



Planck.

© ESA-CNES-ARIANESPACE / OPTIQUE VIDÉO DU CSG

Le télescope / Plus loin dans l'espace, plus loin dans le temps

LILIANE FEUILLERAC POUR LE CNES

De Galilée et sa lunette astronomique à Prisma, mission technologique de vol en formation qui va faire faire un saut majeur aux télescopes de demain, le chemin de l'astronomie est parsemé de recherches, d'hésitations, d'expérimentations et d'espoirs. L'objectif est pourtant toujours le même: observer les étoiles et les galaxies les plus éloignées et se rapprocher des origines de l'Univers. Et, depuis cinq siècles, le télescope ou les technologies dérivées s'adossent à des paramètres d'optique ou de physique récurrents: focale, grossissement, pouvoir séparateur, champ de vue, surface collectrice... autant de paramètres incontournables qui, aujourd'hui encore, entrent comme supports dans les programmes d'enseignement. En classe de terminale, ces notions sont inscrites dans l'enseignement de spécialité, via le télescope de Newton. En première, les lycéens sont amenés à aborder le principe optique des lentilles. En seconde, les thèmes d'observation de l'Univers sont intéressants pour ouvrir un large champ sur la documentation scientifique et technique, notamment sur les télescopes.

Telescopes - Deeper into space, further back in time

LILIANE FEUILLERAC FOR CNES

The path from Galileo's astronomical telescope to the PRISMA formation-flying demonstration mission, now set to enable a giant leap forward in telescope technologies, has been paved by plenty of research, hopes and trial and error. But the goal today remains the same: to observe the most distant stars and galaxies, and to peer back into the early Universe. And for the last five centuries, telescopes and derived technologies have all been based on the same optical and physical parameters: focal length, magnification, resolving power, field of view, light-collecting area and so on—all fundamental concepts that are still a key feature of school curricula today. In 12th grade, they are taught as part of special options, focusing on Newton's reflecting telescope. In 11th grade, pupils study the optical principle of lenses. And in 10th grade, topics related to observation of the Universe offer many opportunities to investigate scientific and technical documentation, notably on telescopes.

Après 2 ans de parution, dites-nous ce que vous pensez de **CNES MAG** *éduc*

Two years after the first issue of CNESMAG Educ, we'd like to know what you think

Un questionnaire est à votre disposition sur :

Complete the questionnaire at: <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/7683-cneseduc.php>



Portrait Profile
Jean-Michel Le Duigou
> P. 4

www.cnes.fr

www.cnes.fr/enseignants-et-mediateurs/

LE TÉLESCOPE, COMMENT ÇA MARCHE ?



Quels sont les éléments qui influent sur le grossissement ?

Le grossissement est le rapport entre l'angle apparent à travers l'instrument et l'angle en observation directe. Pour un télescope de Newton tel qu'abordé en classe de terminale, il dépend du rapport entre la focale du miroir et celle de l'objectif. Par ailleurs, le diamètre du miroir principal est déterminant pour calculer d'autres propriétés importantes comme la résolution angulaire, la sensibilité, le champ de vue. Plus il est grand, plus on capte d'informations lumineuses, plus on peut voir des objets faibles ou lointains et des détails de plus en plus petits (hors limitations par d'autres facteurs). Ce miroir principal est souvent constitué d'une seule pièce. Mais, pour en augmenter le diamètre, on est parfois amené à le réaliser en plusieurs morceaux: assemblage de pétales, miroir déployable, ensemble de petits miroirs séparés combinant leur lumière et simulant un grand miroir.

© CNES/ST-JALBY

Corot.

Qu'est-ce qui rend les étoiles plus visibles avec un télescope ?

