

14 pas vers l'univers

Cours d'astronomie pour les professeurs et les étudiants de troisième cycle de Science.

Réseau pour l'enseignement de l'astronomie à l'école de la NASE
Union astronomique internationale UAI

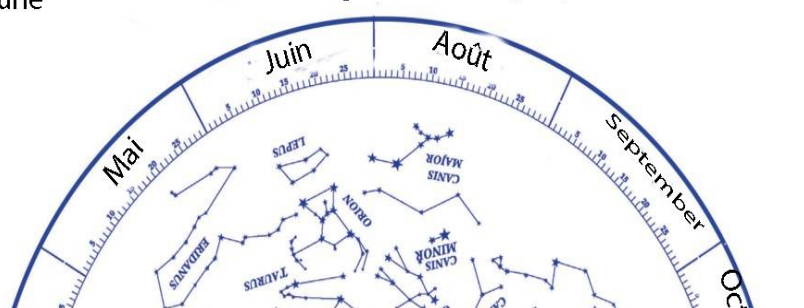
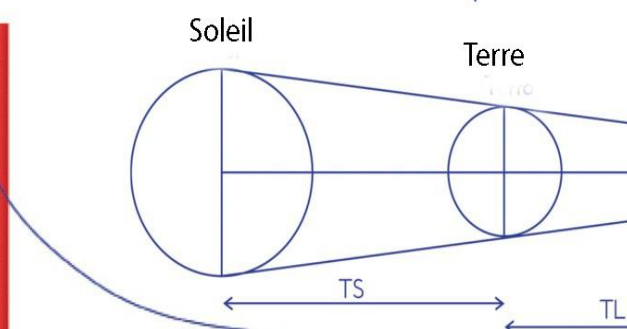
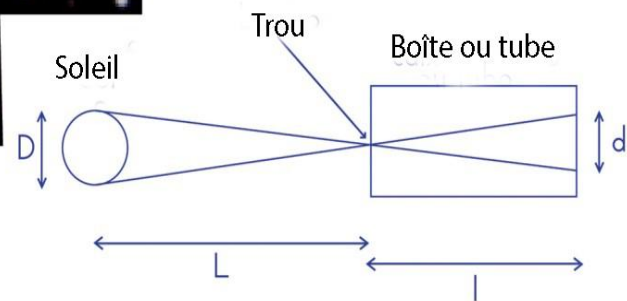
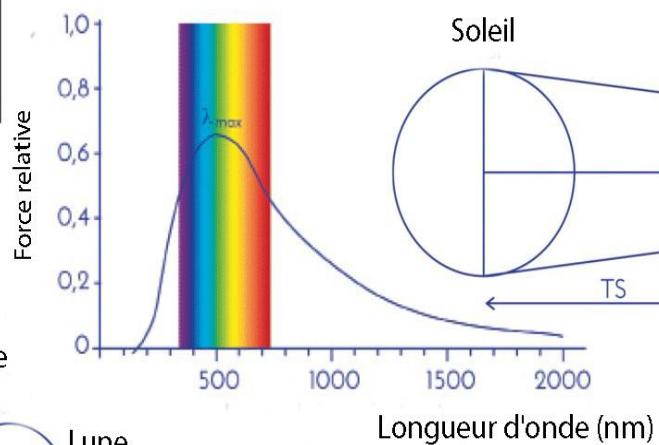
Éditeurs: Rosa M. Ros et Beatriz Garcia



Cône d'ombre

Lune

Soleil



14 pas vers l'univers

Cours d'astronomie pour
professeurs et les étudiants
de troisième cycle en sciences

Union astronomique internationale UAI

Éditeurs: Rosa M. Ros et Beatriz García

Réseau NASE pour l'enseignement de l'astronomie à
l'école



www.naseprogram.org



Première édition: desembre 2020

© NASE

© Textes de: Juan A. Belmonte, Francis Berthomieu, Alexandre da Costa, Hans Deeg, Susana Deustua, Julieta Fierro, Beatriz García, Mary Kay Hemenway, Ricardo Moreno, Jay M. Pasachoff, John Percy, Madeleine Rojas, Rosa M. Ros, Florian Seitz, Andrea Sosa, Magda Stavinschi, Ana Villaescusa, 2020.

Éditeurs: Rosa M. Ros et Beatriz García

Design graphique: Maria Vidal

Impressions dans l'UE

ISBN: 978-84-15771-83-8

Impression:

Albedo Fulldome S.L. Barcelona, España, 2020.

Index

Introduction	7
L'évolution des étoiles	8
Cosmologie	18
Histoire de l'astronomie	24
Système solaire	34
Le modèle de l'horizon local et les cadrans solaires	52
Modèle universel de l'horizon	64
Système Terre-Lune-Soleil : Phases et éclipses	80
Porte-documents pour jeune astronome	88
Spectre solaire et taches solaires	100
La vie des étoiles	110
L'astronomie au-delà du visible	122
Expansion de l'univers	132
Planètes et exoplanètes	144
Astrobiologie	160
Préparation des observations	174
L'archéo-astronomie et son potentiel éducatif	188

Introduction

Pour améliorer la présence de l'astronomie dans les écoles, la formation des professeurs est essentielle. L'objectif principal de la NASE est d'offrir des cours de formation de qualité dans tous les pays intéressés par le développement de l'astronomie dans ses différents niveaux d'enseignement, d'intégrer des sujets liés à cette discipline dans les différents programmes scolaires et d'initier les jeunes à la science par l'étude de l'univers. Ces cours sont divisés en 14 sections (comprenant des conférences et des ateliers pratiques) qui constituent la formation initiale des enseignants en astronomie. Ces 14 étapes initiales pour comprendre l'Univers, compilées dans cette publication, représentent le travail de plusieurs enseignants et astronomes professionnels qui ont développé des cours sur plusieurs années, comme on peut le trouver sur le site de la NASE.

Il convient de noter que toutes les activités proposées augmentent la participation active, l'observation et, le cas échéant, la construction de modèles pour une meilleure compréhension du contenu scientifique. Toutes les écoles ont une cour de récréation, il est donc proposé d'utiliser cet espace comme un "laboratoire d'astronomie", dans le but de faire des observations astronomiques et de faire des élèves les principaux protagonistes de leur propre apprentissage.

Nous remercions tous les auteurs pour leur collaboration à l'élaboration du matériel. Nous tenons également à souligner la grande aide reçue pour la traduction et la révision de la version française de ce livre, à Ouadi Beya, Naoufel Ben Maaouia, Riadh Ben Nessib, Eric Mercier et Josep Corominas ainsi que la préparation et la révision des figures et graphiques à Ederlinda Viñuales et Victor Ramírez pour l'édition et la révision finale des textes.

Pour en savoir plus sur les cours développés jusqu'à présent, les activités et les nouveaux cours qui ont vu le jour après le cours initial, nous invitons le lecteur à consulter le site web de la NASE. Le programme ne se limite pas à des cours de formation, de sorte qu'après les différentes actions, il est possible de former des groupes de travail avec les enseignants d'une certaine localité, qui sont ceux qui maintiennent la flamme, en créant plus de matériel et de nouvelles activités, en les rendant entièrement disponibles sur Internet.

Sur Internet, il est également possible de trouver plusieurs matériels complémentaires qui offrent un univers de possibilités à l'enseignant qui a suivi les cours de la NASE, afin d'élargir ses connaissances et ses activités dans son école.

Nous terminerons cette présentation par une citation de Confucius (551 - 479 av. J.-C.) qui correspond très bien au projet et à ses objectifs:

J'ai entendu et oublié
J'ai vu et je me suis souvenu
Je l'ai fait et j'ai compris

L'objectif principal de la NASE est de rapprocher l'astronomie de tous, afin que chacun puisse comprendre et apprécier le processus d'assimilation des nouvelles connaissances.

Evolution des étoiles

John Percy

Union Astronomique Internationale, Université de Toronto (Canada)

Résumé

Cet article contient des informations utiles pour les professeurs de physique sur l'étude des étoiles et leur évolution. Il contient également des liens vers le programme typique pour école et suggère des activités pertinentes pour les étudiants.

Objectifs

- Comprendre l'évolution stellaire et les processus sous-jacents.
 - Comprendre le diagramme de Hertzsprung-Russell.
 - Comprendre le système de magnitude absolue et apparente.
-

Introduction

L'évolution stellaire implique chaque changement dans la vie des étoiles, en commençant par leur naissance, pendant leur longue vie jusque à la mort, par les "Forces" gravitationnelles des étoiles à l'énergie rayonnante. Pour compenser cette perte d'énergie, les étoiles produisent de l'énergie à travers des processus de fusion nucléaire de certains éléments légers dans d'autres lourds. Ce phénomène modifie lentement la composition chimique et, implicitement, les autres propriétés de étoiles. A la fin, il n'y aura pas de combustible nucléaire, et ils mourront. Comprendre la nature et l'évolution des étoiles, nous réussirons à comprendre et à apprécier la nature et l'évolution de notre Soleil - l'astre qui rend la vie possible sur la Terre. Cela nous aide à comprendre l'origine du notre système solaire, les atomes et les molécules dont la matière est formée, y compris la matière vivante. Nous aide à répondre à des questions fondamentales comme «il y a d'autres étoiles capables de produire l'énergie, et vivent assez longtemps, et restent suffisamment stables, donc pour pouvoir développer la vie sur les planètes autour d'eux? » Pour cela aussi et pour d'autres raisons, l'évolution des étoiles est un sujet passionnant pour les étudiants.

Propriétés du Soleil et des étoiles

La première étape dans la compréhension de l'origine et de l'évolution du Soleil et des étoiles est la compréhension de leurs propriétés. Les élèves devraient comprendre comment ils sont déterminés ces propriétés. Le soleil est l'étoile la plus proche. Dans cet article, nous

traitons le Soleil en termes d'évolution des étoiles. Les élèves doivent comprendre les propriétés et la structure, ainsi que la source d'énergie du Soleil, car les mêmes principes permettent aux astronomes de déterminer la structure et l'évolution de toutes les étoiles.

Le Soleil

Par rapport aux autres étoiles, la détermination des propriétés de base du Soleil est un processus relativement facile. Sa taille moyenne est de $1,495978715 \times 10^{11}$ m; de là, son rayon angulaire (959.63 arcsec) peut être transformé par la géométrie en un rayon linéaire: $6,96265 \times 10^8$ m ou 696 265 Km. Le flux observé (1370 W/m^2) à distance terrestre peut être transformé dans une puissance totale: $3,85 \times 10^{26}$ W.

Sa masse peut être déterminée par la force gravitationnelle exercée sur planètes, en utilisant les lois mécaniques et gravitationnelles de Newton: $1,9891 \times 10^{30}$ kg. La température de surface - la source lumineuse - est de 5780 K. La période de la rotation est d'environ 25 jours, mais varie en fonction de la latitude du Soleil. En ce qui concerne sa composition, il se compose principalement d'hydrogène et d'hélium. À l'activité 2, les étudiants observeront le Soleil, l'étoile la plus proche, pour voir à quoi ressemble une étoile

Les étoiles

La propriété la plus évidente d'une étoile est sa luminosité. On mesure ça par la magnitude, qui est une mesure logarithmique du flux d'énergie que nous recevons de l'étoile.

L'échelle de magnitude a été développée par l'astronome grec Hiparch (190-120 av. J.-C.). Il a classé la magnitude des étoiles de 1 à 5. C'est pourquoi les étoiles avec moins de luminosité ont une magnitude supérieure. Plus tard, on a constaté que les sens humains réagissent logarithmiquement aux stimuli, ainsi un rapport de luminosité (2,512) a été introduit correspond à une différence de magnitude 1.0. L'étoile la plus brillante du ciel pendant la nuit a une grandeur de -1,44. L'étoile la plus faible est visible avec le plus grand télescope a une magnitude d'environ 30.

La luminosité apparente, B, d'une étoile dépend de sa

puissance, P et distance, D . Selon la loi du carré inverse de la luminosité, elle est directement proportionnelle à son pouvoir et inversement proportionnel au carré de la distance: $B \approx P / D^2$. Pour les étoiles voisines, la distance peut être mesurée par parallaxe. À l'activité 1, les étudiants peuvent faire une démonstration pour illustrer la parallaxe et montrer qu'il est inversement proportionnel à la distance à l'objet observé. Puissance des étoiles peut alors être calculée et déterminée par la loi du carré inverse de la luminosité.

Les étoiles ont des couleurs différentes, cela peut être étudié très facilement à travers l'observation des étoiles Rigel (Beta Orionis) et Betelgeuse (Alpha Orionis) de la constellation Orion (figure 1). À l'activité 3, les étudiants peuvent observer les étoiles la nuit et admirer la beauté du vrai ciel. Les différentes couleurs des étoiles sont dues aux différentes températures des couches rayonnantes des étoiles. Les étoiles plus froides semblent rouges, et les plus chaudes semblent bleues. Parce que l'œil répond différemment aux couleurs, une étoile rouge apparaît en rouge clair et une étoile bleue apparaît en bleu clair. La couleur peut être déterminée exactement avec l'aide d'un photomètre avec des filtres de différentes couleurs et donc on peut déterminer la température de l'étoile analysée.

La température d'une étoile peut être déterminée à l'aide de son spectre - la distribution des couleurs ou des longueurs d'onde à la lumière de l'étoile (figure 2). Cette figure illustre la beauté des couleurs de la lumière des étoiles. Cette lumière a traversé l'atmosphère extérieure de l'étoile, et les ions, les atomes et les molé-



Fig. 1: La Constellation Orion. La bételgeuse, l'étoile supérieure gauche, est fraîche et par conséquent apparaît rougeâtre. Deneb, l'étoile inférieure droite, est chaude et semble donc bleutée. La nébuleuse d'Orion apparaît sous les trois étoiles au milieu de la constellation.

cules dans l'atmosphère retirent des longueurs d'onde spécifiques du spectre. Cela produit des lignes sombres, ou des couleurs manquantes dans le spectre (figure 2). Selon la température de l'atmosphère, les atomes peuvent être ionisés, excités ou combinés en molécules. L'état observé des atomes, dans le spectre, fournit donc des informations sur la température.

Il y a un siècle, les astronomes ont découvert une re-

lation importante entre la puissance d'une étoile et sa température: pour la plupart des étoiles, la puissance est plus élevée à une température plus élevée. Plus tard, on a constaté que le facteur qui contrôle cette relation est la masse de l'étoile: les étoiles les plus massives sont

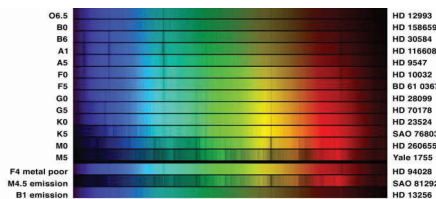


Fig. 2 : Les spectres de nombreuses étoiles, des plus chaudes (O6,5 : en haut) aux plus froides (M5 : quatrième en partant du bas). Les différentes apparences des spectres sont dues aux différentes températures des étoiles. Les trois spectres du bas sont ceux d'étoiles qui sont particulières d'une certaine manière. Source : Observatoire national d'astronomie optique.

plus fortes et plus chaudes. La graphique puissance par température s'appelle le diagramme Hertzsprung-Russell. Il est très important pour les étudiants de créer les tableaux (l'activité 8) puis de les interpréter (figure 3)

Un objectif principal en astronomie est de déterminer le pouvoir des étoiles de différents types. Ainsi, lorsqu'une étoile est vue dans une partie de l'Univers, les astronomes peuvent utiliser la luminosité B et la puissance P et calculer la distance D de la loi du carré

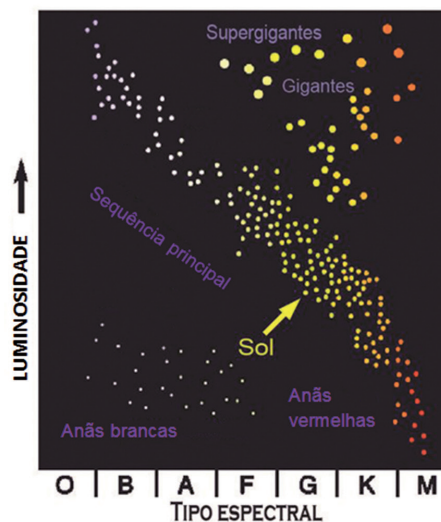


Fig. 3: Le diagramme de Hertzsprung-Russell, un graphique de la puissance stellaire ou de la luminosité par rapport à la température stellaire. Pour des raisons historiques, la température augmente vers la gauche. Les lettres OBAFGKM sont des types spectraux descriptifs liés à la température. Les lignes diagonales montrent le rayon des étoiles; les étoiles plus grandes (géantes et supergéantes) sont en haut à droite, les plus petites (naines) en bas à gauche. Notez la séquence principale de la partie inférieure droite à la partie supérieure gauche. La plupart des étoiles se trouvent ici. Les masses des étoiles de la séquence principale sont représentées. Les emplacements de certaines étoiles bien connues sont également montrés. Source: Université de Californie Berkeley.

inverse de la luminosité: $B \sim P/D^2$.

Les spectres des étoiles (et des nébuleuses) révèlent des informations sur la composition des étoiles: la courbe de l'abondance cosmique (figure 4). Elles sont composées de 3/4 d'hydrogène, 1/4 d'hélium et 2% d'éléments lourds, en grande partie du carbone, de l'azote et de l'oxygène.

Environ la moitié des étoiles au voisinage du Soleil sont binaires ou doubles - deux étoiles en orbite l'une de l'autre. Les étoiles doubles sont importantes parce qu'elles permettent aux astronomes calculer la masse

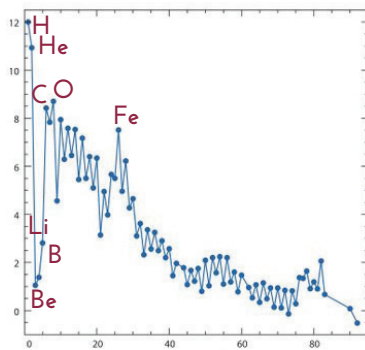


Fig. 4: L'abondance des éléments dans le Soleil et les étoiles. L'hydrogène et l'hélium sont les plus abondants. Le lithium, le béryllium et le bore ont une très faible abondance. Le carbone, l'azote et l'oxygène sont abondants. L'abondance des autres éléments diminue considérablement avec l'augmentation du nombre atomique. L'hydrogène est 1012 fois plus abondant que l'uranium. Les éléments ayant un nombre pair de protons ont des abondances plus élevées que les éléments ayant un nombre impair de protons. Les éléments plus légers que le fer sont produits par fusion nucléaire dans les étoiles. Les éléments plus lourds que le fer sont produits par capture neutronique dans les explosions de supernova. Source: NASA.

des étoiles. La masse d'une étoile peut être déterminée en observant le mouvement de l'autre et vice versa. Sirius, Procyon et Capella sont des exemples d'étoiles doubles. Il existe également des étoiles multiples: trois étoiles ou plus en orbite autour des autres. Alpha Centauri, l'étoile la plus proche du Soleil est une étoile triple. Epsilon Lyrae est une étoile quadruple.

Comme nous l'avons déjà mentionné, il existe une relation importante entre la puissance d'une étoile et sa masse: la puissance est approximativement proportionnelle à la masse de l'étoile à la troisième puissance. C'est ce qu'on appelle la relation masse-luminosité.

La masse des étoiles varie entre 0,1 et 100 fois la masse du Soleil. La puissance varie d'environ 0,0001 à 1.000.000 fois la puissance du Soleil. Les étoiles chaudes ont environ 50000 K, et le plus froid d'environ

2000K. Les astronomes qui étudient les étoiles peuvent voir que le Soleil est beaucoup plus massif et a plus de puissance que 95% de toutes les étoiles voisines. Les étoiles massives et à haute puissance sont rares. Le soleil n'est pas une étoile moyenne. C'est supérieur à la moyenne!

La Structure de Soleil et des étoiles

La structure du Soleil et des étoiles est principalement déterminée par la gravité. La gravité est celle qui maintient le Soleil fluide sous une forme parfaitement sphérique. Dans le Soleil, la pression augmente en raison du poids des couches gazeuses de la surface. Selon les lois de la physique, qui sont valables pour un gaz parfait, la densité et la température sont plus élevées si la pression est plus élevée. Si les couches plus profondes sont plus chaudes, la chaleur migrera vers l'extérieur alors que la chaleur migrera toujours du chaud au froid. Cela peut être obtenu soit par radiation, soit par convection

Si la chaleur migre vers l'extérieur du Soleil, les couches plus profondes se refroidiront et la gravité peut provoquer la contraction du Soleil. En raison de l'énergie produite au centre du Soleil, il ne se rétrécit pas, mais il est maintenue au même volume à cause de la pression de rayonnement créé par le processus de fusion thermonucléaire décrit ci-dessous.

Ces quatre principes simples s'appliquent à toutes les étoiles. Ils peuvent être exprimés en équations et résolus

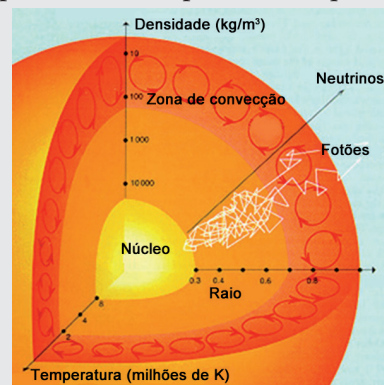


Fig. 5: Une coupe transversale du Soleil, déterminée à partir de modèles physiques. Dans la zone de convection externe, l'énergie est transportée par convection; en dessous, il est transporté par rayonnement. L'énergie est produite dans le noyau. Source: Institut de physique théorique, Université d'Oslo.

sur l'ordinateur. Il fournit un modèle du Soleil ou de toute autre étoile: pression, densité et flux d'énergie dans n'importe quelle position par rapport au noyau étoile. C'est la méthode de base à travers laquelle les astronomes apprennent la structure et l'évolution des étoiles. Le modèle est conçu pour une certaine valeur de la masse et de la composition de l'étoile; et, à par-

tir de là, les astronomes peuvent calculer le rayon de l'étoile, sa puissance et d'autres propriétés observables (figure 5).

Récemment, les astronomes ont développé une méthode puissante pour tester les modèles sur la structure du Soleil et des étoiles - l'hélioséismologie ou, pour d'autres étoiles, l'astro-séismologie. Le soleil et les étoiles vibrent légèrement et en mille différentes façons. Ceux-ci peuvent être observés avec des instruments sensibles et comparés aux propriétés de vibration prédites par les modèles.

Source d'énergie du Soleil et des étoiles

Une des questions des chercheurs, depuis des siècles, est liée à la source d'énergie du Soleil et des étoiles. La source d'énergie la plus évidente est la combustion chimique des combustibles tels que les huiles ou le gaz naturel, mais en raison de la puissance extrêmement élevée du Soleil (4×10^{26} W), telles sources d'énergie pourraient être épuisées en quelques milliers d'années. Jusqu'à il y a quelques décennies, les gens croyaient que l'âge du Soleil et de la Terre était juste quelques milliers d'années à cause des écrits de la Bible!

Après la recherche d'Isaac Newton, qui a publié la loi de l'attraction universelle, les chercheurs ont réalisé que le Soleil et les étoiles pouvaient générer de l'énergie par contraction lente. L'énergie de gravité (potentielle) pourrait être convertie en chaleur et rayonnement. Cette source d'énergie pourrait durer des millions d'années. Toutefois, la preuve géologique suggère que la Terre et donc le Soleil sont beaucoup plus anciens.

À la fin du 19ème siècle, les chercheurs ont découvert la radioactivité et la fission nucléaire. Mais les éléments radioactifs sont très rares dans le Soleil et dans les étoiles, et ils ne pourraient pas assurer leur puissance pendant des milliards d'années.

Enfin, les chercheurs ont réalisé au 20ème siècle que les éléments légers peuvent fusionner en d'autres plus lourds, un processus appelé fusion nucléaire. Si la température et la densité sont suffisamment hauts, ils pourraient produire beaucoup d'énergie - plus que suffisant pour nourrir le Soleil et les étoiles. L'élément présentant le plus grand potentiel de fusion nucléaire est l'hydrogène, et il est le plus abondant dans le Soleil et dans les étoiles.

Dans les étoiles avec petite masse, comme le Soleil, la fusion de l'hydrogène a lieu dans plusieurs étapes connues sous le nom de réaction en chaîne p-p. Les protons

fusionnent et forment le deutérium, un autre neutron fusionne avec du deutérium et génère de l'hélium-3. Noyaux d'hélium-3 fusionnent et forment l'hélium-4, l'isotope d'hélium normal (figure 6).

Dans les étoiles massives, l'hydrogène fusionne et l'hélium se forme à travers une série différente des réactions qui peuvent être appelées le cycle CNO (cycle carbone-azote-oxygène), dans lequel le carbone-12 est utilisé comme catalyseur (figure 7). Le résultat final, dans chaque cas, est que, en fusionnant les quatre noyaux d'hydrogène donnent naissance à un noyau d'hélium. Une petite partie de la masse des no

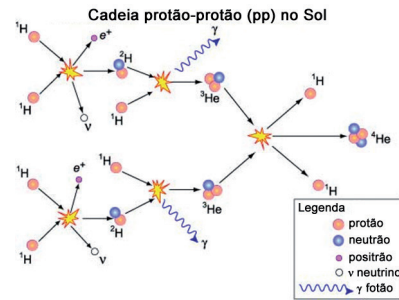


Fig. 6 : La chaîne de réactions proton-proton par laquelle l'hydrogène est fusionné en hélium dans le Soleil et d'autres étoiles de faible masse. Dans cette figure et la suivante, notez que des neutrinos (○) sont émis dans certaines des réactions. L'énergie est émise sous forme de rayons gamma (rayons ~) et l'énergie cinétique des noyaux. Source : Australian National Telescope Facility.

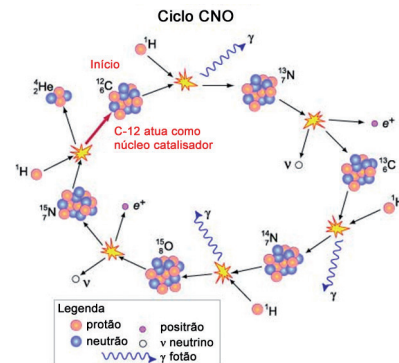


Fig. 7 : Le cycle CNO par lequel l'hydrogène est fusionné en hélium dans des étoiles plus massives que le Soleil. Le carbone 12 (marqué «start») agit comme un catalyseur, il participe au processus sans être épuisé lui-même. Source: Australian National Telescope Facility.

yaux d'hydrogène est converti en énergie (voir Activité 9). Normalement, les noyaux rejettent l'un sur l'autre, à cause des charges électriques positives. La fusion se produit uniquement en cas de collision forte (haute température) et de haute fréquence (densité) entre les noyaux.

Si la fusion nucléaire est la source du pouvoir du Soleil, les réactions de fusion devraient conduire à la génération d'un grand nombre de particules subatomiques appelées neutrinos. Les neutrinos passent gé-

néralement par la matière sans interagir avec elle. Des milliards de neutrinos traversent nos corps chaque seconde. Seuls quelques-uns d'entre eux peuvent être détectés dans des "observatoires de neutrinos" spéciaux. Les premières observations n'ont détecté qu'un tiers du nombre attendu de neutrinos. Ce «problème du neutrino solaire» a duré plus de 20 ans, mais finalement a été résolu par l'Observatoire canadien de Neutrinos de Sudbury (SNO) (figure 8). Le cœur de cet observateur est l'énorme réservoir d'eau lourde - l'eau dans laquelle

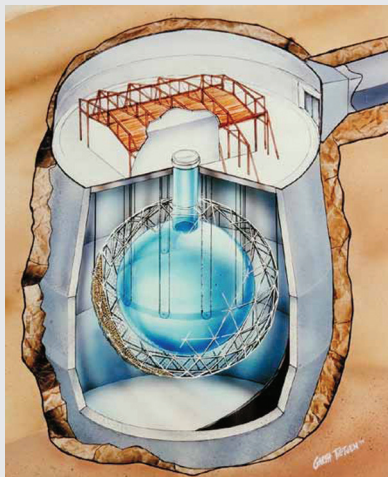


Fig. 8: L'Observatoire de neutrinos de Sudbury, où les scientifiques ont confirmé les modèles de fusion nucléaire dans le Soleil en observant le flux prévu de neutrinos. Le cœur de l'observatoire est un grand réservoir d'eau lourde. Les noyaux de deutérium (voir le texte) interagissent parfois avec un neutrino pour produire un éclair de lumière observable. Source: Observatoire de neutrinos de Sudbury.

certaines noyaux d'hydrogène sont du deutérium. Ces noyaux absorbent occasionnellement un neutrino et émettent un éclair. Il existe trois types de neutrinos. Les deux tiers des neutrinos du Soleil se transforment en d'autres types. SNO est sensible aux tous les trois types de neutrinos et est capable de détecter tous les neutrinos prescrits par la théorie.

La vie du Soleil et des étoiles

«La méthode scientifique» est un concept fondamental dans l'enseignement des sciences et c'est pourquoi nous commencerons par expliquer comment les astronomes comprennent l'évolution des étoiles:

- En utilisant des simulations informatiques, après les lois de la physique, comme décrit ci-dessus;
- Par l'observation des étoiles dans le ciel, qui sont à différents stades d'évolution et leur placement dans la «séquence d'évolution» logique;
- en observant les essaims des étoiles: des groupes d'étoiles qui se sont formées du même nuage de gaz et

de poussière en même temps mais qui ont des masses différentes. Il y a des milliers d'essaims d'étoiles dans notre Galaxie, dont 150 essaims globulaires, qui sont les objets les plus anciens de la galaxie. Hyades, Pléiades et la plupart des étoiles dans la Grande Ourse sont des essaims d'étoiles qui peuvent être vues à l'œil nu. Les essaims sont «les expériences de la nature»: des groupes d'étoiles formés du même matériau, au même endroit et en même temps. Ces étoiles ne diffèrent que dans leur masse. Étant donné que différents essaims ont des âges différents, on peut voir comment une collection d'étoiles de différentes masses peut être observée lorsqu'elles atteignent l'âge différent après la naissance;

- Par observation directe des étapes rapides de l'évolution; ils seront très rares, car ils représentent une brève étape dans la vie des étoiles;
- En étudiant les changements dans les périodes d'étoiles variables, pulsateurs. Ces changements sont faibles mais observables. Les périodes de ces étoiles dépendent du rayon de l'étoile. Avec le changement de rayon tout au long de l'évolution, la période change. Le changement de la période est mesuré par observation systématique et pour une longue période des étoiles.

La première méthode, l'utilisation de simulations informatisées, est la même méthode à travers qui a déterminé la structure des étoiles. Une fois que la structure de l'étoile est connue, il est connu sa température et sa densité à n'importe quel point et on peut calculer les changements de la composition chimiques après les processus thermonucléaires. Ces modifications apportées à la composition peuvent être incorporé dans la prochaine model dans une séquence d'évolution.

Les étoiles variables les plus célèbres s'appellent Céphéide, après l'étoile Delta Céphéide qui est un exemple évident. Il existe une relation entre la période de variation de Céphéide et son pouvoir. En mesurant la période, les astronomes peuvent déterminer le pouvoir et implicitement la distance, en utilisant la loi de luminosité inverse carrée. Les Céphéides représentent un instrument important pour déterminer la taille et l'âge de l'Univers.

