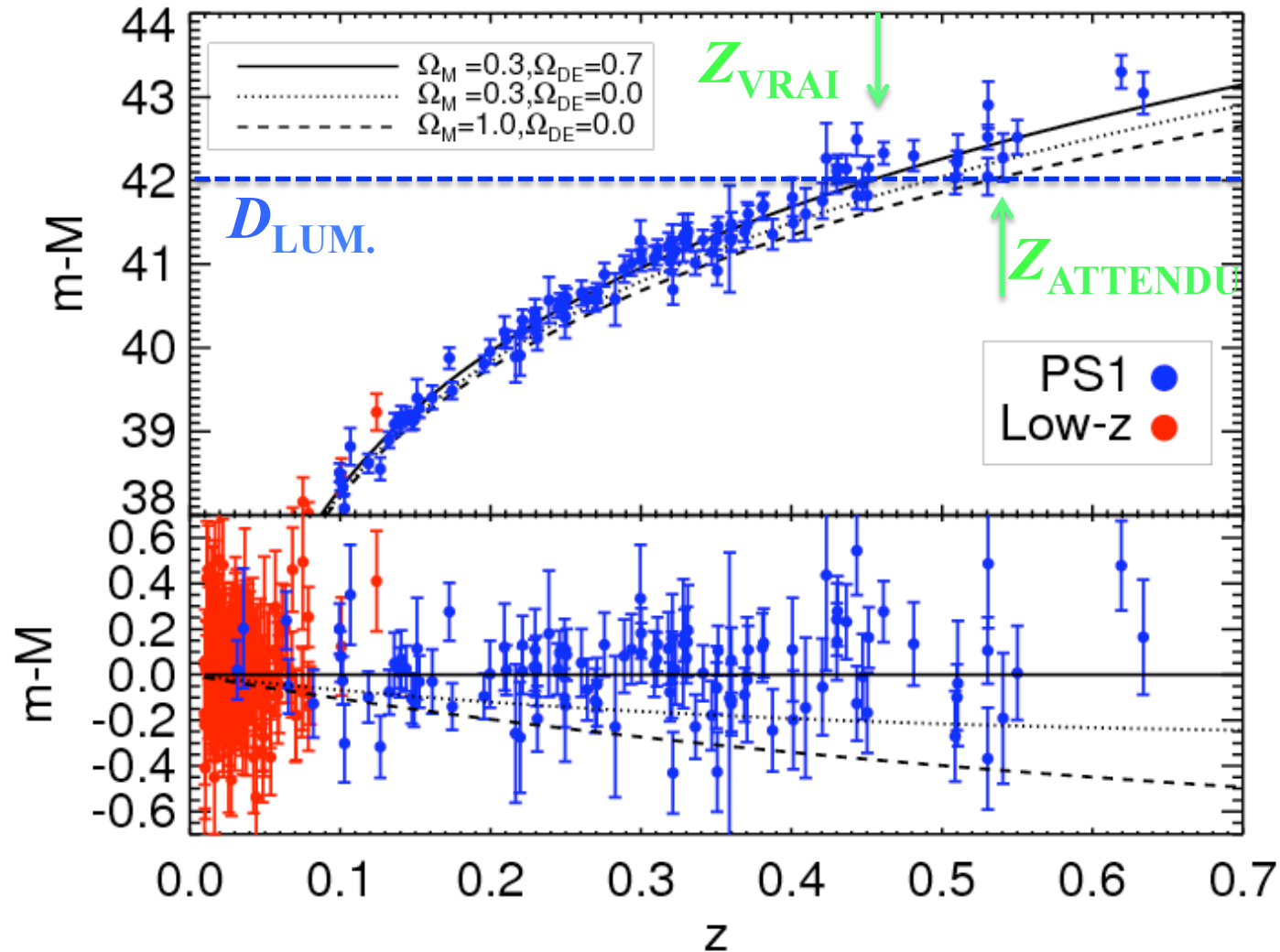
350 nm

700 nm

530 nm

1060 nm

# Que nous dit le diagramme de Hubble ?



# The Large Synoptic Survey Telescope

14h45

# Le Large Synoptic Survey Telescope

- en cours de construction au Chili =>2021
- une caméra de 3,2 milliards de pixels
- mesurera des dizaines de milliers de SN pour comprendre la dynamique de l'expansion de l'Univers