Le plus important pour observer une étoile, c'est de capter la lumière qu'elle émet. Depuis Galilée et sa première lunette, les astrophysiciens n'ont eu de cesse d'augmenter la capacité des instruments à capter cette lumière. Le télescope comporte donc un « objectif » qui est un miroir convergent parabolique ou hyperbolique, appelé « miroir primaire ». Ce miroir concentre la lumière de l'astre ou de la zone observée sur un point appelé « foyer primaire ou foyer image de l'objectif ». La distance entre le sommet du miroir et ce foyer est appelée « focale ». Le faisceau obtenu peut être renvoyé vers un oculaire à l'aide d'un second miroir. Cet oculaire est une loupe performante qui fournit une image nette de l'objet éloigné. Sur les télescopes scientifiques actuels, les oculaires sont remplacés par des capteurs numériques ou une instrumentation spécifique (spectrophotomètre). Les oculaires ne sont utilisés que par les astronomes amateurs pour s'initier à l'astronomie.

Les télescopes vont-ils continuer à évoluer ?

Pour améliorer le pouvoir de résolution, l'interférométrie a été introduite, en s'appuyant sur les interférences d'ondes électromagnétiques (comme la lumière). D'autres recherches ont été menées pour optimiser les technologies de fabrication, des miroirs notamment. Pour sa part, le télescope spatial est un moyen de reproduire les performances du télescope terrestre en éliminant les contraintes liées à l'atmosphère terrestre: turbulences atmosphériques, absorption de certaines plages du spectre lumineux... En cours d'expérimentation, le vol en formation constitue un saut technologique. Il consiste à embarquer un télescope « par morceaux » à bord de plusieurs satellites pour augmenter, virtuellement, son diamètre ou sa focale. Complexe, cette technique impose de grandes contraintes. Il faut notamment que ces satellites soient précisément positionnés (et maintenus entre eux) par rapport à l'objet à observer, dans une configuration étudiée. La stabilité de l'ensemble doit être absolument garantie. Le vol en formation fait appel à des applications drastiques de métrologie et de positionnement relatif.

How telescopes work

How does a telescope make stars easier to see?

The most important thing of all when observing a star is to collect the light from it. Ever since Galileo's first telescope, astrophysicists have constantly sought to increase the ability of instruments to capture this light. A telescope has an objective lens, in fact a converging parabolic or hyperbolic mirror, called the primary mirror. This mirror concentrates the light from the star or zone observed at a point called the primary focus. The distance from the top of the mirror to this focus is called the focal length. The beam obtained can be directed toward an eyepiece using a second mirror. The eyepiece is a really good magnifying glass that produces a sharp image of the distant object. In

today's science telescopes, eyepieces have been replaced by digital sensors or a special instrument like a spectrophotometer. They are now only used by beginner amateur astronomers.

What factors affect the magnification?

The magnification is the ratio between the apparent angle through the instrument and the directly observed angle. In a Newtonian reflecting telescope like that studied in 12th grade, it depends on the ratio between the focal length of the mirror and that of the objective. The aperture of the main mirror is a key parameter for calculating other important properties like angular resolution, sensitivity and field of view. The larger the mirror is, the more light it collects and the easier it is to see faint

or distant objects and increasingly small features (other limiting factors notwithstanding). The primary mirror is often in a single piece. But to increase the aperture, it is sometimes made in several pieces, for example as an assembly of petals, a deployable mirror or an array of small, separate mirrors combining their light to simulate a large mirror.

Will telescopes continue to evolve?

To increase resolving power, the technique of interferometry is now used. This takes advantage of the interference patterns generated when electromagnetic waves like light are superimposed. Other research has been pursued to optimize fabrication technologies, notably for mirrors. Space

telescopes are able to replicate the performance of ground telescopes, only without the constraints imposed by Earth's atmosphere, such as turbulence and absorption of certain parts of the light spectrum. Formation flying is currently being tested out and would be a technological leap. The concept involves flying a telescope "in pieces" on several satellites to increase its aperture or focal length virtually. This complex technique also imposes big constraints. In particular, the satellites need to be precisely positioned relative to one another and to the object to be observed, in a preset configuration. The stability of the whole also has to be ensured. For these reasons, formation flying calls for extreme precision in metrology and relative positioning.