À l'activité 5, les étudiants verront différentes stars à travers des projets tels que Cytizen Sky. Cela leur permettra de développer des compétences mathématiques et scientifiques tout en apprenant la vraie science et contribuera probablement à la connaissance astronomique.

La vie et la mort du Soleil et les étoiles

Le processus de fusion de l'hydrogène est très efficace. Assure la luminosité des étoiles à travers leur longue vie. Les réactions de fusion sont plus rapides vers le centre de l'étoile, où la température et la densité est plus élevée. Ainsi, l'étoile développe un noyau d'hélium qui se développe progressivement à l'extérieur. Pendant ce temps, le noyau de l'étoile est chaud, par rétrécissement, de sorte que l'hydrogène autour du noyau de l'hélium est assez chaud pour fusionner. Ce processus conduit à couches en expansion à la surface de l'étoile - lentement au début, puis plus vite. Cela devient une étoile rouge géant, des centaines de fois plus grande que le Soleil. Enfin, le centre d'hélium devient assez chaud que l'hélium fusionne dans le carbone. Cette fusion équilibre l'attrait gravitationnelle mais pas pendant longtemps, car la fusion d'hélium n'est pas aussi efficace que cela d'hydrogène. À ce stade, le noyau de carbone diminue, il devient plus chaud et les couches de la surface se développent et deviennent un géant de plus en plus grand. La plupart des étoiles massives se développent jusqu'à une dimension encore plus grande, devenant des étoiles super géantes rouges.

Une étoile meurt à la fin du combustible. Il n'y a plus de source d'énergie pour garder le cœur chaud et générer suffisamment de pression gazeuse que pour empêcher la force gravitationnelle de contracter l'étoile. La façon dont une étoile meurt dépend de sa masse. La vie d'une étoile dépend aussi de sa masse: les étoiles les plus petites ont une luminosité plus faible et une durée de vie plus longue - des dizaines de milliards d'années. Les étoiles plus grandes ont une plus grande luminosité et une durée de vie plus courte - des millions d'années. La majorité des étoiles sont petites et leur vie dépasse l'âge actuel de l'univers.



Fig. 9: La nébuleuse Hélice, une nébuleuse planétaire. Les gaz de la nébuleuse ont été éjectés de l'étoile au cours de sa phase géante rouge d'évolution. Le noyau de l'étoile est un nain blanc chaud. On peut le voir, faiblement, au centre de la nébuleuse. Source: NASA.

Avant qu'une étoile meure, elle perd son poids. Tout en consommant la dernière partie d'hydrogène, suivie d'hélium, l'étoile se transforme en une étoile rouge géante avec un rayon de centaines de fois plus grand et avec un volume d'un milliard de fois plus grand que le Soleil. A l'Activité 4, les étudiants pourront faire une échelle modèle pour voir les changements immenses de la taille d'une étoile pendant sa évolution. La force de gravité dans les couches à la surface d'une étoile rouge géante est réduite. Il devient également instable en pulsation, avec expansion et contraction rythmique. En raison de la grande taille d'une étoile géante, il faut des mois à des années pour chaque cycle d'impulsion. Cela entraînera la perte de couches de surface dans l'espace, formant une belle nébuleuse planétaire qui s'étend lentement autour de l'étoile en agonie (figure 9). Les gaz de la nébuleuse planétaire sont fluorescents en raison des rayons ultraviolets émis par le noyau chaud de l'étoile. Finalement, ils quitteront l'étoile et rejoindront d'autres gaz et de la poussière interstellaire pour former de nouvelles nébuleuses, d'où surgiront de nouvelles étoiles.

La vie des étoiles massives est légèrement différente de celle des étoiles plus petites. Dans les étoiles plus petites, l'énergie est transportée vers l'extérieur par rayonnement. Au milieu des grandes étoiles, l'énergie est transportée par convection, de sorte que le noyau est complètement mélangé. Alors que le dernier noyau d'hydrogène est consommé dans le centre, l'étoile se transforme brusquement dans un géant rouge. Dans le cas d'étoiles plus petites, la transition est plus lente.

Les étoiles doivent avoir une masse de 0,08 de plus que le Soleil. À l'inverse, ils n'auraient pas le cœur chaud et assez dense pour fusionner l'hydrogène. Les étoiles massives ont les masses cent fois la masse du Soleil. Les étoiles encore plus grandes seraient si fortes que leur propre rayonnement arrêterait leur formation ou le reste dans une étoile stable.

Etoiles typiques: étoiles avec petite masse

Dans les étoiles avec une masse initiale inférieure à huit fois celle du Soleil, la perte de masse entraînera une diminution du noyau à moins de 1,4 fois la masse du Soleil. Ce type de noyau n'a pas de combustible thermonucléaire. L'action des forces gravitationnelles à l'intérieur est équilibrée par la pression extérieure des électrons. Ils résistent à toute autre contraction due au principe d'exclusion de Pauli - une loi de la physique quantique qui indique qu'il y a une limite au nombre d'électrons qui peut être dans un certain volume. Ce noyau s'appelle le nain blanc. Ce type d'étoiles a une

masse inférieure à 1,44 masse solaire. On l'appelle la limite de Chandrasekhar. L'astronome indien-américain Nobel, Subrahmanyam Chandrasekhar a montré que si un nain blanc est plus grand que cette limite, il s'effondrera sous son propre poids.

Les nains blancs sont le point final normal dans l'évolution d'une étoile. Ils sont très fréquents dans notre galaxie, mais ils sont très difficiles à observer. Ils ne sont pas plus grands que la Terre et bien qu'ils soient chauds, ils ont une petite surface de rayonnement. Leur puissance rayonnante est mille fois plus petite que celle du Soleil. Les nains blancs émettent des rayonnements uniquement parce qu'ils sont chauds et ils refroidissent lentement avec la perte d'énergie. De telles étoiles orbitent autour d'étoiles brillantes, comme Sirius et Procyon. Les nains blancs n'ont pas d'autre source d'énergie que la chaleur stockée. Ils sont comme le charbon en feu, qui est refroidi dans une cheminée. Après des milliards d'années, ils seront complètement froids et deviendront sombres et froids.

Les étoiles rares: étoiles massives

Les étoiles massives sont chaudes et à haute puissance de rayonnement, mais elles sont très rares. Ils ont une courte vie, quelques millions d'années. Le noyau est



Fig. 10: La nébuleuse du crabe, le reste d'une explosion de supernova enregistrée par des astronomes en Asie en 1054 après J.C. Le noyau de l'étoile explosive est une étoile à neutrons à rotation rapide, ou pulsar, dans la nébuleuse. Une petite fraction de son énergie de rotation est transmise à la nébuleuse, la faisant briller. Source: NASA.

assez chaud et assez dense pour que les éléments fusionnent jusqu'au fer. Le noyau de fer formé n'a pas assez d'énergie pour la fusion ou la fission. Il n'y a pas de source d'énergie qui maintienne le noyau chaud afin qu'il puisse résister aux forces de gravité. Ces forces conduiront à l'effondrement du noyau de l'étoile dans une seconde, le transformeront en sphère des neutrons (ou même de matière étrange), libérant d'énormes quantités d'énergie gravitationnelle. En conséquence, les couches extérieures de l'étoile explosent sous la forme d'une supernova (figure 10). Ces couches sont éjectées à des vitesses allant jusqu'à 10000 km/s.

Une supernova de brillance maximale peut être aussi

brillante qu'une galaxie avec des centaines de milliards d'étoiles. Tycho Brahe et Johannes Kepler ont observé et étudié les supernovae brillantes en 1572 et 1604 respectivement. Selon Aristote, les étoiles sont parfaites et ne changent pas. Brahe et Kepler ont montré le contraire. Dans notre Galaxie, la Voie Lactée, aucune supernova depuis plus de 400 ans n'a été observée. Une supernova a été observée en 1987 dans le Grand Nuage de Magellan, une petite galaxie satellite de notre Galaxie.

La masse du noyau d'une supernova dépasse la limite de Chandrasekhar. Les protons et les électrons du noyau qui s'effondre, fusionne et génère des neutrons et des neutrinos. L'explosion des neutrinos peut être observée par un observateur de neutrinos. Tant que la masse de base est trois fois moins que la masse du Soleil, la supernova sera stable. Les forces gravitationnelles internes sont compensées par la pression externe des neutrons. Cet objet s'appelle l'étoile à neutrons. Son diamètre est environ 10 km et sa densité est plus que 10¹⁴ fois la densité de l'eau. Elle peut-être vue avec des télescopes à rayons X si c'est encore assez chaud, mais les étoiles à neutrons ont été découverts d'une manière inattendue - comme sources d'ondes radio appelés pulsars. Leur durée d'impulsion est d'environ une seconde, parfois même moins. Les radiations sont produites par le fort champ magnétique des étoiles à neutrons, mais les impulsions se forment grâce à la rotation rapide de l'étoile

Il existe le deuxième type de supernova trouvé dans les systèmes binaires dans laquelle une étoile est morte et est devenue une nain blanche. Lorsque la deuxième étoile commence à se développer, elle peut émettre des gaz au nain blanc. Si la masse de nain blanc devient plus grande que la limite Chandrasekhar, alors il se produit une déflagration: la matière fusion presque instantanément en carbone, libérant assez d'énergie pour détruire l'étoile.

Dans l'explosion d'une supernova, tous les éléments qui se sont formés suite aux réactions de la fusion sont émis dans l'espace. Des éléments plus lourds que le fer sont produits en petites quantités pendant l'explosion, tandis que les neutrons fusionnent dans les noyaux des éléments plus légers.

Les étoiles très rares: étoiles très massives

Les étoiles très massives sont très rares: un milliardième d'étoile. Ils ont un pouvoir d'un million de fois plus élevé que le Soleil et ne vit que très peu. Ils sont si massifs qu'après ils restent sans énergie et leur cœur

s'effondre, leur masse est 3 fois plus élevée que la masse du Soleil. La gravité dépasse l'énergie exercée par les neutrons. Le noyau continue à s'effondrer jusqu'à ce qu'il soit si dense que les forces gravitationnelles empêchent toute émission, y compris la lumière. En ce cas l'étoile devient un trou noir. Les trous noirs n'émettent pas de rayonnement, mais si c'est une étoile normale dans les environs, elle est obligée d'orbiter autour de trou noir. L'observation de mouvement du compagnon permet aux astronomes de détecter les trous noirs et de déterminer leur masse. Plus encore: une petite quantité de gaz de l'étoile normale peut être attirée sur le trou noir et chauffé jusqu'à ce qu'elle brille dans le champ X avant qu'elle soit intégrée dans le trou noir (figure 11). Les trous noirs sont des sources puissantes de rayons X

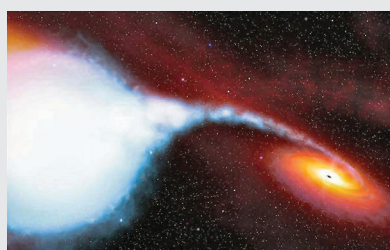


Fig. 11: Une conception d'artiste de la source de rayons X binaire étoile Cygnus X-1. Il se compose d'une étoile normale massive (à gauche), et d'un trou noir (à droite), environ 15 fois la masse du Soleil, en orbite mutuelle. Certains des gaz de l'étoile normale sont attirés dans un disque d'accrétion autour du trou noir, et finalement dans le trou noir lui-même. Les gaz sont chauffés à des températures très élevées, ce qui les fait émettre des rayons X. Source: NASA.

et peuvent être découverts avec l'aide des télescopes à rayons X.

Au centre de nombreuses galaxies, y compris notre galaxie, les astronomes ont découvert des trous noirs massifs, des millions ou des milliards de fois plus massifs que le Soleil. Leur masse est déterminée par les effets sur les étoiles visibles dans leur environnement. Des trous noirs massifs ont été formés pendant le processus de naissance des galaxies, mais ce n'est pas encore très claire comment. L'un des objectifs des astronomes est de comprendre comment les premières étoiles, galaxies et trous noirs massifs ont été formés, peu de temps après la naissance de l'Univers.

Etoiles variables cataclysmiques

Environ la moitié de toutes les étoiles sont des étoiles binaires, deux ou plusieurs étoiles en orbite autour d'une de l'autre. La plupart du temps, les orbites sont très grandes et les deux étoiles n'interfèrent pas. Mais si l'orbite est petite, les deux étoiles peuvent interagir, surtout si l'une devient un géant rouge. Et puis, une

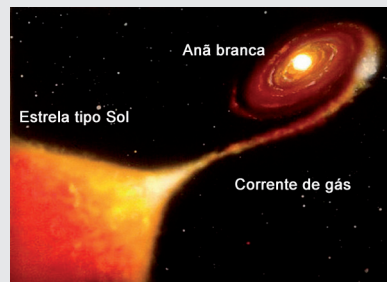


Fig. 12: Une étoile variable cataclysmique. La matière est tirée de l'étoile normale (à gauche) vers la naine blanche (à droite). Il frappe le disque d'accrétion autour de la naine blanche, ce qui provoque un scintillement dans la luminosité. L'affaire finit par atterrir sur la naine blanche, où elle peut s'enflammer ou exploser.

des étoiles meurt et devient une naine blanche, une étoile neutronique ou un trou noir et l'évolution de l'étoile normale sera influencée et transmettra la matière à l'étoile morte et, par conséquent, des choses intéressantes peuvent se produire (figure 12). Les systèmes binaires varient en termes d'éclat, pour diverses raisons, et sont appelés variables cataclysmiques. Comme on décrit précédemment, une étoile naine blanche peut exploser, générant une supernova si une quantité suffisante de matière lui est transférée. Si l'étoile normale a fourni de matière riche en hydrogène pour la naine blanche, cette matière peut exploser après le processus de fusion de l'hydrogène, générant une nova. La matière qui migre vers la naine blanche, l'étoile neutronique ou le trou noir peut devenir très chaude, car son énergie gravitationnelle se transforme en chaleur et peut produire des rayonnements à haute énergie tels que les rayons X.

Dans la vision artistique d'un trou noir (figure 11), vous pouvez voir le disque d'accumulation de gaz autour du trou noir et le flux de gaz de l'étoile normale, ce qui est attiré par le trou noir.

La formation (naissance) du soleil et des étoiles

Les étoiles sont nées maintenant! Parce que la plupart des étoiles massives ont une vie de seulement quelques millions d'années, et parce que l'âge de l'Univers a plus de dix milliards d'années, on suppose que ces étoiles massives se sont formées tout récemment. Leur emplacement pourrait être un indice: elles sont dans et près des nuages de gaz et de poussière appelés nébuleux. Les gaz sont constitués d'ions, d'atomes et de molécules, en particulier d'hydrogène avec des traces d'hélium et de petites quantités d'autres éléments lourds. La poussière se compose de particules de silicate de graphite inférieures à un micromètre. La poussière est en moins grande quantité que le gaz, mais la poussière joue des

rôles importants dans la nébuleuse. Il permet la formation de molécules en les protégeant des rayonnements forts des étoiles voisines. En outre, sa surface est un catalyseur pour la formation de molécules. La Nébuleuse d'Orion est la plus proche (figure 13) est une nébuleuse grande et brillante. Les étoiles chaudes dans la nébuleuse font que les atomes de gaz soient fluorescents. La poussière bloque également la lumière des étoiles et des gaz derrière elle, ce qui entraîne l'apparition de taches sombres dans la nébuleuse.



Fig. 13: La nébuleuse d'Orion, un grand nuage de gaz et de poussière dans lequel les étoiles (et leurs planètes) se forment. Le gaz brille par fluorescence. La poussière produit des taches sombres d'absorption que vous pouvez voir, en particulier dans le coin supérieur gauche. Source: NASA.

La force gravitationnelle est une force d'attraction, il n'est donc pas surprenant que certaines zones de la nébuleuse se contractent lentement. Cela se produit si la force gravitationnelle est supérieure à la pression de turbulence dans la partie du nuage. Les premières étapes de contraction peuvent être aidées par une onde de choc d'une supernova voisine de la pression de rayonnement d'une étoile massive à proximité. Une fois la contraction commencée, elle se poursuit. Environ la moitié de l'énergie libérée par la contraction gravitationnelle entraîne le chauffage de l'étoile. L'autre moitié est émise dans l'espace. Lorsque le centre étoile atteint une température de 1.000.000 K, commence la fusion thermonucléaire du deutérium; lorsque la température atteint des températures plus élevées, la fusion thermonucléaire normale de l'hydrogène commence. Lorsque l'énergie produite est égale à la haute énergie, on considère formellement qu'une étoile est née.

Lorsque la contraction gravitationnelle commence, la matière présente un petit mouvement de rotation (moment cinétique) dû à la turbulence dans le nuage. Au fur et à mesure de la contraction, la «conservation du moment cinétique» détermine l'accélération du mouvement de rotation. Ce phénomène peut être remarqué dans le patinage, lorsque le patineur veut une augmentation de la vitesse de rotation pendant la pirouette et

approche ses mains jusqu'à l'axe de rotation. Au fur et à mesure que le mouvement de rotation de l'étoile rétrécissant augmente, la force centrifuge entraîne l'écrasement de la matière environnante dans un disque. L'étoile se forme dans le centre dense du disque. Les planètes sont effectivement déchirées dans ce disque - les planètes solides sont proches de l'étoile et les planètes gazeux et gelés au sont à l'extérieur du disque.

Dans les nébuleuses comme Orion Nébuleuse, les astronomes ont remarqué des étoiles à toutes les étapes de la formation. Ils ont remarqué des disques proto-planétaires dans lesquels des planètes comme l'a notre sont formées. Depuis 1995, les astronomes ont découvert des exo planètes ou des planètes extrasolaires - des planètes autour d'étoiles comme le Soleil. C'est une preuve indéniable que les planètes sont des sous-produits du processus de formation des étoiles. Il existe la possibilité qu'il y ait beaucoup de planètes comme la Terre dans l'Univers.

Bibliographie

- Bennett, Jeffrey et al, The Essential Cosmic Perspective, Addison-Wesley; one of the best of the many available textbooks in introductory astronomy, 2005.
- Kaler, James B, The Cambridge Encyclopaedia of Stars, Cambridge Univ. Press, 2006.
- Percy, J.R, Understanding Variable Star, Cambridge University Press, 2007

Sources Internet

American Association of Variable Star Observers. <http://www.aavso.org>. Education project: <http://www.aavso.org/vsa>

Chandra X-Ray Satellite webpage. http://chandra.harvard.edu/edu/formal/stellar_ev/

Kaler's "stellar" website. <http://stars.astro.illinois.edu/sow/sowlist.html>

Stellar Evolution on Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_evolution

Cosmologie

Julieta Fierro, Beatriz García, Susana Deustua

International Astronomical Union, Universidad Nacional Autónoma de México (México DF, México), National Technological University (Mendoza, Argentina), Space Telescope Science Institute (Baltimore, United States)

Résumé

Bien que chaque corps céleste ait son propre charme, la compréhension de l'évolution de l'univers est un sujet fascinant lui-même. Même si nous sommes ancrés dans le voisinage de la Terre, c'est captivant pour comprendre que nous pouvons en savoir plus sur l'Univers.

Au XIXe siècle, l'astronomie s'est concentrée sur le catalogage des propriétés des objets célestes individuelles: planètes, étoiles, nébuleuses et galaxies. À la fin du XXe siècle, cependant, l'attention a changé pour comprendre les catégories d'objets: les étoiles, les galaxies et la structure de l'Univers. Nous savons maintenant quel est l'âge et l'histoire de l'univers et nous connaissons que l'expansion s'accélère, mais nous ne savons toujours pas quelle est la nature de la matière noire. De nouvelles découvertes continuent d'être faites.

Nous allons d'abord décrire quelques propriétés des galaxies. Plus tard, nous aborderons ce que l'on appelle le modèle standard ou Big Bang, et quelles sont les preuves qui soutiennent ce modèle.

Objectifs

- Comprendre comment l'Univers a évolué depuis le Big Bang jusqu'à aujourd'hui.
- Savoir comment sont organisées la matière et l'énergie dans l'Univers
- Analyser comment les astronomes apprennent l'histoire de l'Univers

.....

Galaxies

Les galaxies se composent d'étoiles, de gaz, de la poussière et de matière noire peut être très vaste, avec plus de 300 000 années-lumière à travers. La galaxie dont le soleil contient cent milliards (100 000 000 000) étoiles. Dans l'univers il y a des milliards de ces galaxies.

Notre galaxie est une grande galaxie spirale, similaire au galaxie d'Andromède qui est dans l'image. Au Soleil il prend 200 millions d'années à tourner autour du centre, se déplaçant à 250 kilomètres par seconde. Étant donné que notre système solaire fait partie

d'un disque de la galaxie, nous ne pouvons pas voir toute la galaxie; Il est comme essayer de peindre une forêt quand nous sommes au milieu de celui-ci. Notre galaxie est appelée la Voie Lactée. À l'œil nu de la Terre, nous pouvons voir beaucoup d'étoiles individuelles et une bande élargie composée d'un grand nombre d'étoiles et des nuages interstellaires composé de gaz et de poussières. La structure de notre galaxie a été découverte après observations avec des télescopes optiques, radiotélescopes et l'observation d'autres galaxies. (Si vous ne disposez pas des miroirs, on peut imaginer comment les autres à regarder le spectacle). Nous utilisons les ondes radio qu'ils passent à travers les nuages



Fig. 1a: Galaxie d'Andromède. Galaxie spirale très semblable à la nôtre la voie lactée. Le Soleil est au bord extérieur d'un des bras de notre galaxie. (Photo: Bill Schoening, programme Vanessa Harvey / REU / NOAO / AURA / NSF) .Fig.1b: Grand nuage de Magellan. Galaxie irrégulière satellite de la Voie Lactée qui peut être observée à l'œil nu depuis l'hémisphère sud. (Photo: ESA et Eckhard Slawik).

qui sont opaques pour la lumière, comme on peut utiliser un téléphone mobile à l'intérieur d'un bâtiment.

Nous classons les galaxies en trois catégories. Les galaxies irrégulières, sont les plus petites, mais plus nombreux, sont généralement riches en poussière et elles sont en même temps des pépinières de nouvelles étoiles. Beaucoup de ces galaxies sont des satellites d'autres galaxies. La Voie Lactée possède 30 galaxies satellites les premières qui ont été découvertes sont les nuages de Magellan, observables depuis l'hémisphère sud.

Les galaxies spirales, comme la nôtre, ont généralement deux spirales torsadées autour de la partie centrale, appelée noyau. Ces galaxies ont tendance à avoir un

trou noir au centre avec une masse des millions de fois plus grande que le Soleil. De nouvelles étoiles sont nées surtout dans les bras des galaxies parce que la densité plus élevée de la matière interstellaire, peut entraîner par rétrécir, la naissance des étoiles.

Quand un trou noir dans le noyau galactique attire des nuages de gaz ou des étoiles, le matériau est chauffé avant la chute dans le trou noir et une partie de celui-ci sous la forme de jets incandescents se déplace à travers l'espace, chauffer l'espace intergalactique. On parle de noyaux galactiques actifs, un grand nombre de galaxies spirales ayant de tels noyaux.

Les plus grandes galaxies sont elliptiques (bien qu'il y ait de petites galaxies elliptiques). On croit que ceux-ci, comme les galaxies spirales géantes, sont formés lorsque de plus petites galaxies fusionnent. Certains arguments en faveur de cette hypothèse vient de la diversité

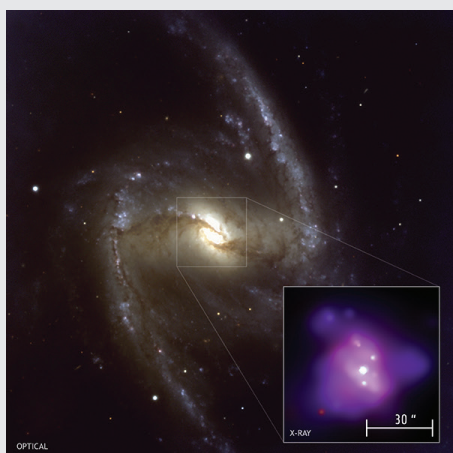


Fig. 2a: Image optique de la galaxie NGC 1365 prise par les instruments du VLT (l'ESO) et image de Chandra du matériau radiographique proche du trou noir central. (Photo: NASA, ESA, la collaboration Hubble Heritage (STScI / AURA) -ESA / Hubble, et A. Evans). Fig. 2b - un système de deux galaxies interagissant dans un processus très spectaculaire. Les noyaux fusionnent, et une queue bleue est libérée (crédit: NASE, ESA et l'équipe patrimoniale hubble (STScI))

des âges et des compositions chimiques des différents groupes d'étoiles dans la galaxie combinée. Les galaxies forment des amas de galaxies avec des milliers de composants. Les galaxies elliptiques géantes sont généralement dans les centres des amas et ont parfois deux centres en raison de la combinaison récente de deux galaxies.

Amas et super-amas de galaxies sont distribués dans l'Univers dans des structures filamenteuses qui entourent les vastes régions dépourvues de galaxies. C'est



Fig. 3: Abell 2218 amas de galaxies. Les arcs peuvent être vus, causés par un effet de lentilles gravitationnelles. (Photo: NASA, ESA, Richard Ellis (Caltech) et Jean-Paul Kneib (Observatoire Midi-Pyrénées, France)).

comme si l'Univers à grande échelle est un bain de bulles où les galaxies sont sur les surfaces des bulles.

Cosmologie

Nous décrivons certaines propriétés de l'Univers dans lequel nous vivons. L'Univers est composé de matière, de l'énergie et de l'espace et évolue au fil du temps. Ses dimensions temporelles et spatiales sont beaucoup plus grandes que ce que nous utilisons dans la vie quotidienne.

Cosmologie tente de répondre à des questions fondamentales sur l'Univers: D'où nous venons? Quel est l'avenir de l'Univers? Quelle est notre place dans cet Univers? Quel est l'âge de l'univers?

Il est intéressant de noter que la science évolue. Plus nous en savons, plus nous nous rendons compte à que nous savons moins. Une carte est utile même si elle est seulement une représentation d'un lieu, comme par la science, nous avons une représentation de la nature, nous pouvons voir certains aspects de celle-ci et d'anticiper les événements, toutes basées sur des hypothèses raisonnables à confirmer des mesures et des

données d'observation.

Les dimensions de l'Univers

Les distances entre les étoiles sont énormes. La Terre est à 150 millions de kilomètres distance du Soleil, Pluton est 40 fois plus loin. L'étoile la plus proche est 280.000 fois plus loin et la galaxie la plus proche est de 10 milliards de fois plus. La structure des galaxies filamentaire est de 10000000000000 fois (un suivi de 12 zéros) supérieure à la distance de la Terre au Soleil.

L'âge de L'Univers

Notre Univers est né il y a 13,7 milliards (13 700 000 000) d'années. Le système solaire était formé beaucoup plus tard, maintenant 4,6 milliards (4,600,000,000) ans. La vie sur Terre est apparue 3,8 milliards (3 800 000 000) d'années, et l'extinction des dinosaures est survenue il y a 65 millions d'années. Les gens modernes sont apparus il y a environ 150 000 ans.

Nous avons des raisons rationnelles de croire que notre Univers a pris naissance dans le temps parce que nous remarquons qu'il se développe rapidement. Cela signifie que toutes les galaxies se déplacent l'une par rapport à l'autre, et plus la distance est longue, plus le mouvement est rapide. Si nous avons mesuré le taux d'expansion, nous pourrions estimer quand ils avaient la même position dans l'espace. Par calcul, nous obtenons 13,7 milliards d'années. Cet âge ne contredit pas l'évolution stellaire, parce que nous n'observerons pas des étoiles ou des galaxies de plus de 13,5 milliards d'années. L'événement à partir duquel l'expansion de l'univers a commencé est connu comme le Big Bang.

La mesure de la vitesse

Nous pouvons mesurer la vitesse d'une étoile ou d'une galaxie en utilisant l'effet Doppler. Dans la vie quotidienne nous expérimentons l'effet Doppler lorsque nous entendons le changement de ton des sirènes d'ambulances ou de la police en approchant ou en s'éloignant. Une expérience simple est de placer un réveil dans un sac avec de longues poignées. Si quelqu'un roule le sac sur sa tête, nous pouvons sentir le changement de ton quand l'horloge pointe vers nous ou s'éloigne par nous. La vitesse d'horloge peut être calculée en écoutant le changement de ton qui est d'autant plus que la vitesse est plus élevée.

La lumière émise par les objets célestes subit un changement dans la fréquence ou la couleur qui peut être mesuré par la vitesse à laquelle ils s'approchent ou sont enlevés. La longueur d'onde augmente (passe au rouge) si la distance augmente ou baisse (passe au bleu) si l'objet céleste s'approche.

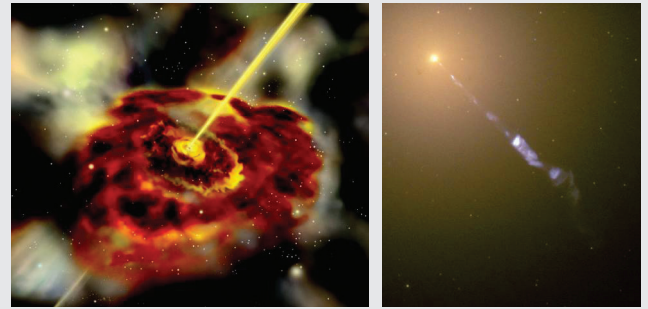


Fig. 4a: Illustration artistique d'un trou noir au centre d'une galaxie. (Photo: NASA E / PO - Sonoma State Univ.). Fig 4b: Galaxy M87, un exemple de vraie galaxie un jet. (Photo: NASA et Hubble Heritage Team).

Quand l'Univers était plus compact, les ondes sonores qui le traversaient étaient produites dans des régions avec une densité plus élevée ou plus faible. Les essaims super galactiques ont été formés là-bas où la densité de la matière était plus élevée. Comme l'Univers se dilate, l'espace entre les régions à haute densité ont augmenté en taille et en volume. La structure filamentaire de l'Univers est une conséquence de son expansion.

Les ondes sonores

Le son peut traverser des environnements comme l'air, l'eau ou le bois. Lorsque nous produisons un son, nous générons une onde qui comprime le matériau qui l'entoure. Ces ondes traversent l'environnement à l'intérieur de notre oreille et compriment le tympan qui envoie le son aux cellules nerveuses sensibles à ces excitations. Nous ne pouvons pas entendre les jets de soleil ou les tempêtes sur Jupiter, car l'espace entre les corps célestes est pratiquement vide et les ondes sonores ne peuvent pas se propager en l'absence d'un environnement matériel.

Il est à noter qu'il n'y a pas de centre de l'expansion de l'Univers. En utilisant une analogie bidimensionnelle, nous pouvons imaginer que nous sommes à Paris au siège de l'UNESCO et que la Terre est en expansion. Nous pouvons remarquer que toutes les villes se déplacent et nous n'avons aucune raison de dire que nous sommes au centre de l'expansion, parce que tous les autres habitants observeraient la même chose.