# Le Large Synoptic Survey Telescope

Un télescope c'est avant tout fait pour :



# Le Large Synoptic Survey Telescope

Un télescope c'est avant tout fait pour :

capturer/concentrer de la lumière

⇒ voir des objets ténus (lointains quand on fait de la cosmologie)

On veut la bête curieuse qui :

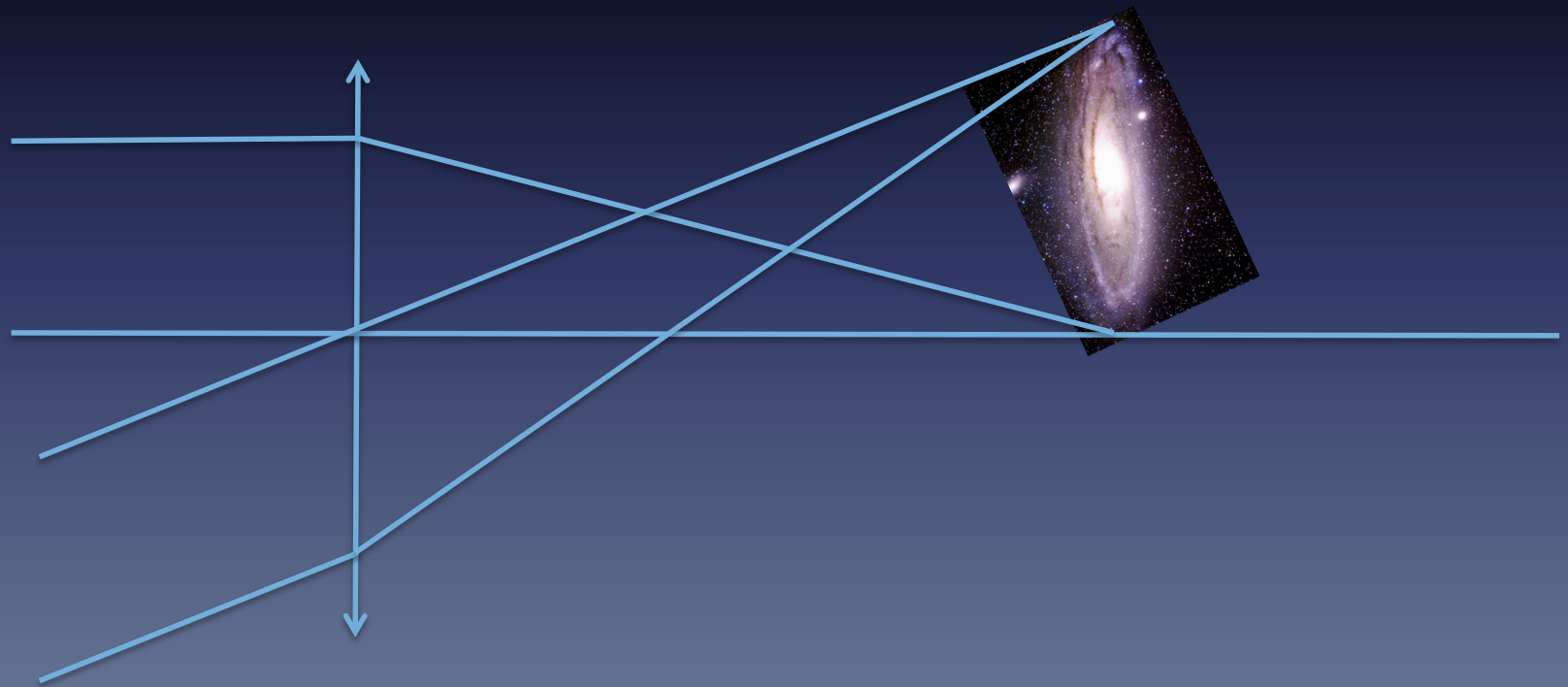
est grosse (grand diamètre)