EXERCICE 1

ÉTUDE D'UN TÉLESCOPE TERRESTRE D'AMATEUR

Voici les caractéristiques d'un simple télescope terrestre d'amateur.

Diamètre de l'objectif : $D_1 = 114$ mm

Distance focale de l'objectif $f'_1 = 1000$ mm

Accessoires fournis : oculaire MA 25 distance focale $f'_2 = 25$ mm ; oculaire MA 9 distance focale $f'_3 = 9$ mm

Sachant que le grossissement G d'un télescope afocal est donné par la relation :

$$G = \frac{\text{distance focale de l'objectif}}{\text{distance focale de l'oculaire}}$$

1. Lequel des deux oculaires fournis faut-il choisir pour avoir le plus grand grossissement, noté G_1 ? Quelle en serait la valeur ?

Un des projets de vol en formation est de construire un télescope spatial à partir de 2 satellites : le premier jouerait le rôle de miroir primaire, le deuxième celui de détecteur de lumière. Les distances entre les deux représentent approximativement la distance focale de l'objectif. La distance entre les satellites pourrait être de 20 m.

2. Quel serait le nouveau grossissement maximal, noté G_2 , si le télescope terrestre était équipé d'un objectif de même distance focale que ce télescope spatial ?

3. Pourquoi utiliserait-on deux satellites au lieu d'un seul ?

Le grossissement d'un télescope peut aussi s'écrire :

$$G = \frac{\text{diamètre apparent de l'objet à travers le télescope}}{\text{diamètre apparent de l'objet à l'œil nu}} = \frac{\theta'}{\theta}$$

4. Calculer le diamètre apparent θ (en radian) d'un détail géologique de diamètre $d = 2,1$ km à la surface de la Lune, sachant que la distance qui sépare l'observateur de ce détail observé est estimée à $D = 3,8 \cdot 10^5$ km.

5. Calculer le diamètre apparent θ' du détail géologique observé à travers le télescope terrestre si on utilise l'oculaire de distance focale $f'_3 = 9$ mm.

6. Quel serait-il si on utilisait un télescope de caractéristique comparable au télescope spatial de vol en formation ? Conclure.

Correction :

1. $f'_2 = 9$ mm ; $G_1 \sim 111$

2. $G_2 \sim 2222$ soit environ 20 fois plus important !

3. Un seul télescope devrait faire 20 m de longueur : difficile à transporter dans la coiffe d'une fusée, même en le rendant télescopique.

4. $\tan \theta \sim \theta$ donc $\theta = 2,1/3,8 \cdot 10^5 = 5,5 \cdot 10^{-6}$ rad

5. $\theta'_1 = G_1 \cdot \theta = 111 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 6,1 \cdot 10^{-4}$ rad

6. $\theta'_2 = G_2 \cdot \theta = 2222 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 1,2 \cdot 10^{-2}$ rad.

Les images obtenues seraient plus précises.

Study of an amateur ground telescope

Here are the features of a simple amateur ground telescope:

Objective lens aperture $D_1 = 114$ mm

Focal length of objective lens $f'_1 = 1,000$ mm

Accessories: 25X eyepiece with focal length $f'_2 = 25$ mm

9X eyepiece with focal length $f'_3 = 9$ mm

Given that the magnification M of an afocal telescope is given by the relation:

$$M = \frac{\text{focal length of objective}}{\text{focal length of eyepiece}}$$

1. Which of the two eyepieces above would you need to obtain the highest magnification, noted M_1 ? What would be the value of M_1 ?

One type of formation-flying project seeks to construct a space telescope using two satellites, the first acting as the primary mirror and the second as the light detector. The distance between the two satellites would be about the same as the focal length of the objective lens. This distance could be 20 metres.

2. What would be the new highest magnification, noted M_2 , if the ground telescope above had an objective lens with the same focal length as this space telescope?