Toutes les informations provenant du cosmos nous parviennent depuis longtemps, alors nous voyons les étoiles telles qu'elles étaient dans le passé, pas comme elles le sont aujourd'hui. Il y a des objets à une telle distance que la lumière qu'ils émettent n'est pas encore arrivée à nous donc nous ne pouvons pas encore les voir. Cela ne signifie pas qu'ils ne sont pas là, mais qu'ils se sont simplement formés après que le rayon-

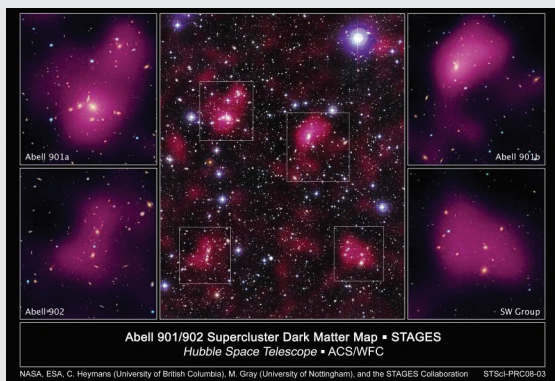


Fig. 5: À ce jour, plus de 300 nuages de poussières et de gaz sombres et denses ont été localisés, où des processus de formation d'étoiles se produisent. Super Cluster Abell 90/902. (Photo: télescope spatial Hubble, NASA, ESA, C. Heymans (Université de la Colombie-Britannique) et M. Gray (Université de Nottingham)).

nement de cette région du ciel a commencé venir chez nous

Le fait que la vitesse de la lumière soit finie a des implications en astronomie. Les distorsions de l'espace affectent la trajectoire de la lumière, donc si nous voyons une galaxie dans un endroit particulier, elle ne peut plus être là, car la courbure de l'espace a changé. De plus, une étoile n'est plus là où elle est observée car elle bouge. Je ne la vois plus maintenant. Nous verrons toujours les objets célestes tels qu'ils étaient, et plus ils sont éloignés, plus nous les voyons après un temps plus long. Donc, analyser des objets similaires à des distances différentes est équivalent à voir le même objet à différents moments de son évolution. En d'autres termes, nous pouvons voir l'histoire des étoiles si nous observons des types similaires à différentes distances.

Nous ne pouvons pas voir le bord de l'Univers, parce que la lumière n'a pas eu le temps d'atteindre la Terre. Notre Univers est de taille infinie, mais nous ne voyons qu'une section à part avec le rayonnement de 13,7 milliards d'années-lumière, parce que la lumière a eu le temps de nous atteindre du Big Bang. Une source émet de la lumière dans toutes les directions, donc dans les différentes régions de l'Univers, nous pouvons la voir à différents moments de son existence. Nous voyons tous les objets célestes tels qu'ils étaient quand ils ont émis la lumière que nous voyons maintenant, parce qu'elle doit passer un temps fini jusqu'à ce qu'elle nous arrive. Cela ne signifie pas que nous avons une position privilégiée dans l'Univers, tout observateur dans une autre galaxie peut voir quelque chose d'équivalent à ce que nous détectons.

Comme dans toutes les sciences, dans l'astronomie et l'astrophysique, plus nous en savons sur notre Univers,

plus des questions sont ouvertes. Ensuite, nous discuterons de la matière sombre et de l'énergie sombre pour avoir une idée de la façon dont nous ne savons tout de l'Univers.

La matière sombre (ou noire) n'interagit pas avec le rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire qu'elle n'absorbe ni émet pas d'énergie. La matière typique, comme dans les étoiles, peut produire de la lumière ou l'absorber, comme c'est le cas avec les nuages de poussière interstellaires. La matière sombre n'interagit pas avec aucun rayonnement, mais a une masse et exerce donc une attraction gravitationnelle. Elle a été découverte par ses effets sur le mouvement de la matière visible. Par exemple, si une galaxie se déplace autour d'un espace apparemment vide, nous sommes sûrs que quelque chose l'attire. Tout comme le système solaire est maintenu ensemble en raison de l'attraction gravitationnelle du Soleil qui maintient les planètes dans leurs orbites, la galaxie en question a une certaine orbite parce que quelque chose l'attire. Nous savons maintenant que la matière sombre est présente dans les galaxies individuelles, dans les essaims galactiques, et semble être la base de la structure filamentaire de la structure de l'Univers. En d'autres termes, la matière noire est le type de matière le plus commun dans l'Univers.

Nous savons aussi maintenant que l'expansion de l'Univers est accélérée. Cela signifie qu'il existe une force qui contrecarre les effets de la gravité. L'énergie sombre est le nom que les astronomes ont donné à ce phénomène récemment découvert. En l'absence d'énergie noire, l'expansion de l'Univers ralentirait.

Selon notre connaissance, le contenu d'énergie de l'Univers est de 74 pour cent de l'énergie sombre, la matière noire est de 22 pour cent et seulement 4 pour cent correspondent à la matière normale (ce qui correspond à toutes les galaxies, les étoiles, les planètes, etc.). En substance, la nature et les propriétés de 96 pour cent de l'Univers restent à être découverts

L'avenir de notre univers dépend du rapport entre la matière visible, d'une part et de la matière et l'énergie sombre, d'autre part. Avant la découverte de la matière noire et de l'énergie on a pensé que l'expansion s'arrêterait et la gravité va inverser l'expansion avec la contraction, ce qui conduira à un Big Crunch, tout reviendra à un seul point. Mais une fois l'existence de la matière noire établie, la théorie a été changée. Maintenant, l'expansion atteindra une valeur constante dans un temps infini. Connaissant l'existence de l'énergie sombre, nous nous attendons au futur à une expansion

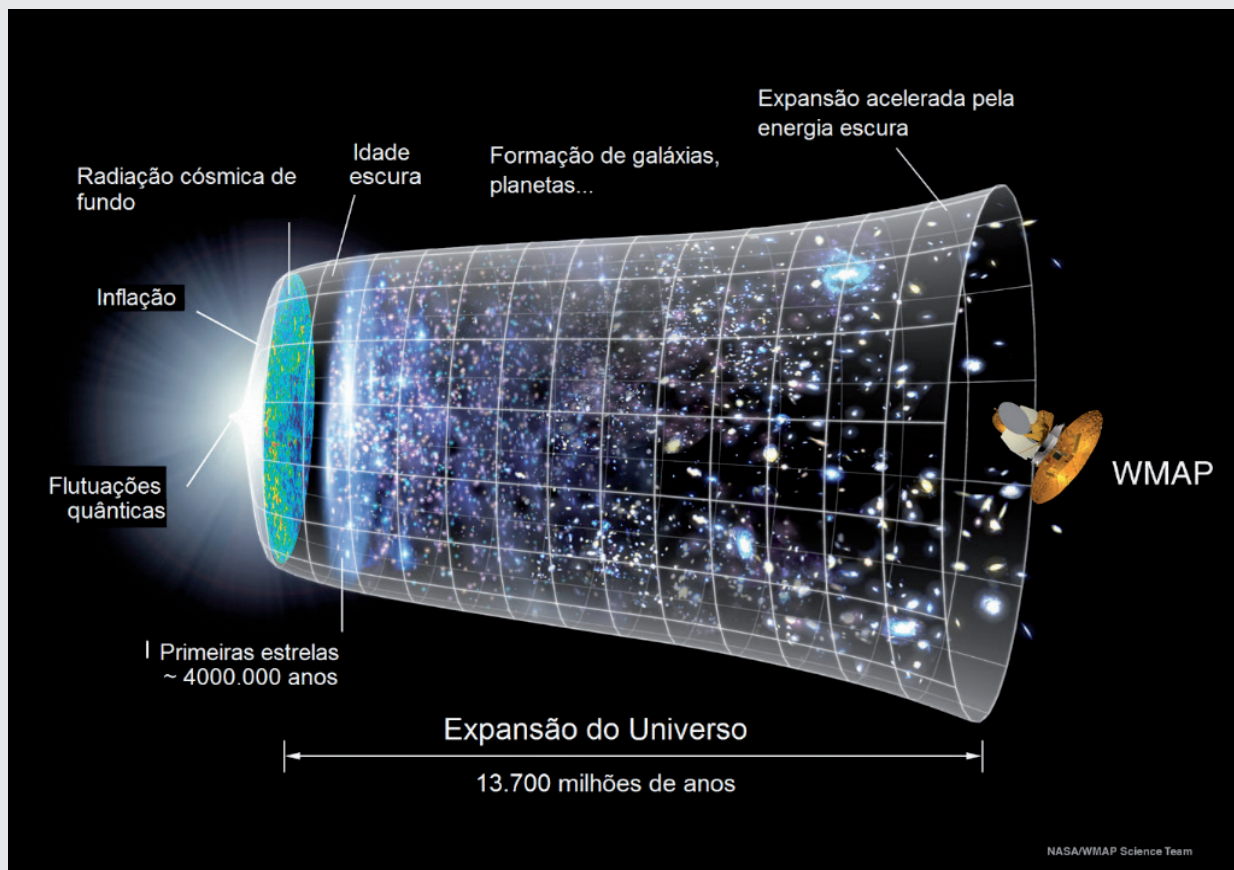


Fig. 6: Expansion de l'Univers. (Photo: NASA)

accélérée et l'Univers va augmenter en volume. La fin de l'Univers est très froide, très sombre et infinie au fil du temps.

Bibliographie

Greene, B., *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality* (2006) / *El tejido del cosmos* (2010)

Fierro, J., *La Astronomía de México*, Lectorum, México, 2001.

Fierro, J, Montoya, L., “La esfera celeste en una pece-
ra”, *El Correo del Maestro*, núm 47, p.10-17, México, 2000.

Fierro J, Domínguez, H, *Albert Einstein: un científico de nuestro tiempo*, Lectorum, México, 2005.

Fierro J, Domínguez, H, “La luz de las estrellas”, Lec-
torum, *El Correo del Maestro*, México, 2006.

Fierro J, Sánchez Valenzuela, A, *Cartas Astrales, Un romance científico del tercer tipo*, Alfaguara, 2006.

Thuan, Trinh Xuan, *El destino del universo: Después del big bang* (Biblioteca ilustrada) (2012) / *The Changing*

Universe: Big Bang and After (New Horizons) (1993).

Weinberg, Steven, *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*. Weinberg, Steven y Nestor Miguez, *Los tres primeros minutos del universo* (2009)

Sources Internet

The Universe Adventure, <http://www.universeadventure.org/> or <http://www.cpepweb.org>

Ned Wright's Cosmology Tutorial (in English, French and Italian) <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>

Histoire de l'astronomie

Jay Pasachoff, Magda Stavinschi, Mary Kay Hemmenway

L'Union Astronomique Internationale, le Collège Williams (Massachusetts, États-Unis), l'Institut Astronomique de l'Académie Roumaine (Bucarest, Roumanie), l'Université de Texas (Austin, États-Unis)

Résumé

Cette courte étude de l'histoire de l'astronomie donne un bref aperçu de la nature omniprésente de l'astronomie à ses origines, suivie d'un résumé des événements clés du développement de l'astronomie dans l'Europe occidentale jusqu'à l'époque d'Isaac Newton

Objectifs

- Donner un aperçu schématique de l'histoire de l'astronomie dans différentes régions du monde, afin de montrer que l'astronomie a toujours intéressé tous les peuples.
- Énumérer les principales figures de l'histoire de l'astronomie qui ont contribué à des changements majeurs dans l'approche de cette discipline jusqu'à Newton: Tycho Brahe, Copernic, Kepler et Galileo..
- Les contraintes de temps de la conférence nous empêchent de développer l'histoire de l'astronomie de nos jours, mais vous trouverez plus de détails dans les autres chapitres de ce livre.

Préhistoire

Avec un ciel sombre, les peuples anciens pouvaient voir les étoiles se lever à l'est du ciel, se déplacer vers le haut et se coucher à l'ouest. Dans un sens, les étoiles se déplaçaient en petits cercles. Aujourd'hui, lorsque nous regardons vers le nord, nous voyons une étoile à cette position: l'Étoile Polaire ou Polaris. Ce n'est pas une étoile très brillante: 48 étoiles dans le ciel sont plus brillantes que celle-ci, mais il se trouve que cette étoile est dans un endroit intéressant. Dans les temps anciens, d'autres étoiles étaient alignées sur le pôle nord de la Terre ou, parfois, il n'y en avait pas à proximité du pôle.

Comme les gens regardaient le ciel bien souvent, ils ont remarqué que quelques-uns des objets les plus brillants ne se levaient pas et ne se couchaient pas exactement comme les étoiles. Bien sûr, la Lune était de loin l'objet le plus brillant du ciel nocturne. Elle se levait presque

une heure plus tard chaque nuit et elle apparaissait sur un fond différent d'étoiles. Sa forme a également changé ce que nous appelons maintenant les phases de la Lune.

Mais certaines de ces lumières dans le ciel se sont déplacées différemment des autres. Celles-ci ont été appelées des vagabonds, ou des planètes par les Grecs. Pratiquement, toutes les civilisations de la Terre ont remarqué et nommé ces objets.

Certains peuples anciens ont construit des monuments tels que de grosses pierres en cercle, comme Stonehenge en Angleterre ou des tombeaux tels que ceux de Minorque en Espagne alignés avec la Croix du Sud, l'an 1000 av. J.-C. Les Babyloniens étaient de grands enregistreurs de phénomènes astronomiques, mais les Grecs ont réalisé les connaissances pour tenter "d'expliquer" le ciel.

Les Grecs anciens

La plupart des Grecs anciens, y compris Aristote (384 av. J.-C. - 322 av. J.-C.), pensaient que la Terre était au centre de l'univers et qu'elle était composée de quatre éléments: Terre, Air, Feu et Eau. Autour de la Terre il y avait un cinquième élément, l'éther (ou quintessence), grâce auquel la lumière se propageait dans le ciel.

Comment ces vagabonds (planètes) se sont-ils déplacés parmi les étoiles? La plupart du temps, ils allaient dans la même direction que les étoiles: ils se levaient à l'est et se dirigeaient vers l'ouest. Mais parfois, ils semblaient faire une pause et reculer par rapport aux étoiles. Ce mouvement en arrière est appelé mouvement "rétrograde", pour le distinguer du mouvement en avant, appelé "prograde".

L'astronome grec Claude Ptolémée (environ 90 apr. J.-C. - environ 168 apr. J.-C.) a travaillé à Alexandrie en Afrique du Nord au deuxième siècle de notre ère. Ptolémée voulait pouvoir prédire la position des planètes et a proposé une solution mathématique. Après Aristote, il plaça la Terre au centre de l'univers. La Lune et

les planètes la contournent dans des cercles concentriques qui se sont agrandis avec la distance de la Terre. Et si les planètes bougent vraiment sur de petits cercles dont les centres sont sur les grands cercles? Ensuite, sur certains des mouvements des petits cercles, ils avanceraient plus vite que les centres de ces cercles et nous sur Terre, nous verrions les planètes reculer. cêntricos que aumentavam com a distância. Ces petits cercles sont appelés "épicycles" et les grands cercles sont appelés "déférents". L'idée de Ptolémée selon laquelle les cercles se déplacent sur des cercles a dominé la science occidentale pendant plus de mille ans. Passer de l'observation à la théorie en utilisant les mathématiques était une étape unique et importante dans le développement de la science occidentale.

Bien qu'elles n'aient pas eu les mêmes noms pour les objets qu'ils ont observés, pratiquement toutes les cultures de la Terre ont observé le ciel. Elles ont utilisé ces informations pour établir des calendriers et prévoir les cycles saisonniers de plantation, de récolte ou de chasse, ainsi que les cérémonies religieuses. Comme les Grecs, certains de ces peuples anciens ont développé des calculs mathématiques très sophistiqués pour prédire les mouvements des planètes ou des éclipses, mais cela ne signifie pas qu'ils ont tenté ce que nous appellerions une théorie scientifique. Voici quelques exemples dans les paragraphes suivantes.

Afrique

Le cercle de pierres à Nabta, dans le désert nubien, date de 1000 ans avant Stonehenge. Les Égyptiens ont utilisé l'astronomie pour aligner les pyramides et pour élargir leurs croyances religieuses en intégrant leur connaissances des étoiles. Les pétroglyphes de Namoratunga (Kenya) ressemblent aux races des bétail actuelles. La connaissance sur les étoiles provient de toutes les régions de l'Afrique, de la région Dogon au Mali, à l'Afrique de l'Ouest, l'Éthiopie et l'Afrique du Sud.

Astronomie islamique

De nombreuses connaissances astronomiques ont été obtenues dans le monde islamique, en particulier au cours de l'âge d'or islamique (VIIIe-XVe siècles) et principalement écrits en arabe. Elles ont été développées principalement au Moyen-Orient, en Asie centrale, à Al-Andalus, en Afrique du Nord, puis en Extrême-Orient et en Inde. Un nombre important d'étoiles dans le ciel, telles que Aldebaran et Altair, et des termes astronomiques tels qu'alidade, azimuth, almicantrat sont encore désignés par leurs noms arabes. Les Arabes ont inventé les chiffres arabes, y compris

l'utilisation de zéro. Ils étaient intéressés à trouver des positions et l'heure du jour (car c'était utile pour les services de prière). Ils ont également fait de nombreuses découvertes en optique. De nombreuses œuvres en grec ont été préservées pour la postérité grâce à leurs traductions en arabe.

Les premières observations systématiques dans l'Islam auraient eu lieu sous le patronage d'AlMaâmun (786-833 de notre ère). Dans son observatoire, et dans de nombreux autres observatoires privés, de Damas à Bagdad, on a mesuré les degrés de méridien, on a établi les paramètres solaires et on a fait des observations



Fig. 1: Astrolabe Arabe

détaillées du Soleil, de la Lune et des planètes. Les instruments utilisés par l'astronomie islamique étaient les suivants: globes célestes et sphères armillaires, astrolabes, cadrans solaires et quadrants.

Les Amériques

Amérique du Nord

Les peuples autochtones de l'Amérique du Nord ont également nommé leurs constellations et ils ont raconté des histoires célestes transmises par la tradition orale. Certains artefacts, tels que des roues de pierre ou des alignements de bâtiments, demeurent des preuves de leur utilisation de l'astronomie dans la vie quotidienne.

Astronomie Maya

Les Mayas étaient une civilisation mésoaméricaine, connue pour la seule langue écrite pleinement développée connue des Amériques précolombiennes, ainsi que pour son art, son architecture, ses systèmes mathématiques et astronomiques. Initialement établies au cours de la période préclassique (de 2000 à 250 av. J.-C.), les villes mayas ont atteint leur stade de développement le plus élevé au cours de la période classique (de 250 à 900 apr. J.-C.) et il a continué tout au long de la période postclassique jusqu'à l'arrivée des espagnols.

Les peuples mayas n'auraient jamais disparu complètement et la période classique n'aurait pas connu le déclin si les conquistadors espagnols n'étaient pas arrivés et s'il n'y avait pas eu la colonisation espagnole ou le déclin si les conquistadors espagnols n'étaient pas arrivés et



Fig. 2: Chichén Itzá (Mexique) est un important vestige archéologique de l'astronomie maya.

s'il n'y avait pas eu la colonisation espagnole ultérieure des Amériques

L'astronomie maya est l'une des plus anciennes astronomies connues dans le monde, notamment en raison de son célèbre calendrier, interprété aujourd'hui, à tort, comme prédisant la fin du monde. Maya semble être la seule civilisation pré-télescopique à démontrer la connaissance de la nébuleuse d'Orion comme étant en extension et non pas un point stellaire précis.

Les Mayas étaient très intéressés par les passages zénithaux, le moment où le Soleil passe au zénith, directement au-dessus de la tête. Les latitudes de la plupart de leurs villes étant en dessous du Tropique du Cancer, ces passages zénithaux ont lieu deux fois par an à distance égale du solstice. Pour représenter cette position du Soleil au-dessus de leur tête, les Mayas avaient un dieu nommé le Dieu Descendant.

Vénus était l'objet astronomique le plus important pour les Mayas, encore plus important pour eux que le Soleil. Le calendrier maya est un système de calendriers et d'almanachs utilisés par la civilisation maya de la Méso-Amérique précolombienne et dans certaines communautés mayas modernes des hautes terres de Guatemala et d'Oaxaca, au Mexique.

Bien que les origines du calendrier mésoaméricain ne soient pas Mayas, ses extensions et raffinements Mayas ultérieurs sont les plus sophistiqués. Avec ceux des Aztèques, les calendriers mayas sont les mieux documentés et les mieux compris.

Astronomie Aztèque

Les Aztèques étaient certains groupes ethniques du

centre du Mexique, en particulier ceux qui parlaient le nahuatl et qui dominaient une grande partie de la Méso-Amérique aux XIV^e, XV^e et XVI^e siècles, période considérée comme la dernière période postclassique de la chronologie mésoaméricaine. Ils sont à l'origine des connaissances astronomiques.

La culture et l'histoire aztèques sont principalement connues grâce aux preuves archéologiques découvertes lors de fouilles telles que celles du célèbre Grand Temple à Mexico City et beaucoup d'autres, à partir des codex écrits en papier indigène sur l'écorce, des histoires des témoins oculaires comme les conquistadors espagnols ou des descriptions de la culture aztèque aux XVI^e et XVII^e siècles, des histoires écrites par des ecclésiastiques espagnols et par des Aztèques en espagnol ou en nahuatl.

Le calendrier aztèque, ou la Pierre du Soleil, est le premier monolithe restant de la culture préhispanique en Amérique centrale et en Amérique du Sud. On pense qu'il a été sculpté vers l'an 1479. Il s'agit d'un monolithe circulaire à quatre cercles concentriques. Au centre apparaît le visage de Tonatiuh (le Dieu Soleil), orné de jade et tenant un couteau dans sa bouche. Les quatre soleils ou "mondes" antérieurs sont représentés par des figures carrées flanquant le Cinquième Soleil, au centre. Le cercle extérieur comprend 20 zones représentant les jours de chacun des 18 mois composant le calendrier aztèque. Pour compléter l'année solaire de 365 jours, les Aztèques ont incorporé 5 jours sacrificiels, nommés Nemontemi.

Comme presque tous les peuples antiques, les Aztèques regroupaient en associations les étoiles apparentes brillantes (constellations): Mamalhuaztli (ceinture d'Orion), Tianquiztli (Les Pléiades), Citlaltlactli (Gémeaux), Citlalcoltl (Scorpion) et Xonecuilli (La Petite Ourse, ou la Croix du Sud pour les autres, etc.). Les comètes étaient appelées "les étoiles qui fument".

Les grandes périodes de la cosmologie aztèque sont définies par les époques de différents soleils, dont la fin a été déterminée par des catastrophes majeures telles que la destruction par des jaguars, des ouragans, un incendie, des inondations ou des tremblements de terre.

Astronomie Inca

La civilisation inca est un groupe andin précolombien de civilisation. Elle commence au début du 13^e siècle dans le bassin de Cuzco au Pérou et le courant se développe ensuite le long de l'océan Pacifique et des Andes, couvrant la partie occidentale de l'Amérique du Sud. À son apogée, elle s'étend de la Colombie à

l'Argentine et au Chili, en passant par l'Équateur, le Pérou et la Bolivie.

Les Incas considéraient leur roi, le Sapa Inca, comme "l'enfant du soleil". Ses membres ont identifié les différentes zones sombres ou nébuleuses sombres de la Voie Lactée aux animaux et ils ont associé leur apparence aux pluies saisonnières.

Les Incas utilisaient un calendrier solaire pour l'agriculture et un calendrier lunaire pour les fêtes religieuses. Selon les chroniques des conquistadors espagnols, à la périphérie de Cuzco, au Pérou actuel, il y avait un grand calendrier public composé de 12 colonnes de 5 mètres de haut, visibles de loin. Avec lui, les gens pouvaient fixer la date. Ils ont célébré deux grandes fêtes, l'Inti Raymi et le Capac Raymi, respectivement les solstices d'été et d'hiver.

Ils avaient leurs propres constellations: le Yutu (la Perdre) était la zone sombre de la Voie Lactée que nous appelons le Sac du Charbon. Ils ont appelé le groupe Pléiades Qollqa. Avec les étoiles de la constellation Lyra, ils ont fait le dessin d'un des animaux les plus célèbres et l'ont baptisé le Petit Lama Argenté ou Lama Coloré, dont l'étoile la plus brillante (Vega) était Urkuchillay, ou selon d'autres, ce fut le nom de toute la constellation. Il y avait aussi le Machacuay (le Serpent), le Hamp'at (le Crapaud), l'Atoq (le Renard), le Kuntur, etc.

Les grandes villes ont été dessinées en suivant les alignements célestes et en utilisant les points cardinaux.

À la périphérie de Cuzco, se trouvait un important temple dédié au Soleil (Inti), d'où provenaient des lignes de forme radiale qui divisaient la vallée en 328 temples. Ce nombre est toujours un mystère, mais une explication possible le relie à l'astronomie: il coïncide avec les jours contenant douze mois lunaires. Et les 37 jours qui manquent jusqu'aux 365 jours de l'année solaire coïncident avec les jours où le groupe de Pléiades n'est pas observable de Cuzco.

Inde

La première mention astronomique textuelle donnée dans la littérature religieuse de l'Inde (2e millénaire avant notre ère) est devenue une tradition établie dès le premier millénaire avant notre ère, lorsque les différentes branches auxiliaires de l'apprentissage ont commencé à prendre forme.

Au cours des siècles suivants, un certain nombre d'astronomes indiens ont étudié divers aspects des

sciences astronomiques, puis un discours global avec d'autres cultures a suivi de la. Les gnomons et les sphères armillaires étaient des instruments courants.

Le calendrier hindou utilisé dans l'Antiquité a subi de nombreux changements dans le processus de régionalisation. Il existe aujourd'hui plusieurs calendriers régionaux indiens, ainsi qu'un calendrier national indien. Dans le calendrier hindou, la journée commence avec le lever du soleil local. On lui attribue cinq "propriétés", appelées angas.

L'écliptique est divisée en 27 nakshatras, que l'on appelle aussi maisons lunaires ou astérismes. Celles-ci reflètent le cycle de la lune contre les étoiles fixes, 27 jours et 72 heures, la partie fractionnelle étant compensée par un 28e nakshatra intercalaire. Le calcul de Nakshatra semble avoir été bien connu à l'époque de Rig Veda (2e au 1er millénaire avant notre ère).

Chine

Avant les Arabes, les Chinois étaient considérés comme les observateurs les plus persistants et les plus précis des phénomènes célestes dans le monde entier. Les enregistrements détaillés d'observations astronomiques ont commencé au cours de la période des Royaumes combattants (4ème siècle avant notre ère) et ont prospéré à partir de la période Han.

Certains éléments de l'astronomie indienne ont atteint la Chine avec l'expansion du bouddhisme au cours de la dernière dynastie des Han (25-220 de notre ère), mais l'incorporation la plus détaillée de la pensée astronomique indienne s'est déroulée pendant la dynastie Tang (618-907).

L'astronomie a été revitalisée sous l'impulsion de la cosmologie et de la technologie occidentales après que les jésuites eurent établi leurs missions. Le télescope a été introduit au 17ème siècle. Les équipements et les innovations utilisés par l'astronomie chinoise sont: la sphère armillaire, le globe céleste, la sphère armillaire à eau et la tour du globe céleste

L'astronomie chinoise était davantage axée sur les observations que sur la théorie. Selon les écrits des jésuites, qui se sont rendus à Pékin au 17ème siècle, les Chinois possédaient des données datant de 4 000 ans avant notre ère, notamment l'explosion de supernovas, les éclipses et l'apparition de comètes

En 2300 avant notre ère, ils ont mis au point le premier calendrier solaire connu et, en 2100 avant notre ère, ils ont enregistré une éclipse solaire. En 1200 avant notre ère, ils ont décrit les taches solaires en les qualifiant

de "taches sombres" au soleil. En 532 avant notre ère, ils ont laissé la preuve de l'émergence d'une étoile de supernova dans la constellation de l'Aquila et des passages de la comète de Halley en 240 et 164 avant notre ère. En 100 avant notre ère, les Chinois ont inventé la boussole avec laquelle ils ont indiqué la direction nord.

Et plus récemment, ils ont déterminé la précession des équinoxes d'un degré tous les 50 ans, ils ont enregistré plusieurs supernovae et ils ont constaté que la queue des comètes pointait toujours dans la direction opposée à celle du Soleil.

En l'an 1006 de notre ère, ils remarquèrent l'apparition d'une supernova si brillante que l'on pouvait voir pendant la journée. C'est la supernova la plus brillante qui ait été rapportée. Et en 1054, ils ont observé une supernova dont les restes s'appelleraient plus tard la nébuleuse du Crabe.

Leur sphère céleste diffère de la sphère occidentale. L'équateur céleste était divisé en 28 parties, appelées "maisons" et il y avait un total de 284 constellations portant des noms tels que l'Ourse, les Trois Marches, le Palais Suprême, le Tripode, le Javelot ou l'Harpon. Le Nouvel An chinois commence le jour de la première nouvelle lune après l'entrée du Soleil dans la constellation du Verseau.

Le scientifique chinois Shen Kuo (1031-1095 de notre ère), un esprit universel, a été non seulement le premier à décrire le compas à aiguilles magnétiques, mais il a également effectué une mesure plus précise de la distance entre l'Étoile Polaire et le vrai Nord pouvant être utilisé pour la navigation. Shen Kuo et Wei Pu ont également mis en place un projet d'observation astronomique nocturne sur une période de cinq années consécutives, un travail intensif qui pourrait même rivaliser avec le travail ultérieur de Tycho Brahe en Europe. Ils ont également cartographié les coordonnées exactes des planètes sur une carte des étoiles pour ce projet et ont créé des théories sur le mouvement planétaire, y compris le mouvement rétrograde.

Europe de l'Ouest

Après la chute de Rome, les connaissances acquises par les Grecs étaient à peine transmises par le travail de moines qui copiaient souvent des manuscrits sans signification pour eux. Finalement, avec la montée des écoles autour des cathédrales et des premières universités, les érudits ont commencé à s'attaquer aux énigmes de la science. Par le biais du commerce (et du pillage), de nouveaux manuscrits venus de l'Est sont parvenus lors des croisades et le contact avec des érudits islami-

ques (notamment en Espagne) a permis la traduction en latin. Certains spécialistes ont tenté de rassembler les informations dans un ordre qui les intégrerait dans leur point de vue chrétien.

Génie mathématique: Nicholas Copernic de Pologne

Au début des années 1500, Nicholas Copernic (1473 - 1543) a conclu que l'Univers serait plus simple si le Soleil, plutôt que la Terre, était en son centre. Alors le mouvement rétrograde des planètes se produirait même si toutes les planètes tournaient simplement autour du Soleil. Le mouvement en arrière serait une illusion optique résultant de notre passage devant une autre planète. De même, si vous regardez la voiture à votre droite alors que vous êtes tous les deux arrêtés à un feu de signalisation, si vous commencez à vous déplacer le premier, vous pourriez brièvement penser que l'autre voiture recule.