bouge vite

prend des grandes photos du ciel

# Le Large Synoptic Survey Telescope

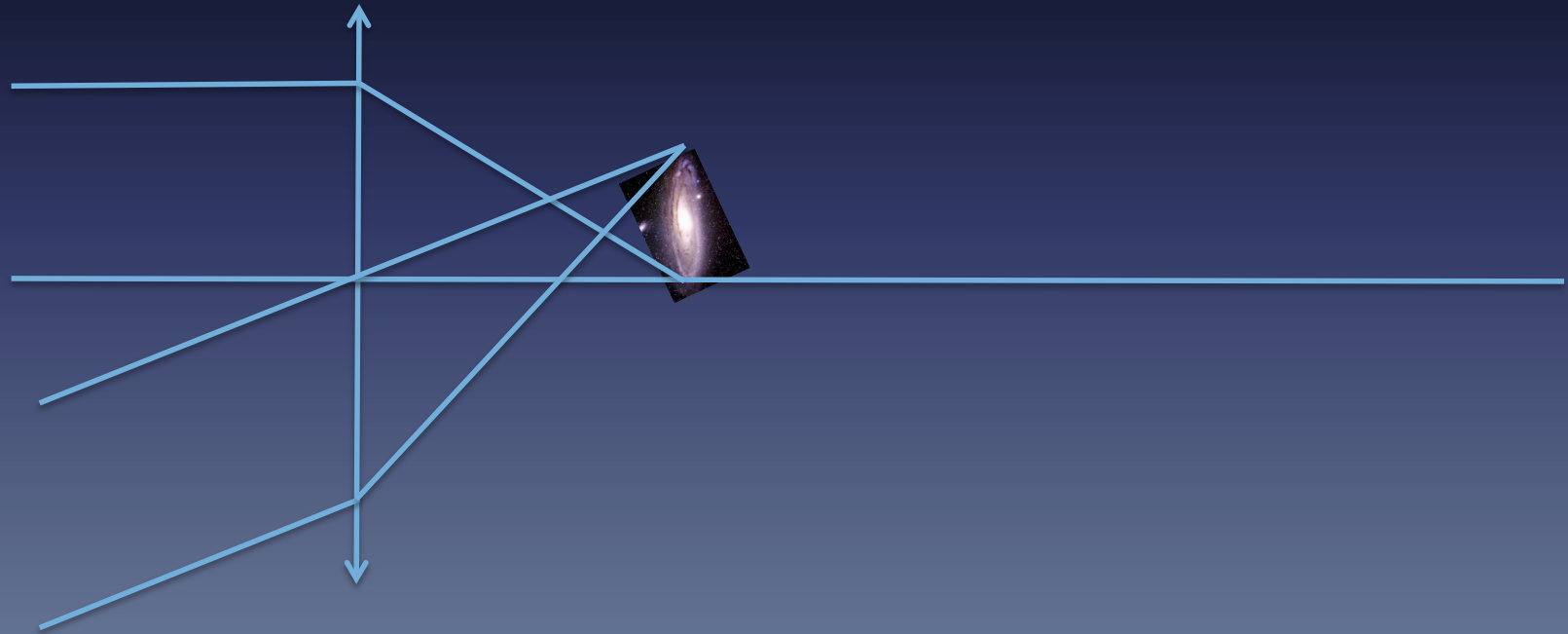
Un peu d'optique géométrique : large image => caméra impossible