3. Why would this project require two satellites rather than just one?

The magnification of a telescope can also be written:

$$M = \frac{\text{apparent diameter of object through telescope}}{\text{apparent diameter of object with naked eye}} = \frac{\theta'}{\theta}$$

4. Calculate the apparent diameter θ (in radians) of a geologic feature with an actual diameter $d = 2.1$ km on the surface of the Moon, observed from an estimated distance $D = 3.8 \cdot 10^5$ km.

5. Calculate the apparent diameter θ' of a geologic feature observed through the ground telescope using the eyepiece with a focal length of $f'_3 = 9$ mm.

6. What would this diameter be if we used a telescope with features similar to the formation-flying space telescope? What do you conclude from your answer?

Answers:

1- $f'_2 = 9$ mm; $M_1 \sim 111$

2- $M_2 \sim 2,222$, about 20 times more!

3- A single telescope would need to be 20 metres long and would be difficult to fit inside the fairing of a launcher, even if it was telescopic.

4- $\tan \theta \sim \theta$, therefore $\theta = 2,1/3,8 \cdot 10^5 = 5,5 \cdot 10^{-6}$ rad

5- $\theta'_1 = M_1 \cdot \theta = 111 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 6,1 \cdot 10^{-4}$ rad

6- $\theta'_2 = M_2 \cdot \theta = 2,222 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 1,2 \cdot 10^{-2}$ rad.

The images obtained would be sharper.

EXERCICE 2

UN TÉLESCOPE, UNE MACHINE À REMONTER LE TEMPS ?!

Le télescope spatial Planck, mis en orbite par Ariane 5 le 14 mai 2009, regarde l'Univers tel qu'il était presque à sa naissance ! L'âge de l'Univers est estimé à 13,7 milliards d'années. Ce dernier est devenu visible lorsque la première lumière est apparue 380 000 ans après sa naissance. Cette lumière, appelée « rayonnement fossile », voyage toujours librement dans l'espace et est ainsi captée par le télescope Planck. Source : <http://public.planck.fr/fonctionnement.php>

1. Regarder « loin », c'est regarder dans le passé :

La lumière se propage à une vitesse finie, soit $c = 299\,792\,458$ m/s dans le vide. Supposons qu'un télescope terrestre pointe vers une galaxie lointaine, comme par exemple la galaxie d'Andromède M31, située à une distance $d = 2,44 \cdot 10^{22}$ m.

1.1. Quelle est la durée, en années, mise par la lumière pour parcourir la distance qui nous sépare de cette galaxie ?

1.2. Lorsque nous observons au travers d'un télescope la galaxie d'Andromède, nous la voyons telle qu'elle était il y a combien de temps ? Justifier l'expression: Regarder « loin », c'est regarder dans le passé.

2. Le télescope Planck, une machine à remonter le temps ?

Pour comprendre les prouesses du télescope Planck, nous allons imaginer que l'âge de l'Univers est de 100 ans ! Dans ce cas, combien de temps après sa naissance les observations du télescope Planck permettraient-elles d'observer l'Univers ?

Correction :

1. Regarder « loin », c'est regarder « tôt » :

1.1. $\Delta t = \frac{d}{c} = \frac{2,44 \cdot 10^{22}}{2,99792458 \cdot 10^8} = 8,14 \cdot 10^{13}$ s, soit environ 2,6 millions d'années !

1.2. Lorsque, aujourd'hui, nous observons cette galaxie, nous l'observons telle qu'elle était il y a 2,6 millions d'années !

2. Le télescope Planck, une machine à remonter le temps ?

De l'âge de l'Univers supposé, $1,37 \cdot 10^{10}$ ans, on arrive à l'observer tel qu'il était 380 000 ans après sa naissance. Par proportionnalité, de l'âge de l'Univers imaginé à 100 ans, on arrive, avec les télescopes actuels, à l'observer tel qu'il était

$$\Delta t = \frac{100 \times 380000}{13,7 \cdot 10^9} = 2,77 \cdot 10^{-3}$$
 ans, soit environ 1 jour après sa naissance !

A telescope as a time machine?!