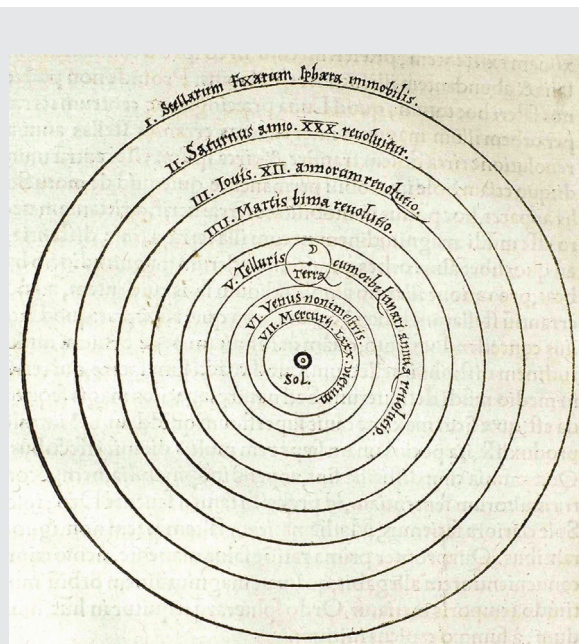


Fig. 3: Le diagramme de Copernic montre d'abord le soleil au centre de ce que nous appelons maintenant le système solaire. Ce diagramme est issu de la première édition de *Revolutionibus Orbium Coelestium*, publiée en 1543.

Copernic a partagé ses idées avec les mathématiciens, mais il ne les a pas publiées avant qu'un jeune scientifique, Georg Rheticus, l'ait convaincu et il a organisé la publication dans une autre ville. Une copie imprimée de *De Revolutionibus Orbium Coelestium* est arrivée au moment de la mort de Copernic en 1543. Il n'a peut-être jamais vu la préface non signée de l'éditeur suggérant que le livre était un moyen mathématique de calculer les positions, et non la vérité réelle. Après Aristote, Copernic utilisait des cercles et ajoutait des épicycles. Son livre suivait la structure du livre de Pto-



Fig 4. Premier diagramme copernicien en anglais, de l'annexe de Thomas Digges à Une pronostique éternelle, un livre de son père, publié pour la première fois en 1556. Il ne contenait qu'un diagramme ptolémaïque. L'appendice de Thomas Digges est apparu pour la première fois en 1576; ce diagramme provient de l'impression de 1596

lémée, mais sa passion pour la simplicité mathématique était influencée par Pythagore.

Le livre de Copernic contient (figure 3) peut-être le schéma le plus célèbre de l'histoire des sciences. Il montre le soleil au centre d'une série de cercles. Copernic a calculé les vitesses auxquelles les planètes tournaient autour du Soleil, sachant la quelle était la plus rapide du ciel. Ainsi, il a placé les planètes dans le bon ordre: Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, et les distances relatives des planètes ont également été correctes. Mais ses calculs ne prédisaient pas beaucoup mieux la position des planètes que la méthode de Ptolémée.

En Angleterre, Leonard Digges a écrit un livre en anglais sur la Terre et l'Univers. En 1576, son fils Thomas écrivit une annexe dans laquelle il décrivait les nouvelles idées de Copernic. En annexe, la version anglaise du diagramme de Copernic est apparue pour la première fois (figure 4). Digges a également montré les étoiles à différentes distances du système solaire, pas seulement dans une sphère céleste.

Génie des observations: Tycho Brahe du Danemark

L'aristocrate danois Tycho Brahe (1546-1601) s'empare

d'une île au large de Copenhague et perçoit le loyer de ses habitants. Sur cette île, Hven, il a utilisé sa richesse pour construire un grand observatoire doté d'instruments plus grands et de meilleure qualité. Bien qu'il s'agisse d'instruments pré-télescopiques, ils permettaient des mesures de la position des étoiles et des planètes, plus précises que les précédents.

Tycho a dirigé sa maison comme une des 'universités d'aujourd'hui, avec des scientifiques invités venant travailler avec lui. Il fabrique de mieux en mieux des dispositifs d'observation pour mesurer la position des étoiles et des planètes et il tient des registres précis

Mais dans son zèle scientifique, il a négligé certains de ses devoirs envers son monarque et lorsqu'un nouveau roi et une nouvelle reine sont apparus, il a été contraint de partir. Il a choisi de s'installer à Prague, sur le continent européen, avec ses presses à imprimer et ses pages déjà imprimées, ses disques et ses outils amovibles.

Tycho a réussi à améliorer la précision des observations scientifiques. Ses observations précises d'une comète à différentes distances lui ont montré qu'il n'était pas nécessaire que les sphères doivent être concentrique avec

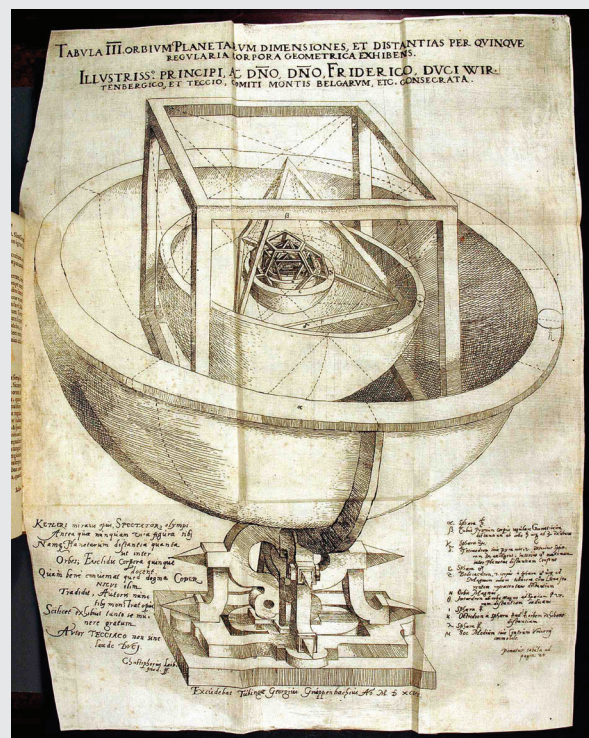


Fig. 5: Diagramme de Kepler tiré de son *Mysterium Cosmographicum* (Mystère du Cosmos), publié en 1596. Dans la décennie suivante, ses réflexions sur la disposition géométrique du système solaire furent remplacées par ses dispositions des planètes selon les deux premières de ses trois lois de mouvement planétaire, un système que nous tenons valable jusqu'aujourd'hui.

la Terre au centre. Il a donc créé son propre modèle d'univers, hybride entre celui de Ptolémée et celui de Copernic: le soleil et la lune tournent autour de la Terre, tandis que les autres planètes tournent autour du soleil. Tycho avait toujours des cercles, mais contrairement à Aristote, il les laissait se croiser.

Nous apprécions Tycho principalement pour l'observation de haute qualité des positions de la planète Mars parmi les étoiles. Pour le rejoindre à Prague, Tycho a invité un jeune mathématicien, Johannes Kepler. C'est grâce à Kepler que demeure, en grande partie, la renommée de Tycho.

Utilisateur de mathématiques: Johannes Kepler de l'Allemagne

En tant qu'enseignant à Graz, en Autriche, le jeune Johannes Kepler (1571-1630) se souvint de son intérêt pour l'astronomie depuis son enfance, favorisé par une comète et l'éclipse lunaire qu'il avait vue. Il s'est rendu compte qu'il y avait cinq formes solides constituées de côtés de forme égale et que si ces solides étaient imbriqués et séparés par des sphères, ils pourraient correspondre aux six planètes connues. Son livre, *Mysterium Cosmographicum*, sur le sujet Le mystère du cosmos, publié en 1596, contenait l'un des plus beaux diagrammes de l'histoire des sciences (figure 5). Dans celui-ci, il a niché un octaèdre, un icosaèdre, un dodécaèdre, un tétraèdre et un cube, avec respectivement huit, douze, vingt, quatre et six côtés pour montrer l'espacement des planètes connues à l'époque. Le diagramme, bien que très beau, est complètement faux.

Mais le talent mathématique de Kepler lui valut une interview avec Tycho. En 1600, il devint l'un des assistants de Tycho et il a fait des calculs à l'aide des données recueillies par Tycho. Ensuite, Tycho se rendit à un dîner officiel où il but librement. Il semble que l'étiquette l'empêcha de quitter la table et il se retrouva avec une vessie éclatée. Sa mort rapide et douloureuse a été soigneusement suivie dans un journal et elle est bien documentée.

Kepler n'a pas reçu les données immédiatement. D'une part, les données constituaient l'une des rares choses précieuses que les enfants de Tycho pouvaient hériter, Tycho ayant épousé une roturier qui n'était pas autorisée à léguer des biens immobiliers. Kepler a finalement eu accès aux données de Tycho pour Mars et il a essayé de les adapter à ses calculs. Pour faire ses calculs avec précision, Kepler a même élaboré son propre tableau de logarithmes..

Les données de Tycho, dont Kepler disposait, indiquaient la position de Mars dans le ciel, sur un fond

d'étoiles. Il essaya de calculer ce que devait être son mouvement réel autour du Soleil. Pendant longtemps, il essaya de faire un cercle ou une orbite en forme d'œuf, mais il ne pouvait pas tout simplement faire correspondre la théorie aux observations avec suffisamment de précision. Finalement, il a essayé une figure géométrique appelée ellipse, une sorte de cercle aplati. Ça marche! Cette découverte est l'une des plus grandes de l'histoire de l'astronomie et, bien que Kepler l'ait d'abord appliquée à Mars et à d'autres planètes de notre système solaire, nous l'appliquons maintenant même aux centaines de planètes que nous avons découvertes autour d'autres étoiles.

Le livre de Kepler de 1609, *Astronomia Nova* (a (La nouvelle astronomie), contenait les deux premières de ses trois lois du mouvement:

Première loi de Kepler: Les planètes gravitent autour du Soleil en ellipses, le Soleil étant dans un foyer.

Deuxième loi de Kepler: Une ligne joignant une planète et le soleil balaie des surfaces égales en des temps égaux



Fig.6: Extrait des *Harmonices Mundi* de Kepler (L'harmonie du monde), publié en 1619.

Une ellipse est une courbe fermée qui a deux points clés; ils sont connus comme les foyers. Dessinez votre propre ellipse: placez deux points sur un morceau de papier, chacun est un focus. Ensuite, prenez un morceau de ficelle plus long que la distance entre les foyers.

Mercure	0.387 ua	0.240 ans
Vénus	0.723 ua	0.615 ans
Terre	1 ua	1 ans
Mars	1.523 ua	1.881 ans
Jupiter	5.203 ua	11.857 ans
Saturn	9.537 ua	29.424 ans

Table 1: Distances jusqu'au Soleil et les périodes des planètes dans le temps de Kepler.

Collez-les sur les foyers. Ensuite, placez un crayon dans la ficelle en tirant dessus et déplacez-le doucement d'un côté à l'autre. La courbe que vous allez générer sera l'un des côtés d'une ellipse; il est évident de savoir comment déplacer le crayon pour dessiner l'autre côté. Cette expérience avec la ficelle montre l'une des règles clés définissant une ellipse: la somme des distances d'un point de l'ellipse à chaque foyer reste constante. Un cercle est un type spécial d'ellipse où les deux foyers sont superposés.

Kepler continua de chercher des harmonies dans les mouvements des planètes. Il a associé les vitesses des planètes aux notes de musique, les notes les plus hautes correspondant aux planètes les plus rapides, c'est à dire Mercure et Vénus. En 1619, il a publié son ouvrage majeur *Harmonices Mundi* (L'harmonie des mondes). Dans ce document (figure 6), il a inclus non seulement des portatives musicales avec des notes, mais aussi ce que nous appelons sa troisième loi du mouvement planétaire:

Troisième loi de Kepler sur le mouvement planétaire: Le carré de la période orbitale d'une planète autour du soleil est proportionnel au cube de sa distance moyenne du soleil

Les astronomes ont tendance à mesurer les distances entre les planètes en termes d'unités astronomiques (ua), ce qui correspond à la distance moyenne entre la Terre et le Soleil, soit 150 millions de kilomètres. Essayez d'élever la première colonne de données à la deuxième puissance et celles de la deuxième colonne à la troisième. Vous verrez qu'elles sont presque égales. Toutes les différences proviennent de l'approximation, et non du monde réel, bien que, avec plus de décima-



Fig. 7a: L'un des deux télescopes survivants de Galileo est arrivé à l'Institut Franklin de Philadelphie en 2009, lors de sa première visite aux États-Unis. Notez que la partie extérieure de l'objectif est recouverte d'un anneau en carton. En cachant la partie la plus marginale de l'objectif, Galileo a amélioré la qualité de ses images. (Photo par Jay M. Pasachoff).

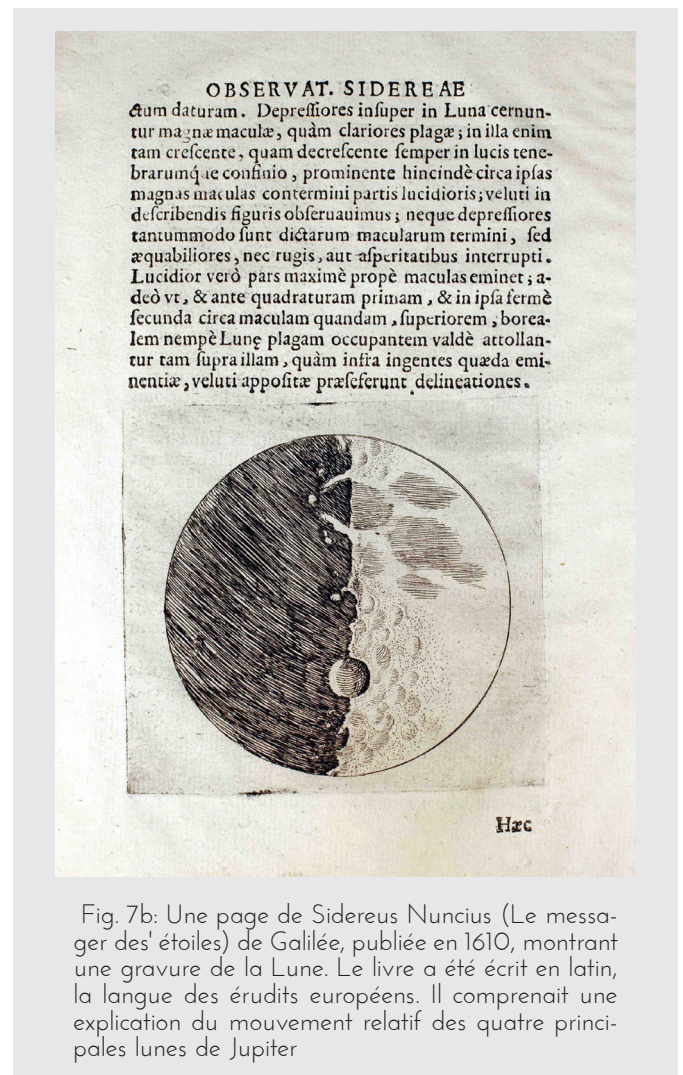


Fig. 7b: Une page de Sidereus Nuncius (Le messager des étoiles) de Galilée, publiée en 1610, montrant une gravure de la Lune. Le livre a été écrit en latin, la langue des érudits européens. Il comprenait une explication du mouvement relatif des quatre principales lunes de Jupiter

les, les influences des autres planètes puissent être détectées.

Découvertes avec le télescope: Galileo Galilei d'Italie

L'année 2009 a été l'Année Internationale de l'Astronomie, déclarée d'abord par l'Union Astronomique Internationale, puis par l'UNESCO et enfin par l'Assemblée Générale des Nations Unies. Pourquoi? Il commémorait l'utilisation du télescope dans les cieux par Galilée 400 ans auparavant, en 1609.

Galilée (1564-1642) était professeur à Padoue, dans la République de Venise. Il a entendu parler d'une invention néerlandaise qui pourrait rapprocher les objets distants. Bien qu'il n'en ait pas vu une, il a compris qu'elle devait contenir quelques lentilles. Il a montré son appareil aux nobles de Venise comme une entreprise militaire et commerciale, leur permettant de voir les navires plus au large que jamais auparavant. Son invention a été un grand succès.

Puis il eut l'idée de tourner le télescope vers le haut. Bien que le télescope soit difficile à utiliser, que son champ de vision soit très étroit et difficile à pointer, il a

réussi à voir une partie de la Lune et à se rendre compte qu'elle était très structurée. En raison de sa formation en dessin à la Renaissance italienne, il réalise que la structure représente l'ombre et la lumière et qu'il voit des montagnes et des cratères. À partir de la longueur des ombres et de la façon dont elles ont changé avec l'illumination changeante du Soleil, il pouvait même déterminer l'hauteur des montagnes. Quelques mois plus tôt, l'Anglais Thomas Harriot avait dirigé un télescope similaire vers la Lune, mais il n'avait dessiné que des gribouillis pas claires et des croquis. Mais Harriot ne s'intéressait ni à la publication ni à la gloire et son travail ne fut connu qu'après sa mort.

Un objectif que Galileo a utilisé pour ses découvertes, est resté fissuré, au Musée d'histoire des sciences de Florence en Italie, et deux télescopes complets qu'il a construits y ont également survécu (figure 7a).

Galilée commença à écrire ses découvertes à la fin de 1609. Il trouva non seulement des montagnes et des cratères sur la lune, mais aussi que la Voie Lactée était faite de nombreuses étoiles, dont certains sont groupés. Puis, en janvier 1610, il trouva près de Jupiter quatre "étoiles" qui bougeaient avec la planète et changeaient de position de nuit en nuit. Cela a marqué la découverte des principales lunes de Jupiter, que nous appelons maintenant les satellites galiléens. Il a écrit ses découvertes dans un petit livre appelé Sidereus Nuncius (Le messager des étoiles), qu'il a publié en 1610 (figure 7b). Depuis Aristote et Ptolémée, on pensait que la Terre était le seul centre de révolution. Et Aristote était considéré comme infaillible. La découverte des satellites de Jupiter, en montrant qu'Aristote aurait pu se tromper, était un coup terrible porté à la notion géocentrique et donc un point fort en faveur de la théorie héliocentrique de Copernic.

Pour gagner des faveurs, Galileo a essayé de nommer les lunes d'après Cosmo de Medici, son patron. Mais ces noms ne collaient pas. Quelques années plus tard, Simon Marius a proposé les noms que nous utilisons maintenant. (Marius a vu peut-être les lunes même un peu avant Galilée, mais il a publié sa découverte beaucoup plus tard.) De gauche à droite ce sont Io, Europe, Ganymède et Callisto (figure 9). Même avec un petit télescope amateur, vous pouvez les voir dans une nuit claire et remarquer qu'au fil des heures, elles changent les positions. Elles gravitent autour de Jupiter sur des périodes allant jusqu'à quelques jours.

Même dans les plus grands et les meilleurs télescopes au sol, les astronomes ne pouvaient pas avoir une vision claire de la structure à la surface des satellites Galiléens.



Fig. 8: En 2009, pour commémorer le 400e anniversaire de la première utilisation du télescope par Galilée, une plaque a été posée sur une colonne située au sommet du Campanile, une tour du XVe siècle (reconstruite au début du XXe siècle après son effondrement en 1902) à Venise. Nous commémorons ici la démonstration par Galilée de son télescope aux nobles de Venise en observant des navires relativement éloignés en mer; c'était avant qu'il tourne sa lunette vers le haut. L'écriture sur la plaque peut être traduite approximativement comme suit: "Le 21 août 1609, Galileo Galilée, avec sa lorgnette, a élargi les horizons de l'homme, il y a 400 ans". (Photo: Jay Pasacoff)



Fig. 9: Galilée lui-même serait étonné de voir ce que les navettes spatiales et ses prédécesseurs avaient découvert grâce aux soi-disant "satellites Medician" qu'il avait découverts en 1609. Ils apparaissent ici en images à leur vraie échelle relative. De gauche à droite, nous voyons Io, avec une surface récemment refaite avec des dizaines de volcans en éruption continue. Deuxièmement, il y a l'Europe, principal suspect de la vie extraterrestre à cause de l'océan sous la couche de glace lisse que nous observons. Troisièmement, Ganymède, la plus grande lune du système solaire, montre une partie particulièrement fascinante de sa surface. Et à droite, Callisto, plus éloignée que les autres lunes et recouverte de glace dure, conserve les traces des collisions de météorites qui se chevauchent et se sont produites pendant des milliards d'années. (Photo: NASA, Mission Galileo, PIA01400)

Ce n'est que lorsque les satellites Pioneer 10 et 11, puis Voyager 1 et 2, ont survolé le système de Jupiter que nous avons vu suffisamment de détails sur les satellites pour pouvoir les caractériser, eux et leurs surfaces. À partir des observations au sol et dans l'espace, les astronomes découvrent encore les lunes de Jupiter, bien que celles nouvellement découvertes soient beaucoup plus petites et plus faibles que les satellites galiléens.

Galileo a utilisé ses découvertes pour obtenir un meilleur travail avec un salaire plus élevé à Florence. Malheureusement, Florence était plus proche de l'autorité papale à Rome, là il y avait les banquiers du Pape et la cité était moins libérale que la République de Venise. Galileo a continué à écrire sur une grande va-

riété de sujets scientifiques, tels que les taches solaires, les comètes, les corps flottants. Chaque sujet semblait identifier un argument contre certains aspects des études d'Aristote. Galileo découvrit que Vénus avait des phases, ce qui montrait que Vénus tournait autour du Soleil. Cela ne prouve pas que la Terre tourne autour du Soleil, car la cosmologie hybride de Tycho expliquerait ces phases. Mais Galilée y voyait un soutien pour Copernic.

En 1616, des représentants de l'Église à Rome lui ont dit de ne pas enseigner le copernicanisme, qui stipulait que le Soleil pas la Terre était au centre de l'Univers. Il parvint longtemps à rester silencieux, mais en 1632, il publia son *Dialogo* (Dialogue sur deux systèmes mondiaux principaux) dans lequel trois hommes discutaient des systèmes héliocentrique et géocentrique. Il avait la permission officielle de publier le livre, mais le livre indiquait clairement sa préférence pour le système héliocentrique de Copernic. Il a été jugé pour sa désobéissance et condamné à la détention à domicile, où il est resté jusqu'à la fin de ses jours.

La nouvelle physique: Isaac Newton d'Angleterre

Beaucoup pensent que les trois meilleurs physiciens de tous les temps sont: Isaac Newton, James Clerk Maxwell et Albert Einstein. Résumé: Newton a découvert la loi de la gravitation, Maxwell a rejoint l'électricité et le magnétisme et Einstein a découvert la relativité générale et spéciale.

Dans une histoire essentiellement vraie, le jeune Isaac Newton (1642-1727) a été renvoyé chez lui de l'Université de Cambridge à Woolsthorpe, près de Lincoln, en Angleterre, lorsque les universités anglaises ont été fermées à cause de la peste. Là-bas, il a vu une pomme tomber d'un pommier et il s'est rendu compte que la même force qui contrôlait la chute de la pomme était, sans aucun doute, la même force qui contrôlait le mouvement de la Lune. Finalement, Newton était de retour comme membre du corps professoral au Collège Trinity, Cambridge. Entre-temps, un groupe de scientifiques de Londres se sont réunis dans un café pour former une société (maintenant la Royal Society), et le jeune Edmond Halley a été envoyé à Cambridge pour confirmer l'histoire du brillant mathématicien, Isaac Newton. Le voyage de Londres à Cambridge en diligence était plus long que le voyage en train d'une heure de nos jours.

Halley a demandé à Newton s'il y avait une force qui diminue avec le carré de la distance, quelle forme aurait l'orbite? Et Newton a répondu que ce serait une

ellipse. Enthousiasmé, Halley lui demanda s'il l'avait prouvé et Newton affirma que c'était sur certains papiers qu'il possédait les calculs. Il a dit qu'il ne pouvait pas les trouver, parce qu'il voulait, peut-être revenir sur son analyse. Quoi qu'il en soit, Newton fut poussé à écrire certaines de ses conclusions mathématiques. En quelques années, elles ont abouti à son livre le plus célèbre, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Principes mathématiques de la philosophie naturelle), où ce qu'ils appelaient alors Philosophie comprend ce que nous appelons maintenant Science.

Les *Principia* de Newton sont parues en 1687, en latin. Newton était encore enseignant à l'université à l'époque; il a fallu attendre longtemps avant qu'il soit anobli pour son travail. Halley a dû payer pour la publication du livre de Newton et aussi il a écrit la préface. Les *Principia* ont notamment inclus la loi de Newton qui montrait comment la gravitation diminuait du carré de la distance et sa preuve des lois de Kepler sur les orbites planétaires. Le livre inclut également les lois du mouvement de Newton, clairement décrites comme des "lois" en latin, tandis que les lois de Kepler sont intégrées dans son texte

Les lois de Newton du mouvement sont les suivantes:
Première loi du mouvement de Newton: un corps en mouvement tend à rester en mouvement et un corps en repos tend à rester en repos.

Deuxième loi du mouvement de Newton (version moderne): la force = la mass multipliée par l'accélération.

Troisième loi du mouvement de Newton: pour chaque action, il y a une réaction égale et opposée

Newton a établi les bases de la physique mathématique qui a conduit à la science moderne.

La recherche en astronomie continue

Tout comme les anciens peuples étaient curieux du ciel et voulaient trouver notre place dans l'univers, les astronomes d'aujourd'hui se sont inspirés des découvertes du passé avec la même motivation. Les découvertes théoriques et observationnelles ont déplacé notre compréhension de notre place dans l'univers de la vision géocentrique de Ptolémée à l'hypothèse héliocentrique de Copernic, à la découverte que le système solaire n'était pas au centre de notre galaxie et à notre compréhension des galaxies distribuées dans tout l'univers.

L'astronomie contemporaine utilise des programmes pour rechercher la nature de la matière noire et de l'énergie noire. La théorie de la relativité d'Einstein indique non seulement que notre galaxie n'est pas au centre de l'univers, mais que l'idée même de "centre" semble n'avoir aucun sens. La découverte récente de

d'autres étoiles a montré à quel point notre système solaire peut être inhabituel. Les nouvelles théories sur la formation des planètes se développent parallèlement aux nouvelles observations de systèmes planétaires imprévisibles. Le chemin des nouvelles découvertes est ouvert aux astronomes contemporains des temps modernes, tout comme ils l'étaient il ya des milliers ou des centaines d'années.

.....

Bibliographie

Hoskin, M. (editor), *Cambridge Illustrated History of Astronomy*, Cambridge University Press, 1997.

Pasachoff, J and Filippenko A, *The Cosmos: Astronomy in the New Millennium*, 4th ed., Cambridge University Press 2012.

Sources d'Internet

www.solarcorona.com

<http://www.astrosociety.org/education/resources/multiprint.html>

<http://www2.astronomicalheritage.net>

Le système solaire et systèmes exoplanétaires

Magda Stavinschi, Beatriz García, Andrea Sosa

L'Union Astronomique Internationale, Institut Astronomique de l'Académie Roumaine (Roumanie), Institut des technologies de détection et des astroparticules et UTN (Argentine), Universidad de la República, (Uruguay)

Résumé

Sans aucun doute, dans un Univers où l'on parle de systèmes stellaires et solaires, de planètes et d'exoplanètes, le système le plus connu est le système solaire. On pourrait penser que tout le monde sait ce qu'est le Soleil, ce que sont les planètes, ce que sont les comètes et les astéroïdes. Mais est-ce vraiment le cas? Si nous voulons comprendre le système solaire d'un point de vue scientifique, nous devons connaître les règles qui définissent un système. Les organismes qui composent le Système unique, conformément à la résolution de l'Union astronomique internationale du 24 août 2006, sont:

- Les planètes
- Les satellites naturels des planètes
- Trois planètes naines
- D'autres corps plus petits: astéroïdes, météorites, comètes, poussières, objets de ceinture de Kuiper, etc.

Par extension, toute autre étoile entourée de corps célestes selon les mêmes lois qui régissent notre système est appelée un système exoplanétaire. L'une des questions à laquelle il faut répondre à ce sujet est "Quelle est la place du système solaire dans l'Univers", mais ce n'est pas la seule. Dans ce chapitre, nous allons essayer de présenter les caractéristiques les plus importantes de notre système

Objectifs

- Pour savoir quelle est la place du Soleil dans l'Univers.
- Pour savoir quels objets forment le système solaire.
- Connaître les détails des différents corps du système solaire, en particulier les plus importants.

Le système solaire

Qu'est-ce qu'un système ?

Un système est, par définition, un ensemble d'éléments qui interagissent mutuellement selon un certain nombre de principes ou de règles.

Pour définir le système solaire, nous allons indiquer, en principe, les éléments de l'ensemble, qui est composé d'une étoile, le Soleil, et de tous les corps qui l'entourent et qui lui sont liés par la force de gravité.

Le système solaire est situé dans l'un des bras extérieurs de notre galaxie, également appelé la Voie lactée. Ce bras est appelé le bras d'Orion. Il est situé dans une région où la densité d'étoiles est relativement faible.

Le Soleil, ainsi que l'ensemble du système solaire, est dans un mouvement révolutionnaire autour du centre de notre galaxie, située à une distance comprise entre 25 000 et 28 000 années-lumière (environ la moitié du rayon de la galaxie), avec une période de révolution comprise entre 225 et 250 millions d'années (l'année galactique du système solaire). La vitesse à laquelle il se déplace sur cette orbite presque circulaire est d'environ 220 km/s, alors que la direction du mouvement est vers la position actuelle de l'étoile Véga

Notre galaxie est composée d'environ 200 milliards d'étoiles, avec leurs planètes, et de plus de 1000 nébuleuses. La masse de l'ensemble de l'amas est environ 1 milliard de fois celle du Soleil et son diamètre est d'environ 100 000 années-lumière.

Très proche du système solaire se trouve le système Alpha Centauri (l'étoile la plus brillante de la constellation des Centaures), composé de trois étoiles, c'est-à-dire une paire d'étoiles (Alpha Centauri A et B), semblable au Soleil, qui tournent à une distance de 0,2 années-lumière autour d'une naine rouge, appelée Alpha Centauri C, de luminosité relativement faible. Cette dernière est l'étoile la plus proche du Soleil, à une distance de 4,24 années-lumière ; c'est pourquoi elle est aussi appelée "Proxima Centauri".

Notre galaxie fait partie d'un groupe de galaxies appelé le Groupe Local, composé de trois grandes galaxies et d'une série de 30 plus petites. Notre galaxie a la forme d'une spirale barrée. Les bras de cette spirale, qui é



Fig. 1 Système solaire en échelle de taille



Fig2. Localisation du Soleil dans la galaxie (simulation)

mergent des extrémités de la barre formée par une distribution particulière d'étoiles, contiennent, entre autres, de la matière interstellaire, des nébuleuses et de jeunes étoiles qui naissent en permanence de cette matière. Le centre de la galaxie est composé de vieilles étoiles concentrées en groupes de forme sphérique. Notre galaxie compte environ 200 groupes de ce type, dont seulement 150 sont mieux connus. Ces groupes sont principalement concentrés dans le centre galactique. Le système solaire est situé à 20 années-lumière au-dessus du plan de symétrie équatoriale et à 28 000 années-lumière du centre galactique. Le centre de la galaxie se trouve dans la direction de la constellation du Sagittaire, entre 25 000 et 28 000 années-lumière du Soleil.

La formation et l'évolution du système solaire

Selon la théorie classique, il y a environ 4,6 milliards d'années, le système solaire s'est formé à partir de la contraction gravitationnelle d'un nuage de gaz et de poussière interstellaires. L'effondrement du nuage a été déclenché par une perturbation grave (peut-être une explosion de supernova), qui a fait que la force gravitationnelle a vaincu la pression du gaz. La conservation du moment angulaire a fait que la nébuleuse tourne de plus en plus vite, s'aplatit et donne naissance à un **protosol** en son centre, et à un **disque protoplanétaire**

de gaz et de poussière autour d'elle. De petits noyaux planétésimaux solides ont été condensés dans le disque protoplanétaire, qui se sont ensuite accumulés par un processus d'accrétion pour former les planètes.