# Le Large Synoptic Survey Telescope

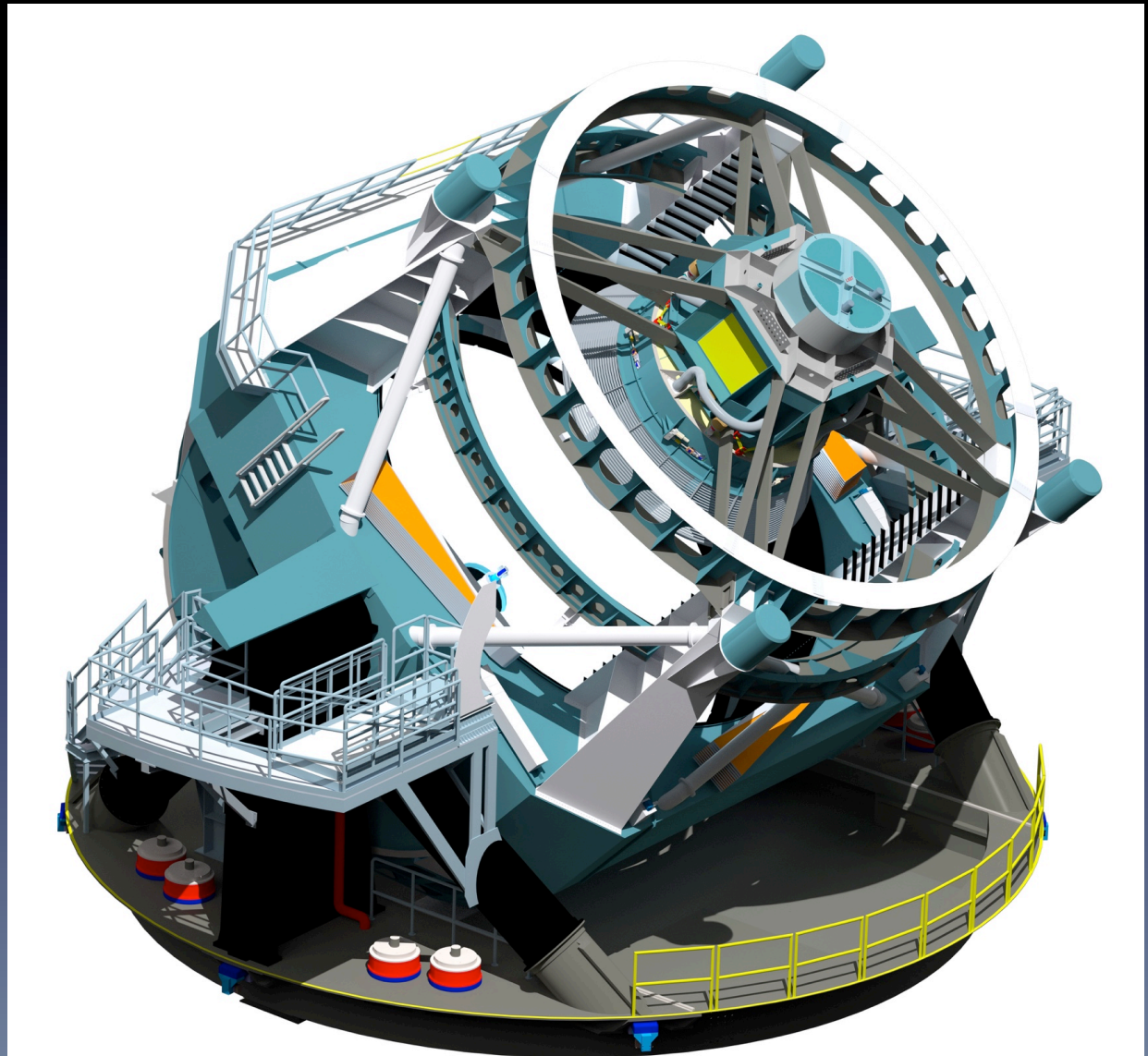
Un peu d'optique géométrique : focale courte => petite image