The Planck space telescope, orbited by Ariane 5 on 14 May 2009, sees the Universe as it was just after it formed. Estimated to be 13.7 billion years old, the Universe became visible when its first light appeared 380,000 years after its birth. This remnant light, called fossil radiation, is still travelling through space, which is why Planck can see it today.

1. To see into the past, we need to see a long way:

Light is propagated at a finite velocity $c = 299,792,458$ metres per second in a vacuum. Assume that a ground telescope is pointed at a distant galaxy, for example Andromeda M31, at a distance $d = 2,44 \cdot 10^{22}$ metres away.

1.1- How long, in years, will it take the light from this galaxy to reach us?
1.2- When we observe the Andromeda M31 galaxy through a telescope, we see it as it was how long ago? Justify the expression 'To see into the past, we need to see a long way'.

2. Is the Planck telescope a time machine?

To understand just how powerful the Planck telescope is, we shall imagine that the Universe is only 100 years old. If this was the case, Planck would allow us to observe the Universe how long after it was formed?

Answers:

1- To see into the past, we need to see a long way:

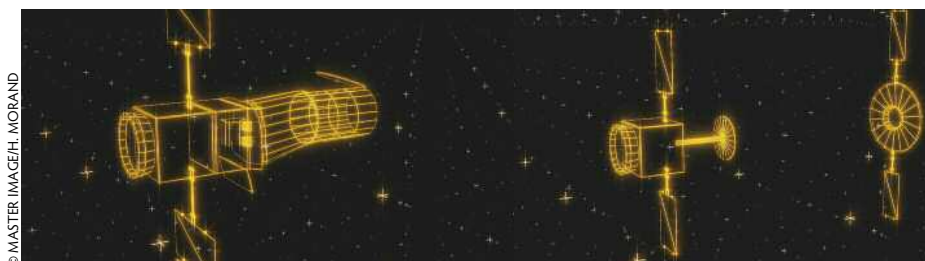
1.1- $\Delta t = \frac{d}{c} = \frac{2,44 \cdot 10^{22}}{2,99792458 \cdot 10^8} = 8,14 \cdot 10^{13}$ s, i.e., approx. 2.6 million years!

1.2- When we observe this galaxy today, we are seeing it as it was 2.6 million years ago.

2- Is the Planck telescope a time machine?

The Universe is believed to be $1,37 \cdot 10^{10}$ years old and we can see back to 380,000 years after its birth. So, proportionally: If we imagine the Universe is 100 years old, with current telescopes we can see it as it was at the age of

$$\Delta t = \frac{100 \times 380000}{13,7 \cdot 10^9} = 2,77 \cdot 10^{-3}$$
 years, i.e., about 1 day after it was born!



Concept d'évolution d'un télescope spatial vers une solution de satellites volant en formation. Concept for transitioning from a space telescope to a formation-flying satellite-based solution.



LE VOL EN FORMATION A MIS EN ŒUVRE DE NOMBREUSES R&T INNOVANTES, EN MÉTROLOGIE, OPTIQUE, ÉLECTRONIQUE, PROPULSION... IL A FÉDÉRÉ PLUSIEURS ORGANISMES "

"This field has exploited many results from innovative R&T in metrology, optics, electronics and propulsion, from a number of organizations."

© CNES/É. GRIMAUD

PROFILE:
JEAN-MICHEL LE DUIGOU
Optical research engineer

When reality meets the imagination

"The atmosphere of the books of Carl Sagan and Hubert Reeves marked my teens and influenced my career choices. They revealed a whole new world to me and reflected my natural penchant for the imaginary," says Jean-Michel Le Duigou, today a research engineer in CNES's optical engineering department.