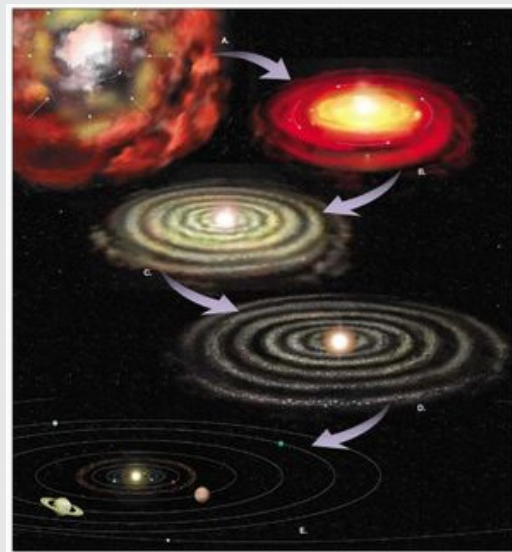


Fig. 3 Schéma du processus de formation du système solaire, selon la Théorie Standard, basée sur l'hypothèse nébulaire, proposée à l'origine par Kants et Laplace au 17ème siècle.

L'hypothèse d'une nébuleuse primitive a été proposée en 1755 par Emmanuel Kant et aussi séparément par Pierre-Simon Laplace.

La théorie standard (basée sur l'hypothèse nébulaire" proposée à l'origine par Kant et Laplace au 17ème siècle) explique la coplanarité et la quasi-circularité des orbites et a maintenant été confirmée par les observations de plusieurs systèmes planétaires autour d'autres étoiles.

Le Soleil

Le Soleil est une étoile de masse intermédiaire, son âge est d'environ 4,6 milliards d'années. À l'heure actuelle, le Soleil a accompli environ la moitié de son cycle d'évolution, qui est lié à la transformation de l'hydrogène en hélium dans son noyau, par le mécanisme de la fusion nucléaire. Chaque seconde, dans le noyau du Soleil, plus de quatre millions de tonnes de

matière sont converties en matière et en énergie plus lourdes, générant ainsi non seulement de l'hélium, mais aussi des neutrinos et des radiations électromagnétiques. Soleil, générant ainsi des neutrinos et des radiations

La plus grande partie du Soleil (74%) est constituée d'hydrogène, près de 25% d'hélium, le reste étant constitué d'éléments lourds.

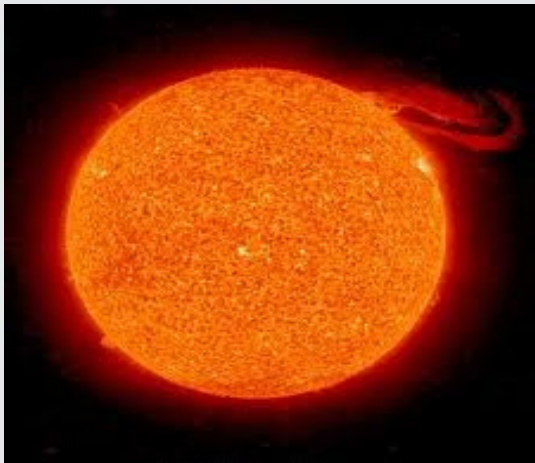


Fig. 4: Le Soleil dans l'infrarouge.

Le cycle de vie du Soleil

Dans environ 5 milliards d'années, le Soleil deviendra un géant puis une naine blanche, période au cours de laquelle une nébuleuse planétaire verra le jour. L'hydrogène sera épuisé, ce qui entraînera des changements radicaux, dont la destruction totale de la Terre. L'activité solaire, plus précisément son activité magnétique, est détectée à la vue de tous par le nombre et la dimension des taches à sa surface, ainsi que par les éruptions solaires et les variations du vent solaire, qui dissipent la matière de la composition du Soleil dans le système solaire et même au-delà.

Planètes

Pour classer les planètes, on utilise la définition donnée par l'Union astronomique internationale (UAI) lors de sa 26e assemblée générale, tenue à Prague en 2006

Dans le Système Solaire, une planète est un corps céleste qui:

1. Est en orbite autour du Soleil,
2. A une masse suffisante pour assumer l'équilibre hydrostatique (forme presque ronde),
3. A "nettoyé le voisinage" autour de son orbite

Un corps non satellitaire qui ne répond qu'aux deux premiers de ces critères est classé comme "planète naine".

Selon l'UAI, les planètes et les planètes naines sont deux classes distinctes d'objets. Un non-satellite qui ne répond qu'au premier critère est appelé "petit corps du système solaire" (SSSB), comme c'est le cas des astéroïdes, par exemple.

Les projets initiaux de reclassement des corps dans le système solaire prévoyaient d'inclure les planètes naines dans une sous-catégorie des planètes, mais comme cela aurait pu entraîner l'ajout de plusieurs dizaines de nouvelles planètes dans le système, ce projet a été abandonné. En 2006, trois planètes naines ont été ajoutées (Cérès, Eris et Makemake) et une a été reclassée (Pluton). Ainsi, le système solaire 2006 comptait cinq planètes naines : Cérès, Pluton, Makemake, Haumea et Eris. Au fil des années, de nouveaux corps à l'étude ont été ajoutés à la liste des planètes naines.

Cette définition distingue les planètes des corps plus petits et n'est pas utile en dehors du système solaire, où les corps plus petits ne peuvent pas être détectés avec la technologie actuelle. Les planètes extrasolaires, ou exoplanètes, sont traitées séparément dans un projet de directive complémentaire de 2003 pour la définition

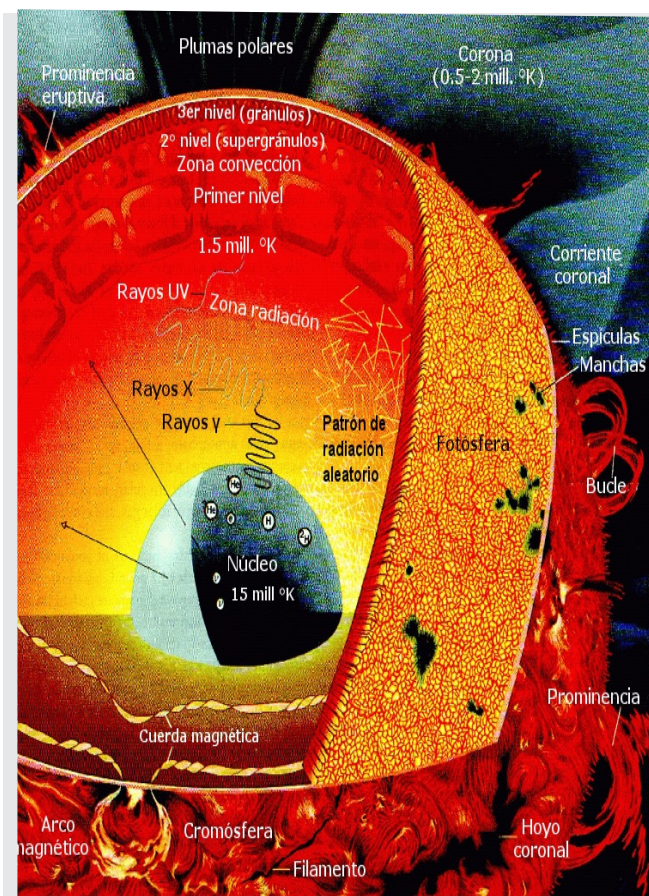


Fig 5 Structure interne du Soleil

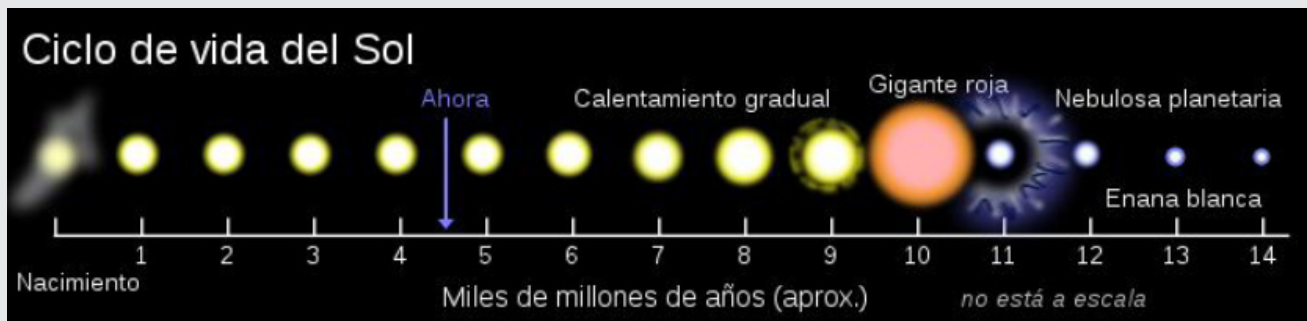


Fig. 6: Cycle de vie du Soleil, de la protoétoile à la naine blanches.

des planètes, qui les distingue des étoiles naines qui sont plus massives et de plus grande taille.

Vamos apresentar cada um dos corpos que integram o Sistema Solar:

Les 8 planètes du système solaire peuvent être divisées en:

- 4 planètes terrestres, dans la région la plus intérieure (Mercure, Vénus, Terre et Mars) Rocheux, avec des densités approximatives entre 4 et 5 g/cm³.

- 4 Planètes géantes, dans la région ultrapériphérique, qui sont à leur tour divisées en:

- Géants gazeux: Jupiter et Saturne. Plus riche en H et He, avec un composition chimique similaire à celle du soleil.

- Géants des glaces: Uranus et Neptune. Les glaces prédominent en ce qui concerne les fumée Leur composition chimique est très différente de celle du soleil.

Les planètes géantes sont plus légères que les planètes terrestres, avec des densités comprises entre 0,7 g/cm³ (Saturne) et 2 g/cm³.

Les planètes géantes se sont formées sur des échelles de temps de l'ordre de 10 millions d'années (les terrestres l'ont fait en 100 millions d'années environ). Ils ne se sont pas formés "in situ", il y a eu une migration causée par l'échange de moment angulaire entre les planètes géantes en formation et les planétésimaux qui ont été emportés vers d'autres régions du système solaire ou éjectés du système.

La caractérisation de chaque planète implique la détermination de ses propriétés générales, telles que la masse, le rayon, la densité, la période de rotation autour de son axe (le jour), la période de translation autour du Soleil (l'année), la composition chimique de sa structure et de son atmosphère, entre autres grandeurs.

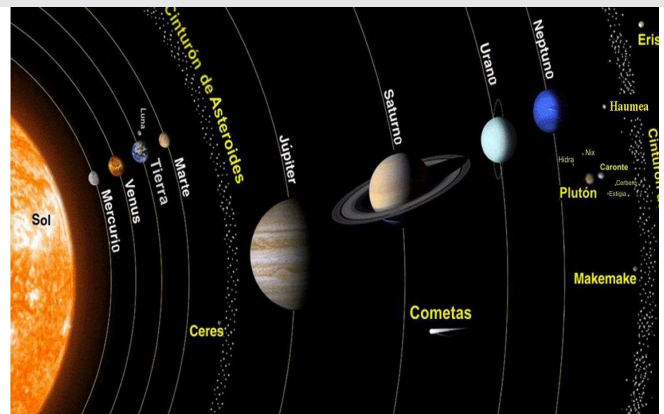


Fig 7 : Corps du système solaire (non mis à l'échelle).

Dans ce texte, nous ne présenterons pas les tableaux de données, car ils sont disponibles sur Internet, en plus des livres traditionnels. Nous nous concentrerons ici uniquement sur la description de la nature de chaque corps, son origine, et les données d'intérêt ou de couleur afin que l'enseignant puisse travailler sur le sujet en classe (pour les données spécifiques des planètes et des corps du système solaire, voir les informations sur Internet).

MERCURE

Mercure est la planète la plus proche du Soleil et la plus petite planète du système solaire. C'est une planète tellurique à l'intérieur du système solaire. Il tire son nom du dieu romain des arts et du commerce.

Il n'a pas de satellite naturel. C'est l'une des cinq planètes que l'on peut voir à l'œil nu depuis la Terre. Il n'est observé au télescope que depuis le XVIIe siècle. Dernièrement, il a été étudié par deux sondes spatiales : Mariner 10 (trois fois en 1974-1975) et Messenger (deux fois en 2008).

Bien qu'elle soit visible à l'œil nu, elle n'est pas facilement observable, précisément parce qu'elle est la planète la plus proche du Soleil. Sa place dans le dôme du ciel est très proche du Soleil et ne peut être observée qu'autour des allongements, un peu avant le lever du soleil et un peu après le coucher du soleil. Cependant,

les missions spatiales nous ont donné suffisamment d'informations, ce qui montre de façon surprenante que Mercure est très similaire à la Lune.

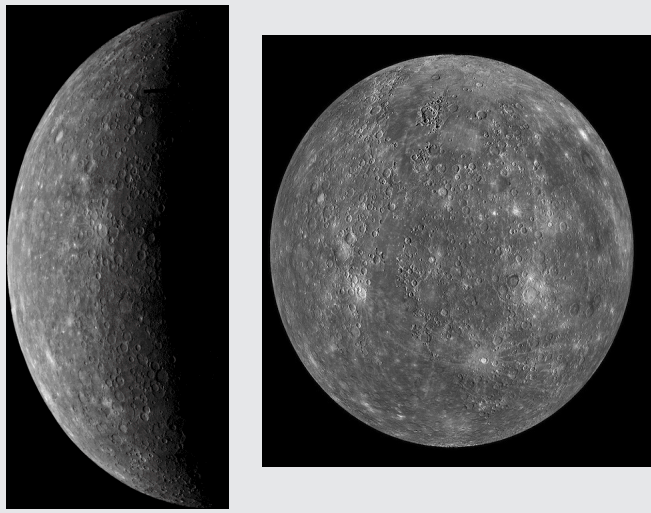


Fig. 8: La planète Mercure

Il convient de mentionner quelques caractéristiques de la planète: elle est la plus petite du système solaire et la plus proche du Soleil. Elle a l'orbite la plus excentrique ($e = 0,2056$) et aussi la plus inclinée dans le sens opposé à l'écliptique ($i = 7^\circ 005$). Sa période synodique est de 115,88 jours, ce qui signifie que trois fois par an, elle se trouve à une position d'allongement maximum à l'ouest du Soleil (elle est également appelée "l'étoile du matin", et aux trois positions d'allongement maximum à l'est du Soleil, elle est appelée "l'étoile du soir"). Dans tous ces cas, l'allongement ne dépasse pas 28° .

Son rayon de 2440 kilomètres en fait la plus petite planète du système solaire, plus petite même que deux des satellites galiléens de Jupiter: Ganymède et Callisto. Sa densité de $5,427 \text{ g/cm}^3$ en fait le plus dense après la Terre ($5,5 \text{ g/cm}^3$). Le fer pourrait être le principal élément lourd (70 % contre 30 et la matière rocheuse), qui contribue à la forte densité du mercure.

En général, on prétend que le mercure n'a pas d'atmosphère, ce qui n'est pas exact, mais son atmosphère est très rare et très ténue, composée d'oxygène moléculaire, 42%, de sodium 29,0%, d'hydrogène 22,0%, d'hélium 6,0%, de potassium 0,5% et de traces d'argon, d'azote, de dioxyde de carbone, de vapeur d'eau, de xénon, de crypton et de néon. Mercure est la seule planète (en dehors de la Terre) à posséder un champ magnétique significatif, qui, bien qu'il soit de l'ordre de 1/100 de celui de la Terre, est suffisant pour créer une magnétosphère, qui s'étend sur 1,5 rayon planétaire, contre 11,5 rayons dans le cas de la Terre.

Enfin, il y a une autre analogie avec la Terre: le champ magnétique est bipolaire, avec un axe magnétique incliné de 11° , par rapport à l'axe de rotation.

Sur le mercure, les températures varient beaucoup. Lorsque la planète traverse le périhélie, la température peut atteindre 427°C à l'équateur, à midi, soit suffisamment pour faire fondre un métal comme le zinc. Cependant, immédiatement après la tombée de la nuit, la température peut descendre jusqu'à -183°C , ce qui fait monter la variation diurne à 610°C ! Aucune autre planète ne souffre d'une telle différence, qui peut être due au rayonnement solaire intense pendant la journée, à l'absence d'une atmosphère dense et à la longueur de la journée de Mercure (l'intervalle entre le lever et le coucher du soleil est de presque trois mois terrestres, c'est-à-dire suffisamment de temps pour stocker de la chaleur ou, de même, du froid pendant une nuit d'égale durée).

Les cratères de Mercure sont très similaires à ceux de la Lune en termes de morphologie, de forme et de structure. La plus notable est celle du bassin de Caloris, témoin d'une grande catastrophe. Les impacts des bassins versants sont les événements les plus catastrophiques qui peuvent affecter la surface d'une planète. Ils peuvent provoquer la modification de la croûte planétaire, et même des troubles internes. C'est ce qui s'est passé lors de la formation du cratère de Caloris, d'un diamètre de 1 550 kilomètres.

L'avancée de la périhélie de Mercure

Comme toute autre planète, le périhélie de Mercure n'est pas fixe, mais a un mouvement régulier autour du Soleil. Pendant longtemps, on a considéré que ce mouvement était plus rapide de 43 secondes d'arc par siècle par rapport aux prédictions de la mécanique céleste "newtonienne" classique. Cette avancée du périhélie a été prédite par la théorie générale de la relativité d'Einstein, la cause étant la courbure de l'espace due à la masse solaire. La coïncidence entre la progression observée du périhélie et celle prévue par la relativité générale a été la preuve de la validité de l'hypothèse de cette dernière.

VENUS

L'une des quatre planètes du système interne, de constitution similaire à celle de la Terre et la deuxième en distance au Soleil, se trouve à environ 1. Elle porte le nom de la déesse romaine de l'amour et de la beauté.

Sa proximité avec le Soleil, la structure et la densité de



Fig. 9 Mouvement de précession du périhélieum de Mercure

l'atmosphère de Vénus en font l'un des corps les plus chauds du système solaire. Il a un champ magnétique très faible et ne possède pas de satellites naturels. C'est une des planètes avec un mouvement de révolution rétrograde et la seule avec une période de rotation supérieure à la période de la révolution. C'est le corps le plus brillant du ciel après le Soleil et la Lune.

La trajectoire de Vénus autour du Soleil est presque un cercle : son orbite a une excentricité de 0,0068, c'est-à-dire la plus petite du système solaire. Une année vénusienne est légèrement plus courte qu'un jour sidéral sur Vénus, avec un ratio de 0,924.

Sa taille et sa structure géologique sont similaires à celles de la Terre. L'atmosphère est très dense. Le mélange de CO₂ et de denses nuages de dioxyde de soufre crée le plus grand effet de serre du système solaire, avec des températures d'environ 460°C. La température à la surface de Vénus est plus élevée que celle de Mercure, bien que Vénus soit presque deux fois plus éloignée du Soleil que Mercure, et ne reçoive qu'environ 25% du rayonnement du Soleil par rapport à Mercure. La surface de la planète a un relief presque uniforme. Son champ magnétique est très faible, mais il porte une queue de plasma de 45 millions de kilomètres de long, observée pour la première fois par SOHO en 1997.

Une caractéristique notable de Vénus est sa rotation rétrograde (bien qu'Uranus en ait également une) : elle tourne autour de son axe très lentement et dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, alors que les planètes du système solaire tournent généralement dans le sens des aiguilles d'une montre. Sa période de rotation n'est connue que depuis 1962. Cette rotation - lente et rétrograde - produit des jours solaires beaucoup plus courts que le jour sidéral, ces jours étant plus longs que sur les planètes à rotation dans le sens des aiguilles d'une montre. Par conséquent, il y a moins de 2 jours complets dans une année solaire de Vénus. Les

causes de la rotation rétrograde de Vénus n'ont pas encore été élucidées. L'explication la plus probable serait une collision avec un autre grand corps dans la formation des planètes du système solaire. Il se pourrait aussi que l'atmosphère de Vénus influence la rotation de la planète en raison de sa grande densité.

Vénus a une atmosphère unique. Avec une pression de surface de 93 bar (9,3MPa) xx fois celle de la Terre et composé principalement de ~96,5% de dioxyde de carbone, ~3,5% d'azote, 0,015% de dioxyde de soufre, 0,007% d'argon, 0,002% de vapeur d'eau, 0,0017% de monoxyde de carbone, 0,0012% d'hélium, 0,0007% de néon.



Fig. 10 Vénus.

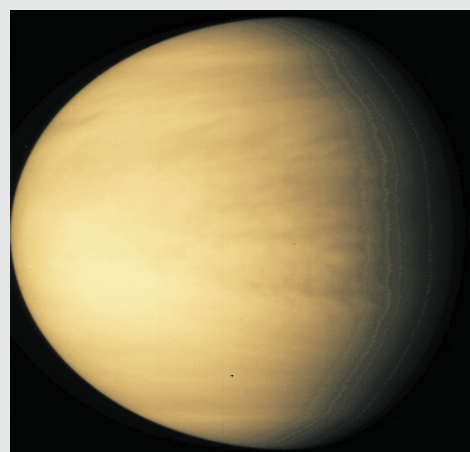


Fig. 11 Vénus.

La sœur jumelle de la Terre, Vénus. Analogie.

- Ils sont nés au même moment, à partir des mêmes nuages de gaz et de poussière, 4,6 millions d'années.
- Les deux sont des planètes du système solaire intérieur
- Ses surfaces ont un relief varié: montagnes, champs,

vallées, plateaux,

- Les volcans, les cratères d'impact, etc.
- Les deux ont un nombre relativement faible de cratères, signe d'une
- Une surface relativement jeune et une atmosphère dense
- Ont des compositions chimiques similaires.

Le Transit de Venus

Le transit de Vénus se produit lorsque la planète passe entre la Terre et le Soleil, et que l'ombre de Vénus traverse le disque solaire. En raison de l'inclinaison de l'orbite de Vénus, par opposition à celle de la Terre, ce phénomène est très rare à notre échelle de temps. Il a lieu deux fois tous les 8 ans, ce double transit est séparé du suivant par plus d'un siècle (105,5 et 121,5 ans). Les derniers transits ont eu lieu le 8 juin 2004 et le 6 juin 2012 et pour le prochain, il faudra attendre le 11 décembre 2117.

TERRE

La Terre est la troisième planète la plus éloignée du Soleil dans le système solaire, et la cinquième par ses dimensions. Il appartient aux planètes intérieures. C'est la plus grande des planètes rocheuses, et la seule dans l'Univers connu où la vie a réussi à s'adapter. La Terre s'est formée il y a environ 4,57 milliards d'années. Son seul satellite naturel, la Lune, a commencé son orbite peu après celle de la Terre, il y a environ 4,533 milliards d'années, et il existe plusieurs théories sur son origine. 71% de la surface de la Terre est recouverte d'eau, le reste de 29% est solide et "sec", mais l'eau au total constitue une quantité infime de matière par rapport à la structure générale de la planète.



Fig. 11: La Terre et la Lune (Mission Galileo, 1998)

Entre la Terre et le reste de l'Univers, il y a une interaction permanente. Ainsi, la Lune est la cause des marées. Elle a également influencé de manière conti-

nue la vitesse du mouvement de rotation de la Terre. Tous les corps du globe sont attirés par la Terre, la force d'attraction est appelée gravité et l'accélération avec laquelle ces corps tombent dans le champ gravitationnel est appelée accélération gravitationnelle (désignée par "g" = 9,81 m/s²). On pense que la raison de l'apparition des océans est une "pluie" provenant des comètes dans une période antérieure de la Terre. Plus tard, les impacts d'astéroïdes ont contribué à modifier l'environnement de manière décisive. Les changements de l'orbite de la planète peuvent être considérés comme responsables des périodes glaciaires qui ont eu lieu dans l'histoire et qui ont recouvert la surface de la Terre d'une couche de glace.

La pression de son atmosphère à la surface est de 101,3 kPa et elle est composée de 78 % d'azote (N₂), 21 % d'oxygène (O₂), 0,93 % d'argon, 0,04 % de dioxyde de carbone et 1 % de vapeur d'eau (varie en fonction du climat).

MARS

Mars est la quatrième planète du système solaire en distance par rapport au Soleil et la deuxième en dimensions après Mercure. Elle appartient au groupe des planètes telluriques. Il est nommé d'après le dieu romain de la guerre en raison de sa couleur rougeâtre. Plusieurs missions spatiales l'ont étudié depuis 1960 pour en savoir le plus possible sur sa géographie, son climat et d'autres détails, et elles continueront à le faire à la recherche d'eau et peut-être de signes de vie sous sa surface.

On peut voir Mars à l'œil nu. Il est moins lumineux que Vénus et rarement plus lumineux que Jupiter. Elle éclipse cette dernière dans ses configurations plus favorables (oppositions). De tous les corps du système solaire, la planète rouge est celle qui a attiré le plus d'auteurs de science-fiction. La raison principale en est ses fameux canaux, ainsi appelés pour la première fois en 1858 par Giovanni Schiaparelli et considérés par cet auteur comme le résultat de constructions, dont on sait aujourd'hui qu'elles étaient complètement fausses... La couleur rouge de Mars est due à l'oxyde de fer (aussi appelé hématite), qui se trouve dans les minéraux à sa surface. Mars a un relief très escarpé, avec la plus haute montagne du système solaire (le volcan du mont Olympe), d'une hauteur d'environ 25 km, ou le plus grand canyon connu sur une planète (Valles Marineris), d'une profondeur moyenne de 6 km.

Cette planète possède en son centre un noyau de fer d'un diamètre d'environ 1700 kilomètres, recouvert d'un manteau d'olivier et d'une croûte basaltique,

d'une largeur moyenne de 50 kilomètres. Elle est entourée d'une atmosphère composée principalement de dioxyde de carbone. Il y avait autrefois une hydrosphère active, c'est-à-dire qu'il y avait de l'eau à sa surface, mais des changements dans les conditions de pression de l'atmosphère, probablement dus à la perte de son champ magnétique, et de sa température, ont entraîné l'évaporation de l'eau à température ambiante. Actuellement, l'atmosphère martienne est caractérisée par une pression de surface de 0,6 à 1,0 kPa et est composée de 95,72 % de dioxyde de carbone, 2,7 % d'azote, 1,6 % d'argon, 0,2 % d'oxygène, 0,07 % de monoxyde de carbone, 0,03 % de vapeur d'eau, 0,01 % d'oxyde nitrique et de traces de néon, de krypton, de formaldéhyde, de xénon, d'ozone et de méthane.

Mars possède deux satellites naturels, Phobos et Deimos, probablement des astéroïdes capturés par la planète. Le diamètre de Mars est deux fois plus petit que celui de la Terre et sa surface est la même que celle des continents. Sa masse est un dixième de celle de la Terre. Sa gravité est légèrement inférieure à celle de Mercure, même si sa masse est deux fois plus importante.

Les vitres de l'équateur martien et son orbite autour du soleil ne coïncident pas. L'inclinaison de l'axe de Mars est similaire à celle de la Terre, c'est pourquoi il y a des saisons sur Mars comme sur Terre. Les dimensions des calottes polaires varient au cours des saisons en raison de l'échange de dioxyde de carbone et d'eau avec l'atmosphère. Le jour martien n'est que de 39 minutes plus long que le jour terrestre. Et en raison de son éloignement relatif du Soleil, l'année compte un peu plus de 322 jours de plus que l'année terrestre.

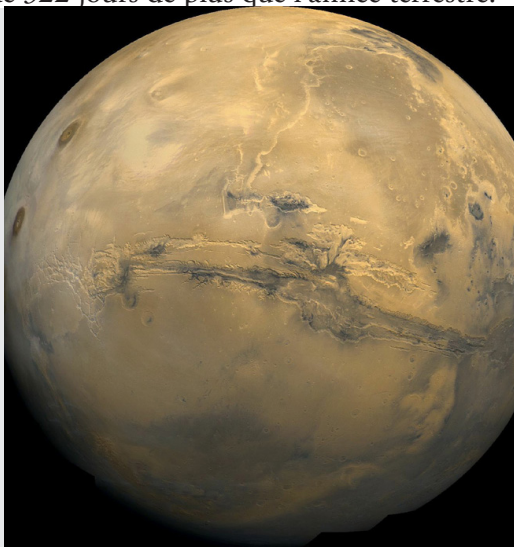


Fig. 12: Mars

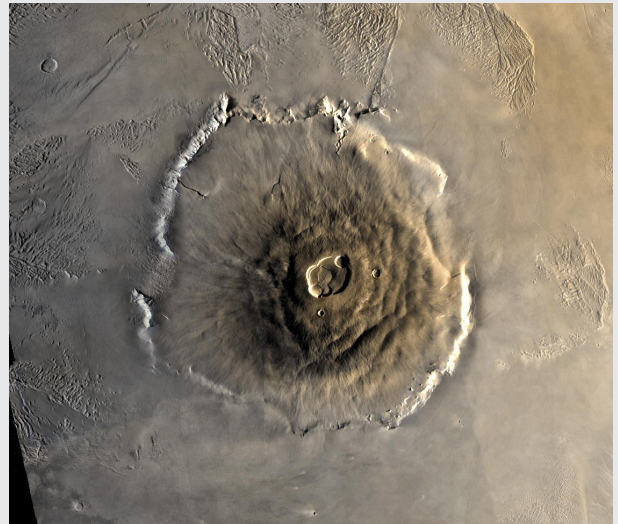


Fig 13.Mont Olympe

Mars est la planète extérieure la plus proche de la Terre; cette distance est moindre lorsqu'elle est en opposition, avec la Terre entre elle et le Soleil.

Le 27 août 2003, Mars n'était qu'à 55,76 millions de km de la Terre, soit 0,3727 UA, la plus courte distance enregistrée en 59 618 ans. Un tel événement a donné lieu à toutes sortes de fantasmes, par exemple, que Mars aurait pu être vue aussi grande que la Lune. Cependant, avec un diamètre apparent de 25,13 secondes d'arc, Mars peut être vue à l'œil nu comme un point, tandis que la Lune s'étend sur un diamètre apparent de 30 minutes d'arc (1800 secondes d'arc). Une proximité similaire à celle de 2003 se produira le 28 août 2287, lorsque la distance entre les deux planètes sera de 55,69 millions de km.

JUPITER

Jupiter est la cinquième planète en distance du Soleil, avec un diamètre 11 fois celui de la Terre, c'est la plus grande de toutes les planètes du système solaire. Par rapport à notre planète, sa masse est 318 fois plus importante et son volume 1300 fois plus grand. Il est en orbite autour du Soleil à une distance de 778 547 200 kilomètres.