Il faut un télescope court (focale courte), très ramassé



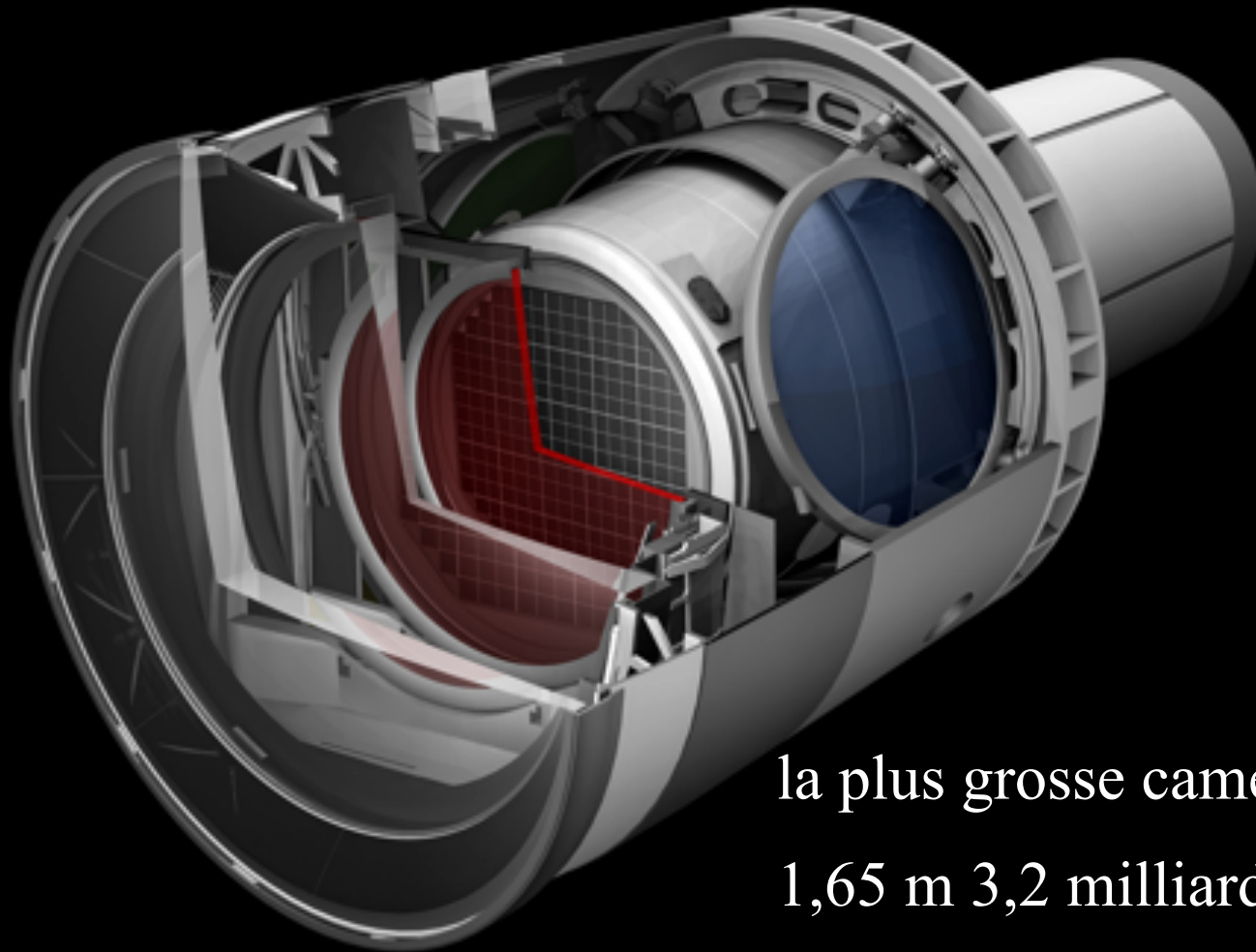
# Le Large Synoptic Survey Telescope

En plus, compact,  
il pourra tourner  
(pointer) vite





# Le Large Synoptic Survey Telescope



la plus grosse caméra du monde :  
1,65 m 3,2 milliards de pixel

La chance que vous avez  
d'arriver maintenant !

15 h

# Conclusion

La mesure des distances dans l'Univers reste un sujet d'actualité

Les techniques employées ont des principes simples

L'expansion accélérée de l'Univers est un mystère