Jean-Michel Le Duigou was good at most subjects and could have chosen a career outside engineering, but he admits to a natural ability for science and mathematics. At high school, he pursued the usual path to the baccalaureate and wanted to study astrophysics at university, but was advised against it by gloomy career advisers. So he took the entrance exam to ENSICA, the French national aeronautical engineering school, to "get into space". A second-year internship with CNES confirmed his instinct. One year later, with a postgraduate degree in mechanical engineering, Jean-Michel joined CNES's mechanical engineering department. "I worked on research and technology projects focusing on vibrations and micro-vibrations," he says. "It was very stimulating, but after 10 years in the job I needed a new challenge." So he took a year out to devote time to other passions like music and travel. On his return, he studied for a postgraduate degree in astrophysics and then joined CNES's optical engineering department, where he worked on preliminary projects in formation flying and related areas of research. "This field has exploited many results from innovative R&T in metrology, optics, electronics and propulsion, from a number of organizations," says Jean-Michel. And he is rightly proud of being involved in "the *Persée* adventure to build a demonstrator for the *Pégase* mission to characterize the spectra of exoplanets using nulling interferometry techniques."

Quand la réalité rejoint l'imaginaire

« L'atmosphère des ouvrages de Carl Sagan ou d'Hubert Reeves a marqué mon adolescence et influencé mes choix professionnels. Ils m'ont révélé tout un monde et ont rejoint, chez moi, un attrait naturel pour l'imaginaire », dit Jean-Michel Le Duigou, aujourd'hui ingénieur de recherche au service optique du CNES.

Cursus classique

- 1984 - Baccalauréat série S
- 1989 - DEA génie mécanique
- 1990 - Intégration au CNES dans le service mécanique
- 2000 - DEA d'astrophysique
- 2001 - Intégration dans le service technique optique du CNES
- Career path
- 1984 - Baccalaureate, science stream
- 1989 - Postgraduate degree in mechanical engineering
- 1990 - Joins CNES mechanical engineering department
- 2000 - Postgraduate degree in astrophysics
- 2001 - Joins CNES's optical engineering department

Avec de bonnes aptitudes générales et une motivation certaine pour l'étude, Jean-Michel Le Duigou aurait pu embrasser une tout autre filière que l'ingénierie, même s'il confesse une nette prédisposition pour les sciences et les mathématiques. Lycéen, il poursuit la voie classique jusqu'au bac. Il aurait opté pour l'astrophysique à l'université, mais des esprits chagrins lui déconseillent cette filière, jugée « sans débouchés ». Un certain pragmatisme le conduit donc en classes préparatoires, puis à l'Ensica, une manière « d'approcher le spatial », un secteur d'activité qui le fait aussi rêver... En 2^e année, deux mois de stage au CNES confirment son inclination. Un an plus tard, le DEA de génie mécanique en poche, Jean-Michel Le Duigou fait ses premières armes au service mécanique du CNES. « *Vibrations, microvibrations... Pendant dix ans, j'ai pu développer de nombreux projets recherche & technologie (R&T) autour de ces problématiques. C'était très stimulant mais, après dix ans, j'avais fait le tour* », se rappelle Jean-Michel Le Duigou, qui fait alors un break d'un an. Il a d'autres étoiles dans son ciel, d'autres passions dans sa vie: la musique, les voyages... Ressourcé, il revient à son inspiration initiale en préparant un DEA d'astrophysique. De retour au CNES, il intègre le service optique et s'implique dans les avant-projets de vol en formation et la recherche associée: « *Ce domaine a mis en œuvre de nombreuses R&T innovantes, en métrologie, optique, électronique, propulsion... Il a fédéré plusieurs organismes* », précise Jean-Michel Le Duigou, dont la légitime fierté est aussi d'avoir participé « à l'aventure *Persée*, un démonstrateur pour *Pégase*, future mission de caractérisation spectrale des exoplanètes par interférométrie annulante ».

(NDR. Nos remerciements vont à Stéphane Blat et Jean-Paul Castro, professeurs de physique; Michel Vauzelle, professeur chargé de mission auprès du CNES; Dominique Séguéla, Olivier Lamarle, Jean-Michel Le Duigou CNES.) (Editor's note: Our thanks to physics teachers Stéphane Blat and Jean-Paul Castro; Michel Vauzelle, teacher and advisor to CNES; Dominique Séguéla, Olivier Lamarle and Jean-Michel Le Duigou, CNES).