Jupiter est le quatrième objet le plus brillant du ciel à l'œil nu (après le Soleil, la Lune, Vénus et parfois Mars). La découverte de ses quatre grands satellites: Io, Europa, Ganymède et Callisto (connus sous le nom de satellites galiléens) par Galileo Galilei et Simon Marius en 1610 a été la première découverte d'un centre de mouvement apparent qui n'était pas sur Terre. C'était un point important en faveur de la théorie héliocentrique.

que du mouvement planétaire de Nicolas Copernic. La vérification par Galilée de la théorie copernicienne lui a valu des problèmes avec l'Inquisition. Avant les missions Voyager, seuls 16 de ses satellites étaient connus: aujourd'hui, nous savons qu'ils en ont plus de 60 et que certains restent sûrement à découvrir.

Le noyau de la planète est probablement constitué de matériaux solides, 10 à 15 fois la masse de la Terre. Au-dessus de ce noyau se trouve la partie principale de la planète, composée d'hydrogène métallique liquide: en raison de la température et de la pression à l'intérieur de Jupiter, l'hydrogène est un liquide et non un gaz. Dans cet état, le matériau est un conducteur électrique et la source du champ magnétique de Jupiter. Cette couche contient un peu d'hélium et un peu de glace restante.

La couche superficielle de la planète est principalement composée d'hydrogène et d'hélium moléculaires, liquides à l'intérieur et gazeux à l'extérieur. L'atmosphère que nous voyons n'est que le sommet de cette couche profonde. L'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, ainsi que d'autres molécules simples sont également présents en petites quantités.

L'atmosphère de Jupiter est composée d'environ 86% d'hydrogène et 14% d'hélium, avec des traces de méthane, d'eau, d'ammoniac et d'autres éléments. On pense que sa composition est très similaire à la structure nuageuse originale à partir de laquelle le système solaire s'est formé (dans ce sens, Uranus et Neptune, qui sont également gazeux, ont moins d'hydrogène et d'hélium).

Une caractéristique distinctive de Jupiter est sa **Grande Tache Rouge, qui a été observée** pour la première fois par des télescopes terrestres il y a plus de 300 ans. C'est un ovale d'environ 12 000 par 25 000 kilomètres, assez grand pour couvrir deux Terres. C'est une région de haute pression, dont les nuages supérieurs sont beaucoup plus hauts et plus froids que les zones environnantes. Des structures similaires ont été observées sur Saturne et Neptune. On ne sait pas encore pourquoi ce type de structure résiste si longtemps.

Sur Jupiter et d'autres planètes gazeuses, les vents soufflent à grande vitesse, dans de larges bandes de latitude. Les vents soufflent dans des directions opposées sur deux bandes adjacentes. Les différences de température ou de composition chimique sont responsables de la coloration différente des bandes, un aspect qui domine l'image de la planète. L'atmosphère de Jupi-

ter est très turbulente. Les vents sont en grande partie déterminés par la chaleur interne de la planète, et non par le Soleil comme sur la Terre. L'atmosphère de Jupiter a une pression de surface de 20-200 kPa (couches nuageuses) et sa composition chimique est la suivante : 90% d'hydrogène (H₂), 10% d'hélium, ~0,3% de méthane, ~0,036% d'ammoniac, ~0,003% de deutérium (HD), 0,0006% d'éthane, 0,0004% d'eau. Et aussi des glaces de : ammoniaque, eau et sulfure d'ammonium (NH₄SH).



Fig 14 Jupiter



Fig 15. Aurores sur Jupiter (photo du télescope Hubble)

La magnétosphère de Jupiter est très intense, 14 fois plus forte que celle de la Terre et s'étend sur quelque 650 millions de km (au-delà de l'orbite de Saturne). Les satellites de Jupiter sont inclus dans son atmosphère, ce qui explique en partie l'activité sur Io. Un inconvénient majeur des futurs voyages spatiaux, ainsi qu'un problème pour les concepteurs des sondes Voyager et Galileo, est que dans l'environnement de Jupiter,

il y a de grandes quantités de particules capturées par le champ magnétique de Jupiter. Cette "radiation" est similaire, mais beaucoup plus intense que celle observée dans les ceintures de Van Allen sur Terre, et serait mortelle pour tout être humain non protégé. La sonde Galileo a découvert un nouveau rayonnement intense entre les anneaux de Jupiter et les couches supérieures de l'atmosphère. Cette nouvelle ceinture de radiation est dix fois plus intense que les ceintures de Van Allen sur Terre. Étonnamment, cette nouvelle ceinture contient des ions d'hélium à haute énergie d'origine inconnue.

Jupiter a des anneaux comme Saturne, mais beaucoup plus fins et plus opaques: contrairement à ceux de Saturne, les anneaux de Jupiter sont sombres. Ils sont probablement composés de petits grains de matière rocheuse et ne semblent pas contenir de glace. Les particules des anneaux de Jupiter n'y restent probablement pas longtemps (à cause de l'atmosphère et du champ magnétique).

La sonde Galileo a trouvé des preuves évidentes que les anneaux sont continuellement alimentés par la poussière formée par les impacts de micrométéorites avec l'intérieur, qui sont très énergétiques, en raison du champ gravitationnel de Jupiter.

SATURN

Sixième planète la plus éloignée du Soleil dans le système solaire, Saturne est une planète géante gazeuse, deuxième après Jupiter en masse et en volume (3,3 fois plus petite que Jupiter, mais 5,5 fois plus grande que Neptune et 6,5 fois plus grande qu'Uranus. Elle est 95 fois plus massive que la Terre. Son diamètre est presque 9 fois plus grand que celui de la Terre.

Saturne est la seule planète du système solaire dont la masse-volume moyenne est inférieure à celle de l'eau: 0,69 g/cm. Cela signifie que son atmosphère, composée principalement d'hydrogène, est moins dense que l'eau, mais son noyau est beaucoup plus dense :) Il a un diamètre environ neuf fois supérieur à celui de la Terre et est composé principalement d'hydrogène.

Saturne a la forme d'un sphéroïde aplati, aplati aux pôles et bombé à l'équateur. Ses diamètres équatorial et polaire diffèrent d'environ 10%, en raison de sa rotation rapide autour de son axe et d'une composition interne très fluide. Les autres planètes géantes gazeuses du système solaire (Jupiter, Uranus, Neptune) sont également aplaties, mais dans une moindre mesure. Comme Jupiter, l'atmosphère de Saturne est

disposée en bandes parallèles, bien que celles-ci soient moins visibles et plus grandes à l'équateur. Les systèmes nuageux de Saturne (ainsi que les tempêtes de longue durée) ont été observés pour la première fois par les missions Voyager. Le nuage observé en 1990 est un exemple de grande tache blanche, un phénomène éphémère sur Saturne qui se produit tous les 30 ans. Si la périodicité reste la même, la prochaine tempête se produira probablement en 2020.

En 2006, la NASA a observé une tempête de la taille d'un ouragan, stationnée au pôle Sud, qui avait un œil bien défini. C'est le seul œil vu sur une autre planète que la Terre.

Les anneaux de Saturne font partie de l'un des plus beaux spectacles du système solaire et en sont la principale caractéristique. Contrairement aux deux autres planètes géantes gazeuses, qui sont très lumineuses (albédo entre 0,2 et 0,6) et empêchent la détection des anneaux qui sont sombres, les anneaux de Saturne peuvent être vus à travers une paire de jumelles. Ils ont une activité permanente: collisions, accumulations de matière, etc.

Saturne possède un grand nombre de satellites. Il est difficile de dire combien il y en a, tout morceau de glace dans les anneaux peut être considéré comme un satellite. En 2009, 62 satellites ont été identifiés. 53 ont été confirmés et ont reçu des prénoms. La plupart d'entre eux sont petits : 31 ont un diamètre inférieur à 10 km, tandis que 13 ont un diamètre inférieur à 50 km. Seuls sept d'entre eux sont assez grands pour prendre une forme sphérique sous l'influence de leur propre gravité. Titan est le plus grand d'entre eux, plus grand que Mercure et Pluton, et le seul satellite du système solaire à atmosphère dense à la surface duquel la mission Cassini a déposé une sonde, Huygens, en 2004. La mission a étudié ce monde où il existe un cycle similaire à celui de l'eau sur Terre, mais du méthane, un élément que l'on trouve dans les trois états à la surface du satellite.

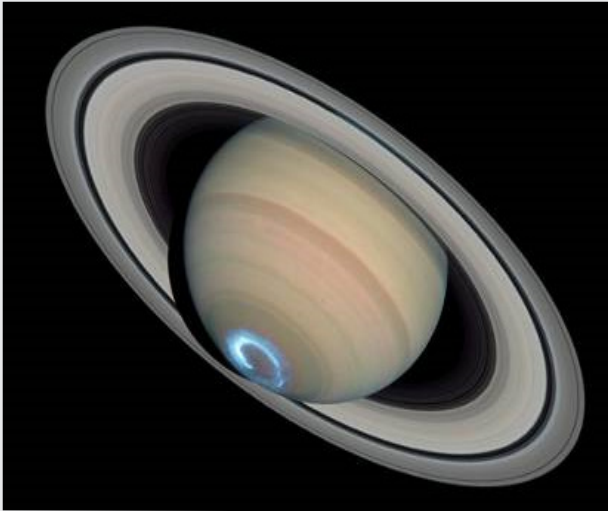


Fig. 16 Saturne, aurore vue

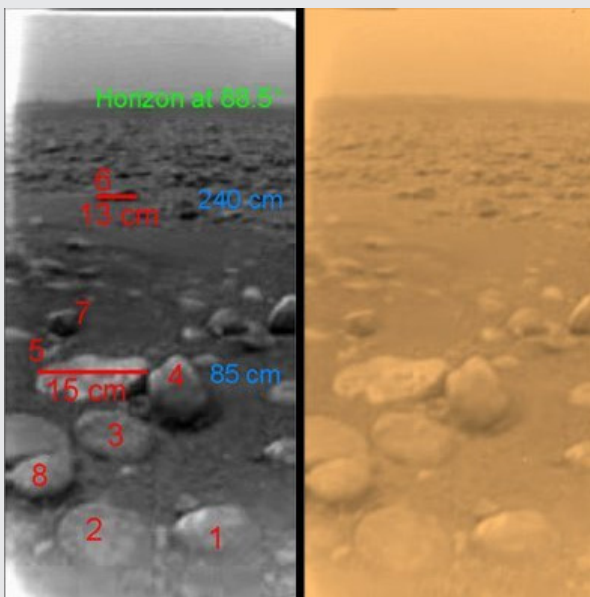


Fig 17 Dernière image de la surface de Titan, mission Cassini/Huygens

URANUS

Uranus est également une planète géante gazeuse et, à ce titre, elle possède des anneaux : au moins 13 principaux. Elle est la septième plus éloignée du Soleil dans le système solaire, la troisième en dimensions et la quatrième en masse. C'est la première planète découverte à l'ère du télescope. Bien qu'elle puisse être vue à l'œil nu comme les 5 autres planètes classiques, en raison de sa faible luminosité, elle n'était pas facilement identifiable en tant que planète. William Herschel a annoncé sa découverte le 13 mars 1781, repoussant ainsi les frontières du système solaire pour la première fois dans les temps modernes. Uranus est la première

planète découverte au moyen du télescope.

Uranus et Neptune ont une composition interne et atmosphérique différente de celle des autres grandes planètes gazeuses, Jupiter et Saturne. C'est pourquoi les astronomes les classent parfois dans une autre catégorie, celle des géants ou sous-géants congelés.

L'atmosphère d'Uranus, bien que composée principalement d'hydrogène et d'hélium, contient également de grandes quantités de glace d'eau, d'ammoniac et de méthane, ainsi que des traces d'hydrocarbures. Uranus possède l'atmosphère la plus froide du système solaire, atteignant un minimum de -224 C . Elle possède une structure nuageuse complexe, les couches inférieures étant probablement constituées d'eau et les couches supérieures de méthane. Comme les autres planètes géantes gazeuses, Uranus possède un système d'anneaux, une magnétosphère et de nombreux satellites naturels. Le système d'Uranus est unique dans le système solaire, car son axe de rotation est pratiquement sur l'orbite de son plan de révolution autour du Soleil. Ses pôles nord et sud sont ceux où les autres planètes ont leur équateur. En 1986, Voyager 2 a acquis des images d'Uranus, qui montrent une planète sans caractéristiques particulières en lumière visible, sans couches de nuages ni systèmes de nuages comme sur les autres planètes gazeuses. Cependant, des observations récentes ont montré des signes de changement de saisons et d'augmentation de l'activité météorologique à l'approche de l'équinoxe de décembre 2007. Le

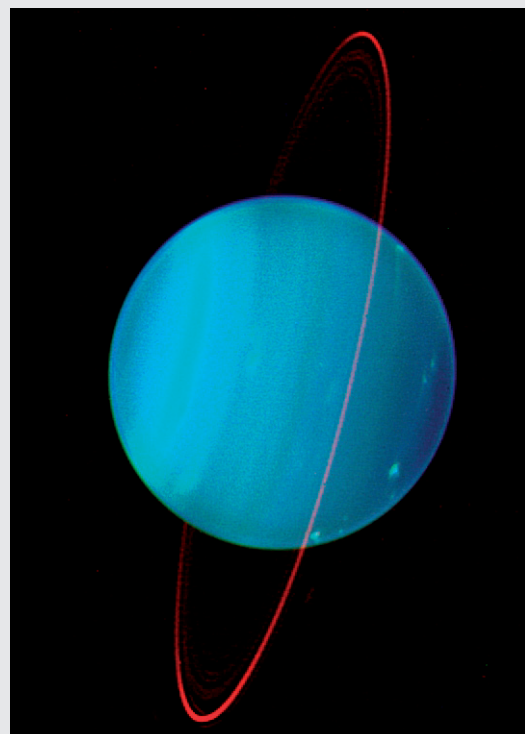


Fig. 18. Uranus

vent peut atteindre la vitesse de 250 m/s à sa surface.

Contrairement à toute autre planète du système solaire, Uranus a un axe de rotation très abrupt, presque parallèle à son plan orbital. On pourrait dire qu'il roule sur son orbite et expose successivement ses pôles Nord et Sud au Soleil. Une conséquence de cette orientation est que les régions polaires reçoivent plus d'énergie du Soleil que les régions équatoriales. Cependant, Uranus reste plus chaude à l'équateur qu'aux pôles, un mécanisme qui n'est pas encore expliqué. Aucune théorie de son inclinaison ne peut ignorer l'idée d'une collision catastrophique avec un autre corps avant sa formation actuelle.

La période de révolution d'Uranus autour du Soleil est de 84 années terrestres. Sa distance moyenne par rapport au Soleil est d'environ 3 milliards de kilomètres. L'intensité du flux solaire sur Uranus est d'environ 1/400 de celle reçue par la Terre.

La période de rotation des couches internes d'Uranus est de 17 heures et 14 minutes. Cependant, des vents violents dans le sens de la rotation ont lieu dans la haute atmosphère, comme pour toutes les planètes géantes gazeuses. Par conséquent, aux alentours de 60 degrés de latitude, les parties visibles de l'atmosphère se déplacent plus rapidement et effectuent une rotation complète en moins de 14 heures. La pression atmosphérique est inférieure à 1,3 bar) et sa composition chimique est la suivante : 83% d'hydrogène (H₂), 15% d'hélium, 2,3% de méthane, 0,009%, des traces de deutérium et des glaces de : ammoniac, eau, hydro-sulfure d'ammonium (NH₄SH) et méthane (CH₄).

Bien que nous sachions très peu de choses sur sa composition interne, nous savons avec certitude qu'elle est différente de celle de Jupiter ou de Saturne. En théorie, il devrait avoir un noyau solide de silicates de fer, d'un diamètre d'environ 7 500 km, entouré d'un bouclier formé de glace d'eau mélangée à de l'hélium, du méthane et de l'ammoniac, large de 10 000 km, suivi d'une couche superficielle d'hydrogène et d'hélium liquide, longue d'environ 7 600 km, qui fond lentement dans l'atmosphère. Contrairement à Jupiter et Saturne, Uranus n'est pas assez massive pour retenir l'hydrogène à l'état métallique autour de son noyau. La couleur bleu-vert est due à la présence de méthane dans l'atmosphère, qui absorbe la lumière solaire rouge et infrarouge.

Uranus compte au moins 27 satellites naturels. Les deux premiers ont été découverts par William Herschel le 13 mars 1787 et s'appelaient Titania et Oberon.

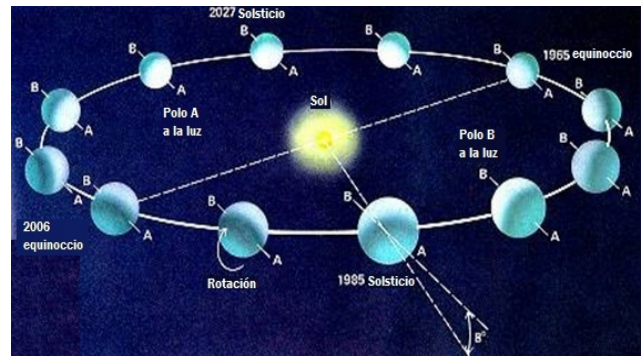


Fig 19. Uranus sur son orbite

NEPTUNE

Neptune est la huitième planète du système solaire et la plus éloignée du Soleil. C'est aussi la dernière planète géante gazeuse. Il a été découvert par l'astronome allemand Johann Gottfried Galle, le 23 septembre 1847, en suivant les indications d'Urban Le Verrier, qui, comme l'astronome anglais John Couch Adams, avait prévu par calcul, que dans cette région du ciel, il pourrait être trouvé.



Fig. 20: Neptune

Neptune n'est pas visible à l'œil nu et apparaît comme un disque bleu-vert à travers le télescope. Il n'a été visité qu'une seule fois par la sonde spatiale Voyager 2, qui est passée à proximité le 25 août 1989. Son plus grand satellite est Triton. Sa composition interne est similaire à celle d'Uranus. On pense qu'elle possède un noyau solide formé de silicates et de fer, presque aussi grand que la masse de la Terre. Son noyau, comme celui d'Uranus, est censé être couvert d'une composition assez uniforme (roches fondantes, glace, 15% d'hydrogène et un peu d'hélium), il n'a pas de structu-

re "stratifiée" comme Jupiter et Saturne.

Sa couleur bleuâtre provient principalement du méthane, qui absorbe la lumière aux longueurs d'onde rouges. Son atmosphère est composée de 80% d'hydrogène (H₂), 19% d'hélium, 1,5% de méthane, ~0,019% de deutérium, ~0,00015 d'éthane et des glaces de : ammoniaque, eau, hydrosulfure d'ammonium et méthane.

Comme les autres planètes géantes gazeuses, elle possède un système éolien formé par des vents très rapides en bandes parallèles à l'équateur, de fortes tempêtes et des tourbillons. Les vents les plus rapides sur Neptune soufflent à plus de 1 000 miles à l'heure. Lors de la visite de Voyager 2, la formation la plus intéressante observée était la "Grande Tache Sombre", qui pourrait avoir la taille de la "Grande Tache Rouge" de Jupiter. Cet endroit pourrait être un ouragan noir géant qui se déplacerait à environ 1 000 km/h. Les anneaux planétaires de Neptune sont à peine visibles, sombres, et leur origine est encore inconnue. Neptune possède au moins 14 satellites naturels, dont le plus important est Triton, découvert par William Lassell seulement 17 jours après la découverte de Neptune.

Planètes Dwarf

Pluton, Charon et Eris

Bien qu'il y ait dix planètes naines confirmées, Pluton (39 UA de distance moyenne), son satellite Charon et Eris, planète naine de plus grande dimension que Pluton et qui a défini la reclassification de ces objets dans le Soar System, sont particulièrement intéressants.

Pluton a été découverte en 1930, considérée comme une planète et reclassée en août 2006, comme planète naine. Il a une orbite excentrique, inclinée de 17° par rapport à son plan écliptique. Son périhélie s'étend à 29,7 UA et son aphélie à 49,5 UA. Le plus grand satellite de Pluton, Charon, est assez grand pour graviter autour d'un centre de gravité situé au-dessus de la surface de chacun des corps. Quatre autres petits satellites, Nix, Hydra, Cerberus, Styx, sont en orbite autour de la paire Pluto-Charon. Pluton est en résonance orbitale 3:2 avec Neptune (la planète tourne deux fois autour du Soleil, tandis que Neptune tourne trois fois autour d'elle).

Eris a été découverte en janvier 2005 par une équipe de l'Observatoire de Palomar dirigée par Michael E. Brown. Légèrement plus grande que Pluton, elle était considérée comme la dixième planète jusqu'à la reclassification de l'UAI en 2006. Elle possède une petite lune appelée Dysnomia. Comme Pluton, elle fait partie de la ceinture de Kuiper ou des objets transneptu-

niens.

Autres corps dans le système solaire

L'environnement interplanétaire

En plus de la lumière, le Soleil rayonne un flux continu de particules chargées (plasma) appelé vent solaire. Ce flux se dissipe à une vitesse de 1,5 million de km/h, créant ainsi l'héliosphère, une fine atmosphère qui baigne le système solaire jusqu'à environ 100 UA (marqué l'héliopause). La matière qui compose l'héliosphère est appelée le milieu interplanétaire. Le cycle solaire de 11 ans, ainsi que les fréquentes éruptions solaires et les éjections de masse coronale, perturbent l'héliosphère et créent un climat spatial. La rotation du champ magnétique solaire agit sur le milieu interplanétaire, créant la couche héliosphérique actuelle, qui est la plus grande structure du système solaire.

Le champ magnétique terrestre protège l'atmosphère du vent solaire. L'interaction entre le vent solaire et le champ magnétique terrestre est à l'origine des aurores boréales. L'héliosphère assure une protection partielle du système solaire contre les rayons cosmiques, qui est plus importante sur les planètes à champ magnétique.

Le milieu interplanétaire comporte au moins deux régions de poussière cosmique en forme de disque. Le premier, le nuage de poussière zodiacal, se trouve dans le système solaire interne et produit la lumière zodiacale. Il s'est probablement formé à la suite d'une collision à l'intérieur de la ceinture d'astéroïdes, causée par des interactions avec les planètes. La seconde s'étend de 10 à 40 UA et s'est probablement formée lors de collisions similaires dans la ceinture de Kuiper. Ce sont les vestiges de l'accrétion planétaire. Ils comprennent diverses populations d'astéroïdes, de comètes et d'objets transneptuniens.

Comètes

Les comètes sont de petits corps du système solaire, d'un diamètre de l'ordre du kilomètre, généralement composés de glace volatile. Ils ont des orbites très excentriques, le périhélie se trouvant parfois dans le système solaire interne, tandis que l'aphélie se trouve au-delà de Pluton. Lorsqu'une comète entre dans le système solaire intérieur, sa proximité avec le Soleil entraîne la sublimation et l'ionisation de sa surface, créant ainsi une queue : une longue queue formée de gaz et de poussière.

Les comètes à courte période (par exemple la comète de Halley) complètent leur orbite en moins de 200 ans et semblent provenir de la ceinture de Kuiper. Les comètes à longue période (par exemple la comète

Hale-Bopp) ont une périodicité de plusieurs milliers d'années et semblent avoir leur origine dans le nuage de Oort. Enfin, il y a quelques comètes qui ont une trajectoire hyperbolique et semblent venir de l'extérieur du système solaire. Les anciennes comètes qui ont perdu la plupart de leurs composants volatils sont maintenant considérées comme des astéroïdes.

Les Centaures, situés entre 9 et 30 UA, sont des corps de glace ressemblant à des comètes, en orbite entre Jupiter et Neptune. Le plus grand centaure connu, Chariklo, a un diamètre compris entre 200 et 250 km. Le premier centaure découvert, Chiron, était à l'origine considéré comme une comète, car il a développé une queue comme celle-ci. Certains astronomes classent les centaures comme des corps de la ceinture de Kuiper.



Fig. 121 Comète

Les réservoirs de corps mineurs dans le système solaire

Les réservoirs sont des régions relativement stables du système solaire, où les objets peuvent rester pendant des périodes comparables à l'âge du système, jusqu'à ce qu'une force perturbatrice modifie leur orbite.

Il y a trois grands réservoirs dans le SS:

1. La ceinture d'astéroïdes principale. D'autres populations viendraient de cette région, comme les astéroïdes proches de la Terre (connus sous le nom de NEAS).

Les astéroïdes sont principalement de petits corps du système solaire composés de roches et de minéraux métalliques non volatils. La ceinture d'astéroïdes occupe une orbite entre Mars et Jupiter, à une distance de 2,3 à 3,3 UA du Soleil. Il pourrait s'agir de vestiges

du système solaire en formation, qui n'ont pas réussi à former un corps céleste plus grand, en raison de l'interférence gravitationnelle de Jupiter.

La taille des astéroïdes varie de plusieurs centaines de kilomètres à des grains de poussière microscopiques. Toutes, sauf la plus grande, Ceres, sont considérées comme de petits corps, bien que certaines d'entre elles, comme Vesta et Hygeia, pourraient être classées comme des planètes naines, s'il est démontré qu'elles atteignent l'équilibre hydrostatique. La ceinture d'astéroïdes contient des milliers, voire des millions de corps d'un diamètre de plus d'un kilomètre. Cependant, la masse totale de la ceinture ne représente pas plus d'un millième de celle de la Terre.

Ceres (2,77 UA) est le plus grand corps de la ceinture d'astéroïdes et la seule planète naine (classée comme telle en 2006). Avec un diamètre de près de 1 000 km, il suffit de sa gravité pour lui donner sa forme sphérique.

2. La ceinture transneptunienne. C'est la région d'où proviennent les comètes de courte durée. La ceinture de Kuiper est un grand anneau formé par les débris d'un grand anneau, similaire à celui de la ceinture d'astéroïdes, mais composé principalement de glace. La première partie de la ceinture de Kuiper s'étend entre 30 et 50 UA du Soleil et s'arrête à "la falaise de Kuiper", où elle commence sa deuxième partie jusqu'à 100 UA. On pense que cette région est la source des comètes de courte durée. Elles sont composées principalement de petits corps, ainsi que de quelques corps plus grands, tels que Quaoar, Varuna ou Orcus, qui peuvent être classés comme des planètes naines. La ceinture de Kuiper pourrait être divisée principalement en objets "classiques" et en objets en résonance avec Neptune. Un exemple de cet effet serait celui des plutinis qui effectuent deux orbites alors que Neptune en a effectué trois.

3. Le nuage de Oort. Il a une distribution sphérique et est formé par les planétésimaux glacés balayés par les planètes géantes lors de la formation des SS. Grâce aux perturbations dues au passage rapproché d'étoiles ou de nuages moléculaires géants, ou aux marées galactiques, les orbites de certains de ces objets peuvent changer en déviant vers l'intérieur du système solaire, se transformant en comètes de longue période.

Les autres systèmes exoplanétaires

La ceinture de Kuiper est un grand anneau composé
En 1995, les astronomes suisses Michael Mayor et Didier Queloz ont annoncé la détection d'une exoplanète en orbite autour de 51 Pegasi. Cette étoile et sa planète ont été nommées Helvète et Dimidio en 2015, suite à un vote public, promu par l'AIU.

Le 10 mai 2016, la collaboration des scientifiques travaillant sur le projet de mise en orbite du télescope Kepler, visant à détecter les exoplanètes de type terrestre, a annoncé la plus grande collection d'exoplanètes jamais connue. Sur un total de quelque 5 000 candidates, plus de 3 200 ont été vérifiées, et 2 325 d'entre elles ont été découvertes par le télescope Kepler.

Le satellite "Transiting Exoplanet Survey" de la NASA, lancé en 2018, utilise la même méthode que le télescope Kepler pour surveiller 200 000 étoiles brillantes proches et rechercher des planètes, en particulier celles de la taille de la Terre ou plus grandes (les super Terres).

Les astronomes posent des questions telles que : combien d'étoiles ont des planètes ? Combien de ces systèmes exoplanétaires ont des planètes dans la zone habitable, où l'eau peut être à l'état liquide, et de ces planètes situées à une distance appropriée de leur étoile, combien ont développé la vie, ces questions restent sans réponse.

Bibliographie

Collin, S, Stavinschi, M, *Leçons d'astronomie*, Ed. Ars Docendi, 2003

Kovalevsky, J, *Modern Astrometry*, Springer Verlag, 2002.

Nato A., *Advances in Solar Research at eclipses, from ground and from space*, eds. J.P. Zahn, M. Stavinschi, Series C: Mathematical and Physical Sciences, vol. 558, Kluwer Publishing House, 2000.

Nato A, *Theoretical and Observational Problems Related to Solar Eclipses*, eds. Z. Mouradian, M. Stavinschi, Kluwer, 1997.

Le modèle de l'horizon local et les cadrans solaires

Rosa María Ros

Union Astronomique Internationale, Université Polytechnique de Catalogne (Barcelone, Espagne)

Résumé

L'étude de l'horizon est cruciale pour faciliter les premières observations pour les élèves. C'est un modèle simple qui permet de faciliter l'étude et la compréhension des notions de base de l'astronomie. Le modèle peut servir également comme un modèle simple d'une Horloge équatoriale.

Objectifs

- Comprendre le mouvement .
- Comprendre le mouvement de la voute céleste.
- Comprendre la construction d'un modèle simple d'un cadran solaire.

Les mouvements de la Terre

Il est connu aujourd'hui que la terre tourne sur elle-même autour de son axe ce qui engendre le jour et la nuit. L'axe de la rotation de la terre est connu par les anciens astronomes comme l'axe de la Terre, le ciel semble aussi tourner aussi sur l'axe de la terre, ce mouvement engendre aussi le ciel du jour et le ciel nocturne. La terre tourne autour du soleil selon une orbite elliptique, dont le soleil occupe l'un des deux foyers de l'ellipse.

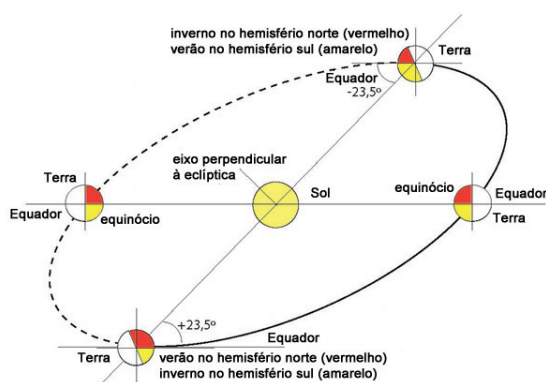


Fig.1: schéma de l'orbite de la terre autour du soleil, l'angle entre le plan de l'équateur et le plan de l'écliptique est 23.5°. L'angle entre l'axe de la rotation de la terre et vertical est aussi 23.5°

La Terre prend une année pour faire un tour complet autour du soleil dans un plan qu'on appelle écliptique, le plan de l'écliptique n'est pas perpendiculaire à l'axe de la rotation de la Terre. L'angle entre l'axe de

la rotation de la terre et la verticale (l'axe perpendiculaire au plan de l'écliptique) est 23.5°. En fait c'est le même angle qui existe entre le plan de l'équateur et le plan de l'écliptique (figure 1). Cette inclinaison est l'origine des saisons. Pour observer ce phénomène on va construire un petit modèle (figure 2).



Fig.2a, 2b et 2c: distribution de 4 positions du globe terrestre autour d'une lampe qui représente le soleil, l'angle entre la ligne qui joint la terre et le centre du soleil, et le plan de l'équateur, est 23°.

Il est nécessaire de réaliser l'expérience dans une salle obscure (il est important de prendre en considération les différentes hauteurs de la lampe et les modèles du globe terrestre).

Il est évident que l'hémisphère nord reçoit plus de lumière lorsque la terre se trouve en position A que lorsque elle est en position C (figure 3). Tandis que la zone éclairée dans l'hémisphère sud est plus importante en position C qu'en A.

Aux points B et D, les deux hémisphères sont éclairés de la même façon, ils correspondent à l'équinoxe du printemps et l'équinoxe de l'automne.

Si à la fois on a une grande surface du globe est éclairée et une autre moins éclairée on dit que c'est l'été quand la surface éclairée est grande et c'est l'hiver quand la surface éclairée est petite.

Quand la terre est à la position C, c'est l'hiver dans l'hémisphère nord et l'été dans l'hémisphère sud.



Fig. 3: modèle qui explique le phénomène des saisons. En A c'est l'été dans l'hémisphère nord et l'hiver dans l'hémisphère Sud. Quand la terre est à la position C, c'est l'hiver dans l'hémisphère nord et l'été dans l'hémisphère sud.

Ce modèle permet aux élèves d'imaginer que la hauteur du soleil change en fonction des saisons. Par exemple dans l'hémisphère nord, si on est à la position A, une personne observe le soleil au-dessus de l'équateur céleste de 23.5° (figure 4a).

Par contre si on est dans l'hémisphère nord et à la position C, on observe le soleil au-dessous de l'équateur céleste de -23.5° (figure 4b). À la position B et D on observe exactement le soleil à l'équateur céleste.

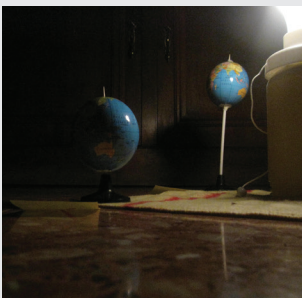


Fig. 4a. à la position A c'est l'été dans l'hémisphère Nord, le soleil est à 23.5° au-dessus de l'équateur, par contre dans c'est l'hiver dans l'hémisphère sud.



Fig. 4b. à la position C, c'est l'hiver dans l'hémisphère nord et l'été dans l'hémisphère sud, par contre c'est l'été dans l'hémisphère sud.

La Terre parallèle

A Observer la terre depuis l'espace n'est pas accessible que pour les astronautes depuis un vaisseau spatial. Pour voir la terre depuis l'espace on peut faire une simulation à l'aide d'un globe éclairé de la même manière que la terre c'est-à-dire le soleil est la source de lumière.

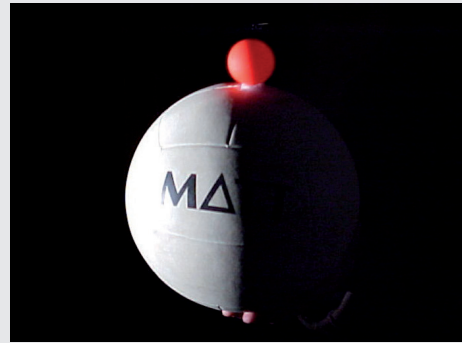


Fig. 5: un projecteur éclaire deux sphères de la même façon, les deux sphères présentent les mêmes zones éclairées et les mêmes zones d'ombre de la même façon, les deux sphères présentent les mêmes zones éclairées et les mêmes zones d'ombre.

Si un projecteur éclaire deux sphères de tailles différentes, les zones éclairées et les zones d'ombres des deux sphères sont les mêmes. Si on oriente correctement le globe on aura le même angle de vue c'est comme un astronaute qui observe la terre depuis l'ISS.

À l'aide d'un modèle de globe terrestre posé sur un verre vide de telle façon que l'axe du globe de la maquette est parallèle à l'axe de la rotation de la Terre tel que l'on peut la déduire de la boussole. Par ailleurs, la ville où l'on habite doit être visible en haut du globe et l'on peut facilement déduire que quel que soit notre déplacement sur le globe on reste toujours en position horizontale, c'est à dire au sommet du globe.

À l'aide d'une boussole on peut déterminer la direction du nord pour positionner l'axe du globe et positionner notre place sur le globe (figure 6a). Pour simplifier les choses on peut illustrer notre position à l'aide d'un modèle d'un personnage (figure 6b).

À l'aide de cure-dents et de la pâte à modeler on peut simuler l'évolution de l'ombre d'un gnomon tout au long de la journée et observer l'effet de la rotation de la Terre sur elle-même.

La ligne qui sépare la zone ensoleillée et la zone sombre sur la Terre est animée d'un mouvement de translation. On peut remarquer que c'est l'été pour la figure (figure 7a) l'hiver pour la figure (figure 7b) et les équinoxes pour la figure (figure 7c). Vérifier encore une autre fois sur la (figure 3).

Il est nécessaire maintenant d'introduire un vrai modèle de l'horizon qui explique le mouvement diurne et le mouvement apparent du soleil par rapport à l'horizon. On va construire un modèle local de l'horizon.



Fig.6.a: le modèle ordinaire du globe terrestre ne peut pas servir pour cette activité, il faut un modèle sans pied posé sur un verre et orienté.



Fig.6.b : pour indiquer notre position on peut utiliser un modèle d'un personnage, avec des cure-dents et de la pâte à modeler on peut simuler l'évolution de l'ombre d'un gnomon.



Fig. 7.a: Dans l'hémisphère nord, le pôle nord est dans la zone ensoleillée signifie donc que c'est l'été pour cet hémisphère, on peut remarquer le phénomène du soleil de minuit. Dans l'hémisphère sud, le pôle sud est à l'ombre, c'est l'hiver dans cet hémisphère.



Fig. 7.b : Le pôle nord est dans la zone de la nuit, donc c'est l'hiver de l'hémisphère nord. Dans l'hémisphère sud, le pôle sud dans la zone ensoleillée c'est l'été pour cet hémisphère.

Observations

Les enseignants dans les différents domaines scientifiques (mécanique, électricité, chimie, biologie, etc.) ont tendance à dire qu'il n'est pas possible de travailler correctement sans laboratoire. Alors que, les professeurs d'astronomie ont tendance à être heureux parce qu'ils ont toujours un laboratoire astronomique. Toutes les institutions et les écoles ont un endroit où les élèves jouent: les terrains de jeux à l'extérieur ou la cour de l'école. Mais ce ne sont pas seulement des lieux de jeux, ils sont aussi des laboratoires astronomiques: un lieu qui offre la possibilité de réaliser des activités astronomiques pratiques. Si nous avons un laboratoire dans chaque école ou institut, il semble pertinent de l'utiliser!



Fig.8: Une représentation classique de la sphère céleste.

Le principal problème est que dans la cour de l'école (le laboratoire astronomique), les élèves ont du mal à faire le lien entre les explications sur la sphère céleste données à l'intérieur par le professeur et ce qu'ils peuvent observer.

Avec un modèle représenté dans la (figure 8), l'élève ne trouve pas de difficultés pour comprendre les notions de méridiens, parallèles ou l'astronomie de position. A partir d'un point de vue de l'extérieur, n'est pas compliqué pour l'élève de comprendre la notion de constellation avec un modèle représenté dans (figure 9).

Les problèmes commencent quand l'élève imagine qu'il est à l'intérieur d'une sphère céleste. Il est impossible de voir l'axe de la rotation de la terre et ce n'est pas facile de trouver une référence dans le ciel (figure 10).

Il est possible de construire un modèle qui permet à l'élève de comprendre la notion de la sphère céleste de deux points de vue. Dans ce modèle les lignes imaginaires de la sphère céleste seront visibles, ce modèle permet de comprendre parfaitement la notion de l'horizon.

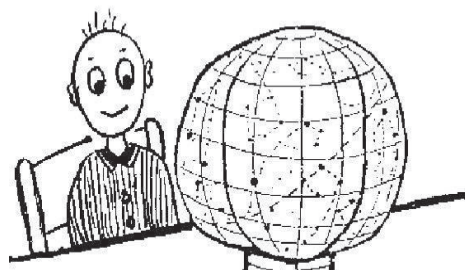


Fig.9: La sphère céleste vue depuis l'extérieur.

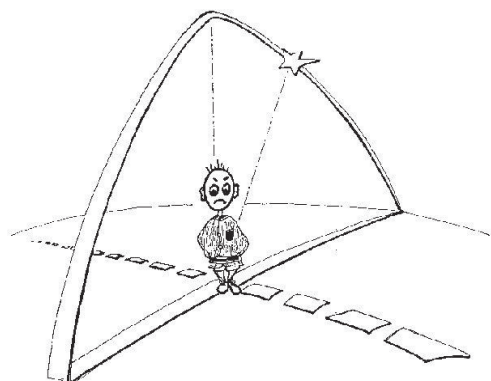


Fig.10 : la sphère céleste depuis l'intérieur

Le modèle de l'horizon local

Avec une caméra et un trépied nous commençons par prendre une photo de l'horizon. Lorsqu'on prend la photo, il faut qu'elle ait une zone commune avec la suivante, et ensuite on peut joindre toutes les photographies pour obtenir l'horizon comme une chaîne de photographies en continu. Quand nous avons toutes les photos, nous pouvons les relier. Placez chaque photo à côté de l'autre de façon continue, puis faites un cylindre qui sera fixé dans une base carrée en bois au même endroit que nous avons pris les photos (figure 12). Il est très important de situer toutes les photos selon l'horizon réel.

Sachant la valeur de la latitude du lieu on peut fixer l'axe de la rotation la terre dans le modèle. Comme le modèle est orienté selon l'horizon local, le prolongement montre l'axe du monde ainsi, on peut imaginer la position des points cardinaux sud (figure 13). Plus tard, nous pouvons tracer la droite Nord-Sud dans le modèle et aussi dans la cour où nous avons pris les photos (en utilisant le processus normal pour déterminer la droite nord-sud). C'est très important car chaque fois que nous utilisons ce modèle, nous devons l'orienter, et il est très utile d'avoir cette ligne droite Nord-Sud réelle pour faciliter le travail. (Nous pouvons vérifier cette direction avec une boussole).

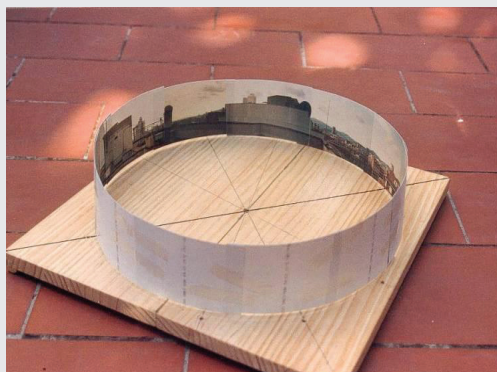


Fig. 11: L'horizon local.

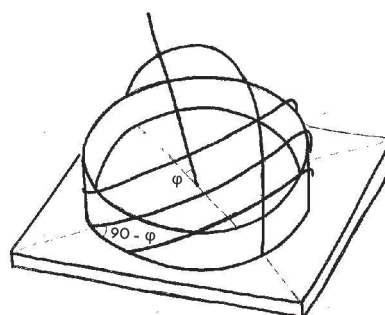


Fig. 12: Modèle montrant la direction de l'axe du monde.

L'étape suivante consiste à fixer le méridien local du lieu. On peut fixer un fil de fer passant par les points cardinaux nord et sud et l'axe de la rotation de la Terre. Avec ce modèle on peut imaginer le méridien du lieu dans le ciel (figure 14).

Nous simulons l'équateur avec un fil de fer perpendiculaire à l'axe de rotation terrestre; Il est fixé aux points cardinaux est et ouest (dans le plan horizontal qui est perpendiculaire à la ligne nord-sud).

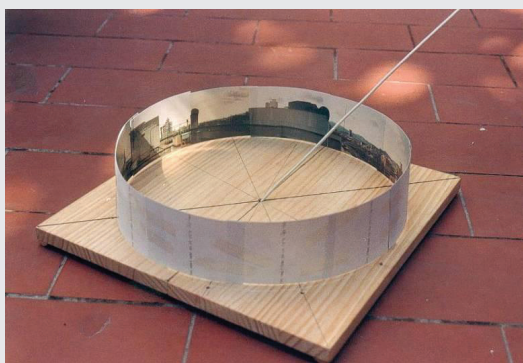


Fig. 13: Modèle montrant l'horizon et l'axe des pôles.

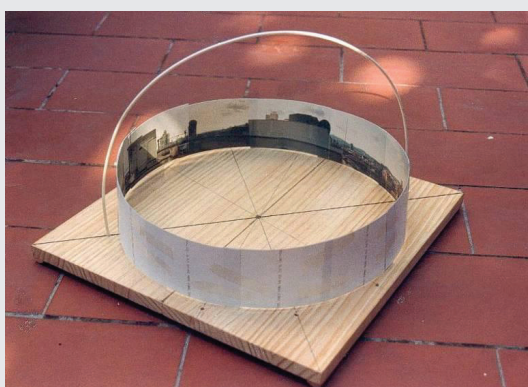


Fig. 14: Modèle montrant le méridien local.

Je rappelle que nous sommes en train de construire le modèle local de l'horizon. L'étape suivante consiste à fixer les trajectoires apparentes du soleil. Afin d'introduire correctement la pente de la trajectoire du soleil dans le ciel, on prendra quatre ou cinq photos lors du lever ou du coucher du soleil (prendre des photos du soleil quand il est assez haut dans le ciel est dangereux). Les photos nous donnent des références pour fixer les fils de fer qui représentent les trajectoires apparentes du soleil (figure 16).

On peut se servir des photos du lever ou du coucher des étoiles dans la direction des points cardinaux EST ET OUEST pour obtenir l'inclinaison (par rapport à l'horizon) de la trajectoire apparente des étoiles (figure 17).

Il est conseillé de prendre les photos mentionnées

dans le paragraphe précédent loin de la lumière de la ville, on est obligé de se déplacer dans une zone loin de la pollution lumineuse. On est obligé d'utiliser un appareil-photo réflex mono-objectif. Il est important de fixer l'appareil photo parallèle à l'horizon. 10 mn de temps de pause est suffisant pour prendre la photo.

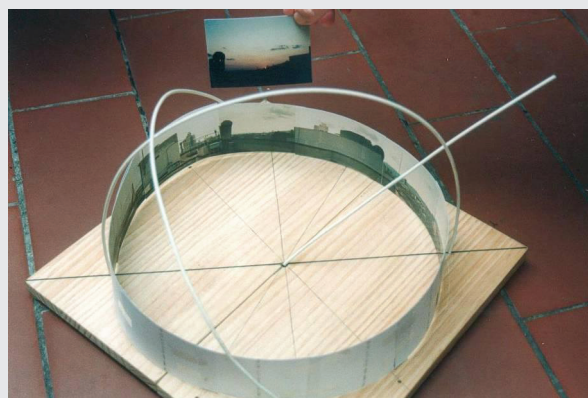


Fig. 15: Le point du coucher du soleil le jour de l'équinoxe du printemps ou l'équinoxe de l'automne

On peut profiter de l'occasion et réaliser une série de photos du méridien local allons du nord au sud en passant par le zénith. Avec toutes les photos on peut construire une bande méridienne. Avec cette bande les élèves peuvent mieux comprendre le mouvement de la sphère céleste. Les longueurs des trajectoires des étoiles changent.



Fig. 16: Tracé du lever du soleil

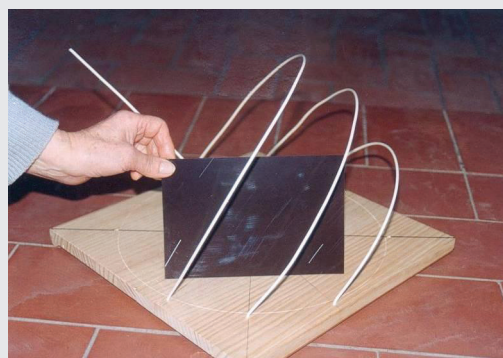


Fig. 17: Tracé du mouvement des étoiles à l'EST

La longueur de la trajectoire est au minimum autour du pôle et au maximum autour de l'équateur.

En se servant des deux photos de l'horizon prisent du coté Est et du côté Ouest on peut savoir l'inclinaison des tracés des étoiles à l'équateur. Par la suite on peut fixer le fil de fer qui symbolise l'équateur céleste (figure 11).

On peut introduire la bande de photos du méridien local sur le modèle. Il suffit de faire quelques copies et d'y faire un trou qui indique le pôle, afin d'introduire l'axe de rotation. Notez que le fil de l'équateur correspond aux traces en ligne droite qui sont sur la bande. Avec ce modèle, nous pouvons offrir aux élèves la possibilité de voir la sphère céleste de l'intérieur et de l'extérieur.

Si nous prenons à nouveau deux photos du premier jour de l'hiver et de l'été lorsque le Soleil se lève et se couche, les élèves pourront remarquer que les lieux du lever et du coucher sont très différents (dans leur ville). La différence entre eux est étonnante. Vous pouvez également définir les parallèles du Cancer et du Capricorne avec les images qui donnent la pente de l'équateur, puisque les parallèles suivent cette même inclinaison. Avec un rapporteur simple, il est possible de vérifier que l'angle interne entre le tropique de Cancer et l'équateur est d'environ 23° , et c'est aussi l'angle entre l'équateur et le tropique du Capricorne (figures 19 et 20).

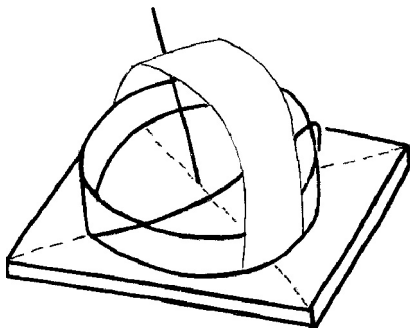


Fig. 18: La bande de photos du méridien.

Pour les élèves, il est intéressant pour eux de voir que les levers et les couchers du soleil ne coïncident pas exactement toujours avec l'est et l'ouest, respectivement. Il y a beaucoup de livres qui mentionnent que le Soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest. Les élèves peuvent voir que cela est vrai seulement deux fois par an, et ce n'est pas vrai pour les jours restants (figures 19 et 20).

Ainsi, les élèves peuvent concevoir de façon pratique la sphère céleste de l'intérieur et de l'extérieur. Avec ce modèle, on peut mieux comprendre l'horizon local et la trajectoire du mouvement apparent du soleil.

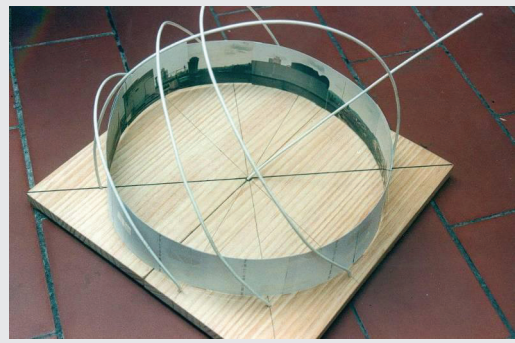


Fig. 19: La trajectoire apparente du soleil pendant les 4 saisons : les points du lever et du coucher du soleil ne se coïncident que pour les deux équinoxes.

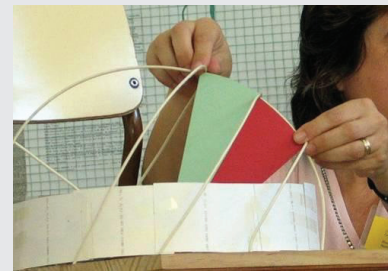


Fig. 20: L'angle entre le lever du soleil de deux saisons consécutives est autour de 23° .

Les cadrans solaires

Le modèle que nous venons de construire ce n'est qu'une horloge solaire simple. Ce modèle nous permet d'expliquer comment construire un cadran solaire.

Dans un plan parallèle au plan équatorial, si on déplace une lampe torche sur le Tropique du Cancer, on peut voir l'ombre du stylet (la tige représentant l'axe de rotation de la Terre) sur la face supérieure du plan. D'autre part, lorsque nous déplaçons la lampe torche sur le Tropique du Capricorne, l'ombre apparaît dans la zone située au-dessous du plan, et il est clair que lorsque la lampe de poche est placée sur l'équateur, aucune ombre ne se produit. Ainsi, il est facile de vérifier que l'horloge équatoriale fonctionne en été et au printemps, montrant des heures sur la face supérieure de l'horloge, en hiver et en automne montrant les heures en dessous, et que deux jours par an, les deux jours d'équinoxes, elle ne fonctionne pas.

Sur la figure 21 la lampe torche indique les mêmes heures sur les trois cadrans horizontal, équatorial et vertical dont le stylet est la tige qui représente l'axe de la rotation de la terre. En plus on peut vérifier dans quelle région du cadran on trouve les heures du matin et les heures de l'après-midi pour les trois cadrans solaires.

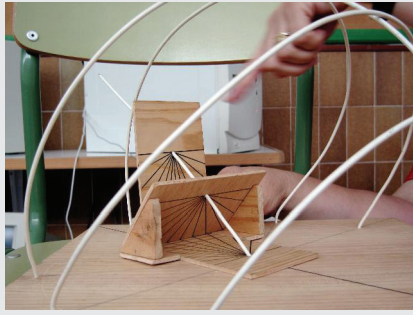


Fig. 21: Le modèle est un grand cadran solaire.

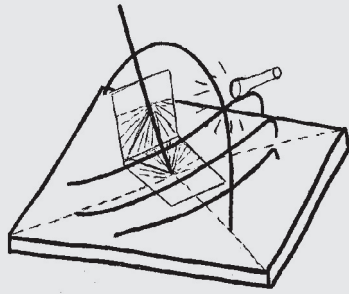


Fig. 22: L'horloge et les saisons

En déplaçant une lampe torche tout au long du tropique du capricorne et du tropique du cancer, il est facile de vérifier que les faisceaux lumineux émis par la lampe torche produisent des sections coniques sur le plan.

La section conique est presque un cercle au solstice de l'été et la surface éclairée est plus petite que la surface elliptique éclairée pendant le solstice de l'hiver.

Ainsi les élèves peuvent facilement comprendre que les rayons solaires sont plus concentrés dans le premier cas que celle dans le deuxième. La température de la surface est plus élevée en été qu'en hiver. Dans le modèle Il est évident aussi que la durée de l'ensoleillement est plus longue en été. En conséquence, il fait plus chaud en été (figure 22).

Nous profitons de cette occasion pour mentionner quelques éléments qui doivent être connus pour construire un cadran solaire.

Un cadran solaire équatorial est facile à construire. Il suffit d'orienter le stylet dans la direction de l'axe de la rotation de la Terre, c'est-à-dire dans la direction nord sud, avec l'angle par rapport à l'horizon est égale à la latitude du lieu figures 23 et 24.

Comme la Terre tourne régulièrement sur elle-même en 24 h, il suffit de graduer la table d'une horloge équatoriale tous les 15° ($360/24=15^\circ$). On obtient un partage de temps en heures égales (figures 25a et 25b).

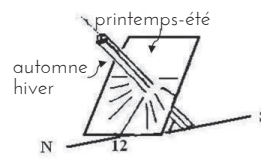


Fig. 23: Un cadran solaire équatorial placé dans l'hémisphère nord.

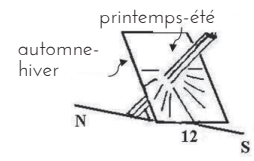


Fig. 24: Le cadran solaire placé dans l'hémisphère sud.

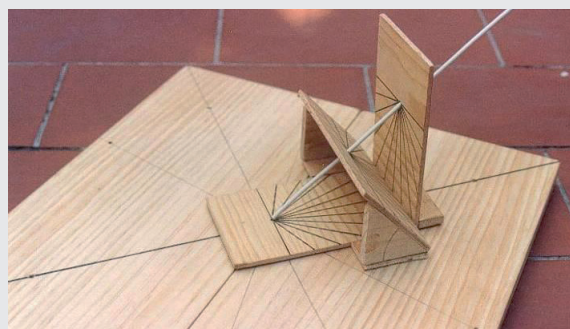
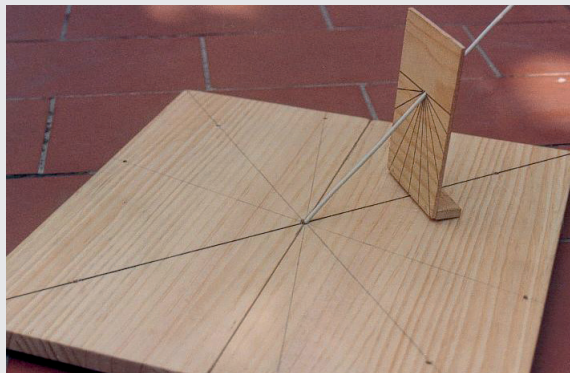
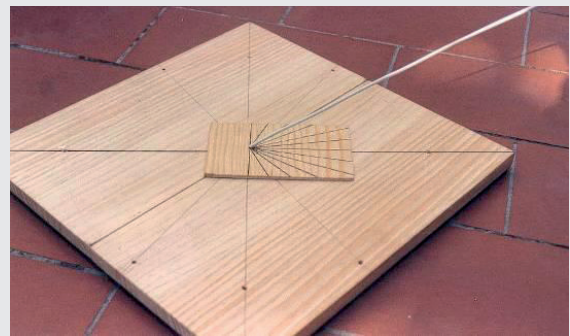
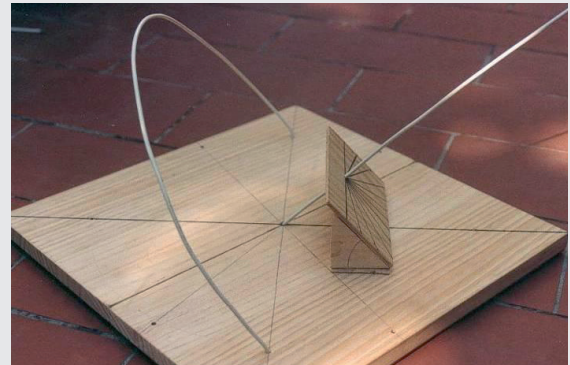


Fig. 25a, 25b, 25c y 25 d: Diversas fotos dos très relógios.

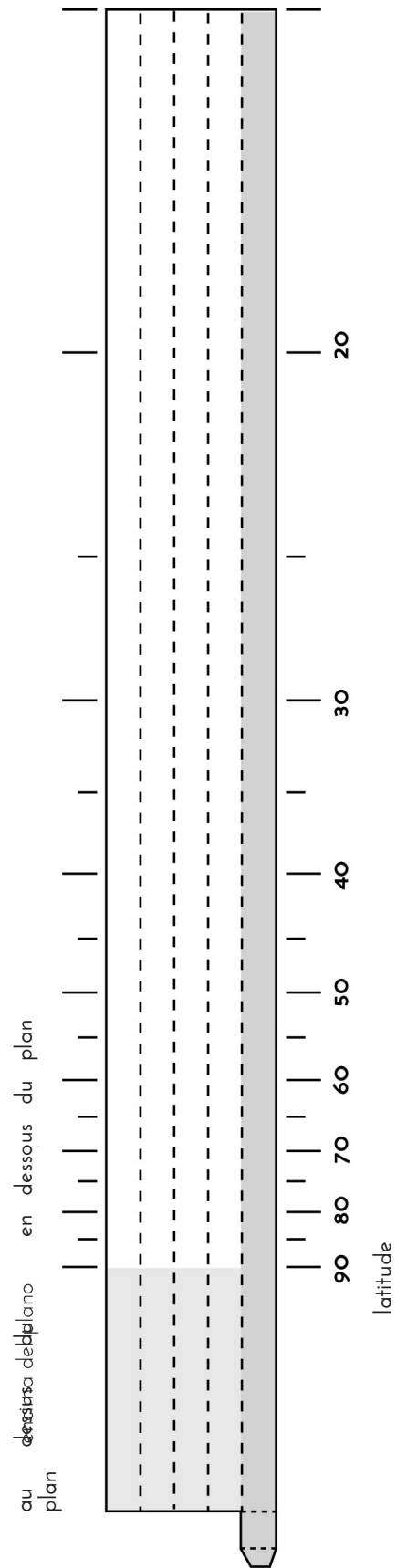
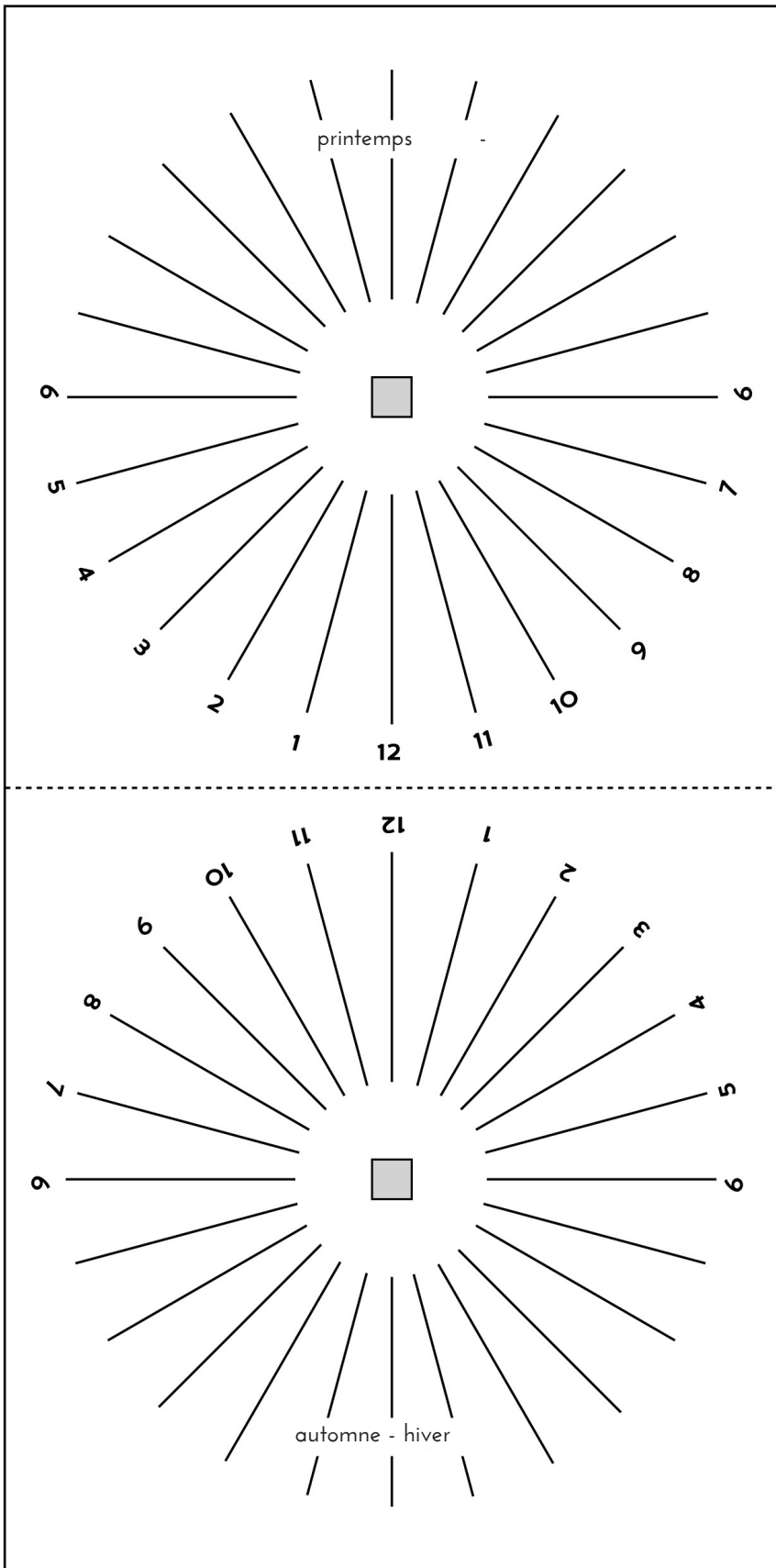


Fig. 26a e Fig. 26b: Modèle d'un cadran équatorial

Les lignes horaires d'une horloge horizontale ou verticale sont obtenues par la projection des lignes horaires du cadran solaire équatorial (figures 25a, 25b, 25c et 25d).

L'heure solaire et l'heure de la montre

Les cadrans solaires donnent le temps solaire, ce qui n'est pas le même que celui des heures de la montre. Pour trouver l'heure de la montre nous devons tenir compte de plusieurs ajustements:

Le temps légal, celui donné par la montre est en fait le temps moyen du méridien standard régional. On passe donc du temps moyen local au temps légal en ajoutant la correction de longitude qui consiste à l'expression de la différence de longitude entre le méridien de Greenwich le méridien local, exprimée en temps (à raison de 4 minutes par degré).

Jours	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1	+3.4	+13.6	+12.5	+4.1	-2.9	-2.4	+3.6	+6.3	+0.2	-10.1	-16.4	-11.2
6	+5.7	+5.1	+11.2	+2.6	-3.4	-1.6	+4.5	+5.9	-1.5	-11.7	-16.4	-9.2
11	+7.8	+7.3	+10.2	+1.2	-3.7	-0.6	+5.3	+5.2	-3.2	-13.1	-16.0	-7.0
16	+9.7	+9.2	+8.9	-0.1	-3.8	+0.4	+5.9	+4.3	-4.9	-14.3	-15.3	-4.6
21	+11.2	+13.8	+7.4	-1.2	-3.6	+1.5	+6.3	+3.2	-6.7	-15.3	-14.3	-2.2
26	+12.5	+13.1	+5.9	-2.2	-3.2	+2.6	+6.4	+1.9	-8.5	-15.9	-12.9	+0.3
31	+13.4		+4.4		-2.5		+6.3	+0.5		-16.3		+2.8

Tableau 1: L'équation du temps

Heure de la montre = heure solaire + plusieurs ajustements

Exemple1: Barcelone (Espagne) le 24 mai.

Ajustement	Commentaire	Résultats
1. Longitude	Barcelone dans le même fuseau horaire que Greenwich	-8.7 m
2. Heure solaire	On ajoute +1h (heure d'été)	+ 60 m
3. Equation du temps	L'équation du temps donne pour le Mai	-3.6 m
Total		+47.7 m

Par exemple, à midi solaire (12h); l'heure de la montre indique $12h + 47.7mn = 12h 47.7 mn$

Heure d'été / heure d'hiver

Certains pays adoptent "l'heure d'été" et "l'heure d'hiver". Une heure est habituellement ajoutée en été. Le changement d'heure en été / hiver est une décision du gouvernement du pays.

L'ajustement de l'équation de temps

La Terre tourne autour du Soleil selon les lois de Kepler, c'est-à-dire, que ce n'est pas un mouvement constant et régulier, ce qui crée un problème sérieux pour les montres mécaniques. On définit le temps moyen comme la moyenne sur une année entière de temps. L'équation du temps est la différence entre «temps solaire réel» et le «temps moyen». Tableau 1.

Orientation

Une autre difficulté pour les élèves est la détermination de l'orientation (direction, sens, Nord, Sud, Est, Ouest..). Dans un cours général d'astronomie, nous devons introduire la notion de la direction et le sens. Il est possible que nos élèves n'étudient jamais l'astronomie. Le résultat minimal attendu d'un cours d'astronomie est que les élèves seront en mesure de re

Exemple2: Tulsa, Oklahoma (USA), le 16

Ajustement	Commentaire	Résultats
1. Longitude	Meridiano "standard" de Tulsa está a 90° W.	+24 m
2. Heure solaire	En November, on ne change pas l'heure de la montre	0 m
3. Equação do Tempo	Lemos a tabela para 16 de novembro	-15.3 m
Total		+ 8.7 m

Par exemple: à midi solaire 12h, la montre indique $12h + 8.7 mn = 12h 8.7 mn$

connaître la trajectoire du Soleil au-dessus de l'horizon, savoir que les planètes se déplacent à travers l'horizon, et en particulier apprendre à localiser les coordonnées géographiques de leur ville.

Se servir d'un modèle conçu pour résoudre les notions mentionnées dans le paragraphe précédent est très

efficace pour clarifier de nombreuses questions liées à l'orientation et à l'horizon local.

Ce modèle est très utile pour expliquer la position locale de la sphère céleste pendant le jour et la nuit. Cela aide vraiment à mieux comprendre le mouvement du Soleil et les objets du Système Solaire. En utilisant le modèle proposé, les élèves comprennent qu'une étoile brillante dans la région circumpolaire nord ne peut jamais être une planète (figure 27a et 27b).

C'est un bon investissement pour faire un modèle à grande échelle. Dans ce cas, les élèves et même les adultes peuvent y entrer et vérifier la position du Soleil par rapport à l'équateur et les parallèles qui correspondent au premier jour du solstice d'été et d'hiver (figure 28a). Certains lycées peuvent construire ce type de modèle (figure 28b).

Après avoir utilisé le modèle, les élèves peuvent comprendre des choses qu'ils ne savaient pas auparavant. Par exemple, maintenant il est très clair que le Soleil ne se lève pas et ne se couche pas perpendiculairement à l'horizon qu'à l'équateur.

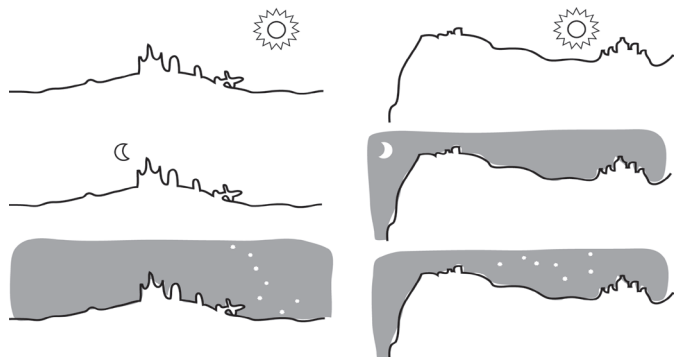


Fig. 27a: Horizon au nord-ouest de Barcelone.

Fig. 27b: Horizon sud-ouest de Barcelone.



Fig.28a: modèle local de l'horizon dans une école



Fig. 28b: modèle local de l'horizon dans le parc des sciences de Grenade Espagnesciences de Grenade Espagne

Bibliographie

Alemany, C., Ros, R.M., Tierra paralela, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, EU-UNAWA, Barcelona, 2011.

Lanciano, N., Strumenti per i giardino del cielo, Edizioni junior, Spaggiari Eds, Roma, 2016.

Ros, R.M., De l'intérieur et de l'extérieur, Les Cahiers Clairaut, 95, p.1-5, Orsay, 2001.

Ros, R.M., Laboratorio de Astronomía, Tribuna de Astronomía, 154, p.18-29, 1998.

Ros, R.M., Sunrise and sunset positions change every day, Proceedings of 6th EAAE International Summer School, 177, 188, Barcelona, 2002.

Ros, R.M., Capell, A., Colom, J., El planisferio y 40 actividades más, Antares, Barcelona, 2005.

Ros, R.M., Lanciano, N., El horizonte en la Astronomía, *Astronomía Astrofotografía y Astronáutica*, 76, p.12-20,1995..

Modèle universel de l'horizon

Rosa M. Ros, Francis Berthomieu

International Astronomical Union, Technical University of Catalonia (Barcelona, Spain), CLEA (Nice, France)

Résumé

Ce document de travail présente une méthode simple pour visualiser et expliquer les mouvements apparents des étoiles, du Soleil et de la Lune à partir de différents endroits de la Terre. La procédure consiste à construire un modèle simple qui nous permet de montrer comment ces mouvements sont observés à partir de différentes latitudes.

Objectifs

- Comprendre les mouvements apparents des étoiles à partir de différentes latitudes.
- Comprendre les mouvements apparents du Soleil à partir de différentes latitudes.
- Comprendre le mouvement et l'aspect de la Lune sous différentes latitudes.

L'idée derrière le modèle universel de l'horizon

Il n'est facile d'expliquer comment les mouvements apparents du Soleil, de la Lune ou des étoiles sont observés depuis la Terre. Les élèves savent que le Soleil se lève et se couche tous les jours, mais ils sont surpris d'apprendre que le Soleil se lève et se couche d'un jour à l'autre de différents points au dessus de l'horizon et que les trajectoires du soleil dans le ciel peuvent varier selon la latitude du lieu. Le modèle universel de l'horizon simplifie et explique le phénomène du soleil de minuit et du passage du soleil au zénith. En particulier, les modèles universels de l'horizon peuvent être très utiles pour comprendre et justifier certaines différences liées à la latitude.

On se souvient facilement de la forme des constellations à travers les légendes et par les règles géométriques pour les retrouver. Cependant, cela n'est possible qu'à partir d'un point bien déterminé sur Terre. En raison du mouvement de la sphère céleste, un observateur au pôle Nord peut observer toutes les étoiles de l'hémisphère nord et celui au pôle sud peut observer toutes les étoiles de l'hémisphère sud. Mais qu'observent ceux qui vivent sous différentes latitudes?

Le modèle universel de l'horizon: pourquoi il y a de étoiles invisible?

Tout se complique lorsque l'observateur n'est pas dans l'un des deux pôles. Dans ce cas, les étoiles tombent dans trois catégories différentes en fonction de leurs mouvements observés (pour chaque latitude): les étoiles circumpolaires, les étoiles qui se lèvent et se couchent et les étoiles invisibles (figure 1). Nous avons tous eu la surprise de découvrir que l'on peut observer quelques étoiles de l'hémisphère sud tout en vivant dans l'hémisphère nord. C'est la même surprise lorsqu'on découvre le phénomène du soleil de minuit.

L'objectif principal du modèle stellaire de l'horizon

L'objectif principal est de découvrir quelles sont les constellations circumpolaires, quelles sont les constellations qui se lèvent et se couchent et celles qui sont invisibles à des différentes latitudes. Si nous observons les étoiles à une latitude d'environ 45° N, il est clair que nous pouvons voir beaucoup d'étoiles visibles de l'hémisphère sud qui se lèvent et se couchent

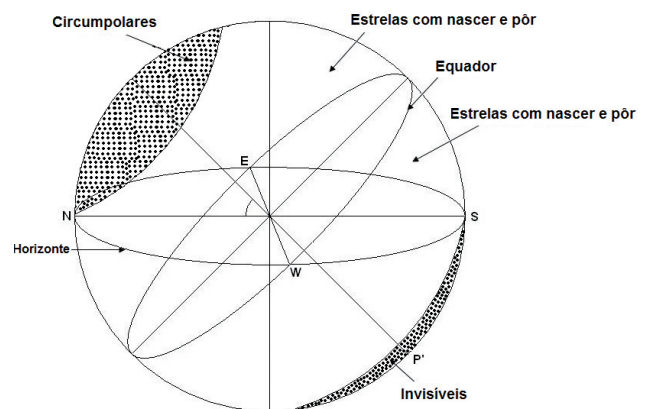


Fig 1: Trois types d'étoiles (vue depuis une latitude bien déterminée): étoiles circumpolaires, étoiles se lèvent et se couchant, étoiles invisibles.

tous les soirs (figure 1). Dans notre cas, le modèle stellaire de l'horizon devrait inclure des constellations avec des déclinaisons variables (les ascensions droites ne sont pas aussi importantes dans ce cas). Il est important de se servir des constellations les plus connues. Ceux-ci peuvent avoir différentes ascensions droites de

sorte qu'elles soient visibles pendant différents mois de l'année (fig 2).

Lors de la sélection de la constellation à dessiner, seules les étoiles brillantes doivent être utilisées pour que sa forme soit facilement identifiable. Il est préférable de ne pas utiliser les constellations qui sont sur le même méridien, mais plutôt de se concentrer sur le choix des constellations qui seraient bien connues chez les élèves. (Tableau 1). Si vous êtes intéressé à faire un modèle pour chaque saison, vous pouvez faire quatre modèles différents, un pour chaque saison. Vous devez se servir des constellations qui ont différentes déclinaisons,

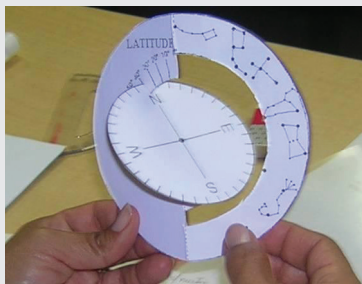


Fig. 2: Utilisation du modèle: ce modèle servira pour l'hémisphère voir les constellation dans le tableau 1.

mais qui ont une ascension droite entre 21h et 3h pour l'automne et le printemps, entre 3h et 9h pour l'hiver et l'été, entre 9h et 14h pour l'hiver pour le printemps (automne), et entre 14h et 21h pour l'été (hiver) dans l'hémisphère Nord (Sud) pour le ciel du soir.

Si nous décidons de sélectionner des constellations pour une seule saison, il est difficile de sélectionner une constellation entre, par exemple, 90°N et 60°N, une autre entre 60°N et 40°N, une autre entre 40°N et 20°N, et une autre entre 20°N et 20°S, etc. , sans se chevaucher et atteindre 90°S. Si nous voulons également sélectionner des constellations bien connues pour les élèves, avec un petit nombre d'étoiles brillantes et suffisamment grandes pour couvrir la totalité du méridien, il est difficile d'atteindre notre objectif. Étant donné que les grandes constellations lumineuses qui sont bien connues ne couvrent pas tout le ciel tout

Constellation	Déclinaison maximale	Déclinaison minimale
La Petite Ourse	+90°	+70°
La Grande Ourse	+60°	+50°
Le Cygne	+50°	+30°
Le Lion	+30°	+10°
Orion et Sirius	+10°	-10°
Le Scorpion	-20°	-50°
La Croix du Sud	-50°	-70°

Tableau 1: les constellations sur le modèle stellaire de l'horizon. Constellation Déclinaison maxima-

au long de l'année, il est plus facile de faire un seul démonstrateur pour l'année entière.

Il y a aussi un autre argument pour faire un démonstrateur unique. La différence concernant les saisons n'a lieu qu'à certaines latitudes des deux hémisphères.

Construction de simulateur

Pour obtenir un modèle robuste (figures 3a et 3b), il est conseillé de coller les deux morceaux sur un papier cartonné avant de les couper (figures 4 et 5). C'est aussi une bonne idée de construire un autre modèle, deux fois plus grand, pour l'enseignant.

Ci-dessous les étapes pour construire le modèle stellaire de l'horizon.

Modèle stellaire de l'horizon pour l'hémisphère nord

- Faire une photocopie sur un papier cartonné des figures 4 et 5.
- Couper les deux cercles (figures 4 et 5).
- Enlever les zones noires de la pièce principale (figure 4).
- Plier la pièce principale (figure 4) tout au long de la ligne pointillée droite. Faire cela plusieurs fois pour rendre le modèle facile à utiliser.
- Couper une petite fente au-dessus du "N" sur le disque l'horizon (figure 5). La fente doit être assez grande pour que le carton puisse le traverser.
- Coller le quadrant nord-est du disque de l'horizon.

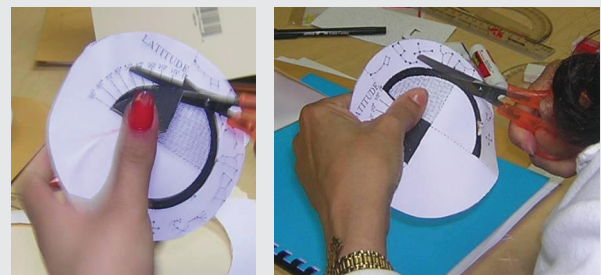


Fig. 3a et 3b: construction du modèle stellaire de l'horizon.

(figure 5) sur le quadrant gris de la pièce principale (figure 4). Il est très important d'avoir la ligne droite nord-sud suivant la double ligne de la pièce principale. De plus, le "W" sur le disque d'horizon doit correspondre à la latitude 90°.

- Lorsque vous placez le disque d'horizon dans la pièce principale, assurez-vous que les deux restent perpendiculaires.
- Il est très important de coller soigneusement les différentes pièces pour obtenir la précision maximale.

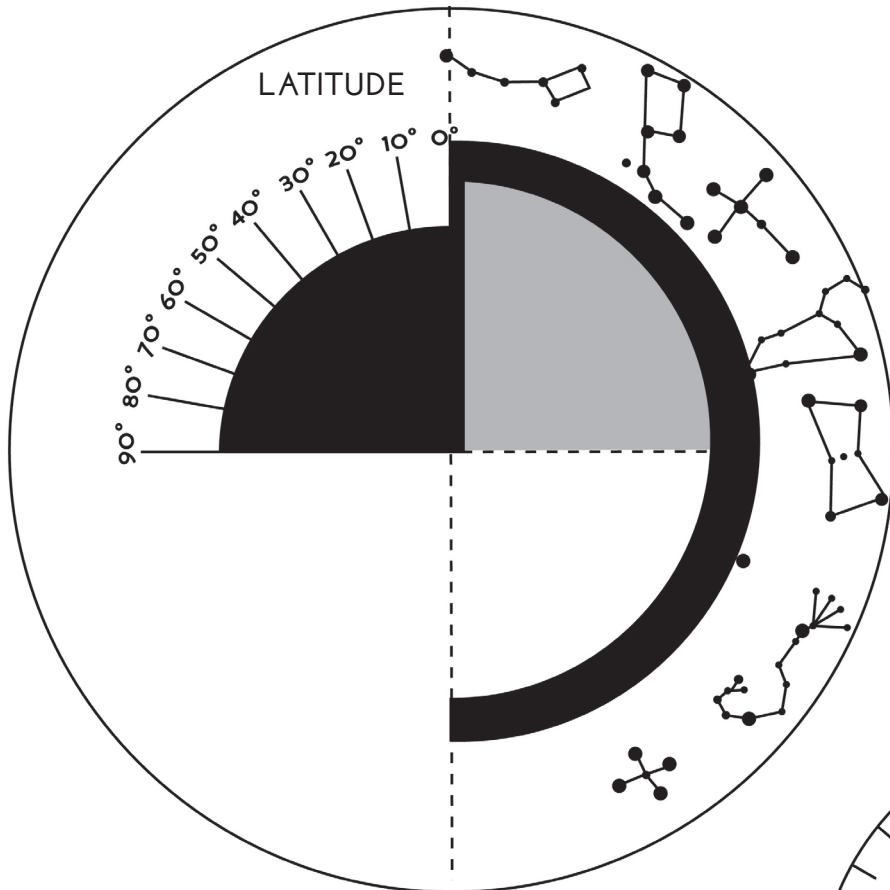


Fig. 4: La partie principale du modèle pour l'Hémisphère Nord.

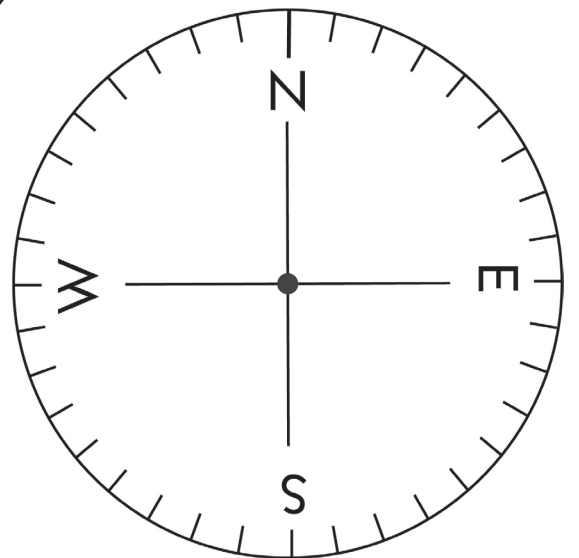


Fig. 5: Le disque de l'horizon

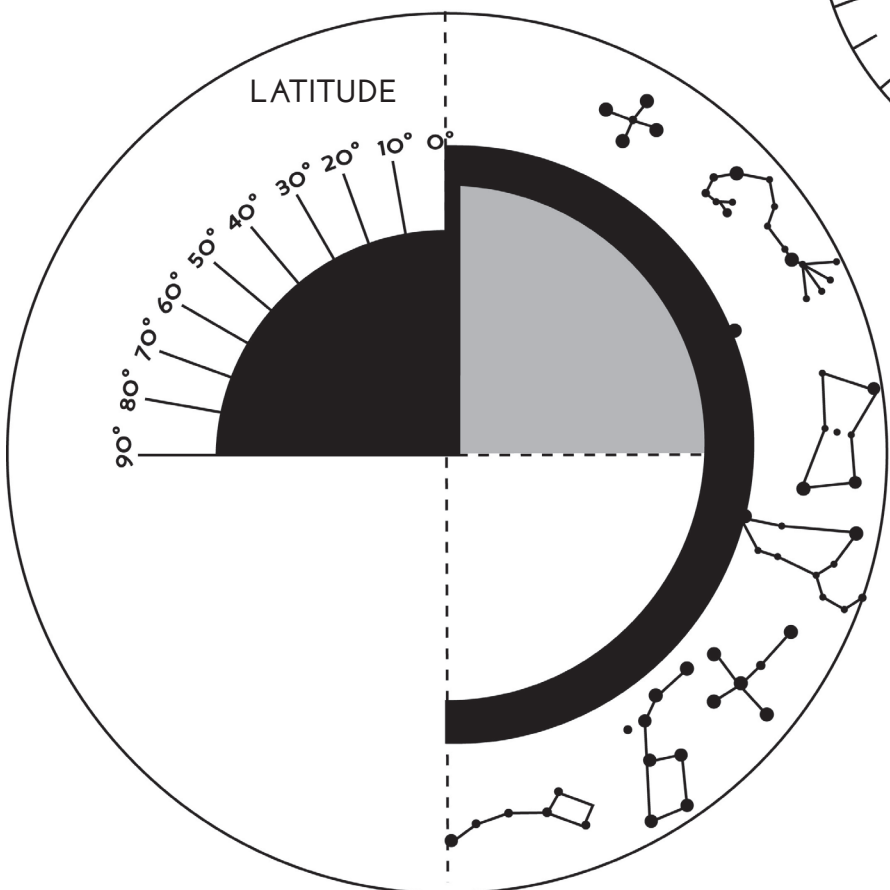


Fig. 6: La partie principale du modèle stellaire de l'horizon pour l'Hémisphère Sud.

Modèle stellaire de l'horizon pour l'hémisphère sud

- Faire une photocopie sur un papier cartonné des figures 5 et 6.
- Couper les deux cercles (figures 5 et 6).
- Enlever les zones noires de la pièce principale (figure 6).
- Plier la pièce principale (figure 6) tout au long de la ligne pointillée droite. Faire cela plusieurs fois pour rendre le modèle facile à utiliser.
- Couper une petite fente sur le "S" du disque d'horizon (figure 5). Il devrait être assez grand pour que le carton puisse le traverser.
- Coller le quadrant sud-ouest du disque d'horizon (figure 5) sur le quadrant gris de la pièce principale (figure 6). Il est très important d'avoir la ligne droite nord-sud suivant la double ligne de la pièce principale. De plus, le "E" sur le disque d'horizon doit correspondre à la latitude 90° .
- Lorsque vous placez le disque d'horizon dans la pièce principale, assurez-vous que les deux restent perpendiculaires.
- Il est très important de coller soigneusement les différentes pièces pour obtenir la précision maximale.

Choisissez le démonstrateur stellaire que vous voulez construire en fonction de votre lieu de latitude. Vous pouvez également construire un modèle en choisissant vos propres constellations selon différents critères.

Par exemple, vous pouvez inclure les constellations visibles uniquement pour une saison, ou bien les constellations visibles uniquement pendant un mois, etc. Pour cela, vous ne devez considérer que les constellations avec des ascensions droites entre deux valeurs spécifiques. Dessinez ensuite les constellations avec leurs valeurs de déclinaison sur la figure 7. Noter que chaque secteur correspond à 10° .

Applications par le modèle

Pour commencer à utiliser le modèle, vous devez sélectionner la latitude de votre lieu d'observation. Nous pouvons voyager faire d'un voyage imaginaire sur la Terre en utilisant le modèle.

Utilisez votre main gauche pour tenir sous le quadrant de la latitude de la pièce principale du modèle (figure 4 ou 6). Sélectionnez la latitude et déplacez le disque d'horizon jusqu'à ce qu'il affiche la latitude choisie. Par la main droite, déplacez le disque avec les constellations de droite à gauche plusieurs fois.

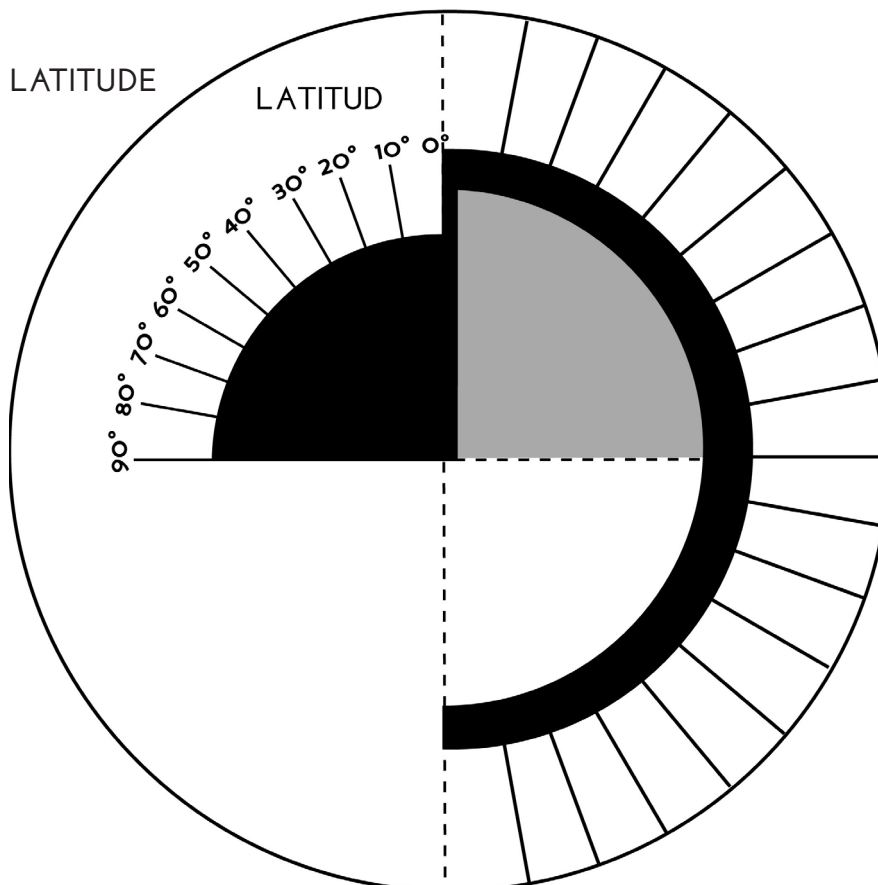


Fig. 7: La partie principale du modèle stellaire de l'horizon pour les deux hémisphères.

Vous pouvez observer quelles constellations sont toujours à l'horizon (circumpolaires), quelles constellations s'élèvent et se fixent, et lesquelles d'entre elles sont toujours au-dessous de l'horizon (invisible).

• **Inclinaison de la trajectoire des étoiles selon la latitude**

A l'aide du modèle, il est très facile d'observer comment l'angle de la trajectoire de l'étoile par rapport à l'horizon change en fonction de la latitude du lieu (figures 8, 9 et 10).

Si le lieu d'observation se trouve à l'équateur (latitude 0°), l'angle observé est de 90°. Par contre, si l'observateur se trouve est au pôle Nord ou au pôle Sud (latitude 90° N ou 90° S), la trajectoire de l'étoile est parallèle à l'horizon. En général, si l'observateur se trouve dans une ville à la latitude L, l'inclinaison de la trajectoire de l'étoile par rapport à l'horizon est de : 90° moins L chaque jour.

Nous pouvons le vérifier en regardant les figures 8, 9 et 10. La photo de la figure 8a a été prise en Laponie (Finlande), celle de la figure 9a à Montseny (près de Barcelone, Espagne) et la figure 10a à San Luis Potosi (Mexique). La Laponie est à une latitude plus élevée que Barcelone et San Luis Potosi, de sorte que l'inclinaison de la trajectoire d'étoile est plus petite.

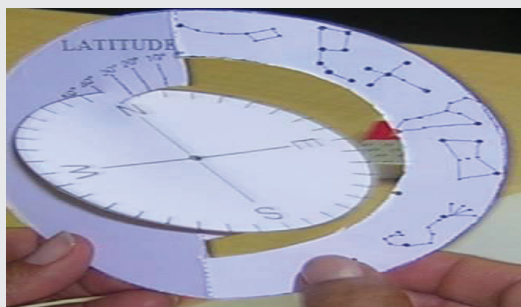


Fig. 8a et 8b: Étoiles à Enontekiö en Laponie 68°N (Finlande). L'angle de la trajectoire de l'étoile par rapport à l'horizon est de 90° moins la latitude. Notez que les trajectoires des étoiles sont plus courtes que sur la photo suivante, car les aurores boréales forcent un temps d'exposition plus faible (Photo: Irma Hannula, Finlande).

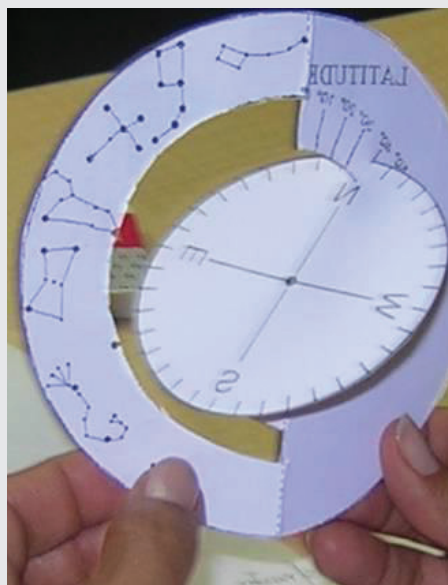


Fig. 9a et 9b: lever des étoiles à Montseny 41°N (près de Barcelone, Espagne). L'angle de l'étoile par rapport à l'horizon est de 90° moins la latitude (Photo: Rosa M. Ros, Espagne). plus faible (Photo: Irma Hannula, Finlande).

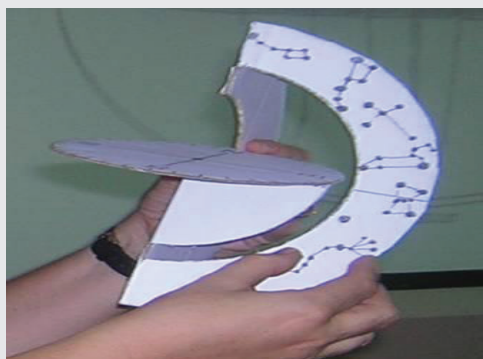
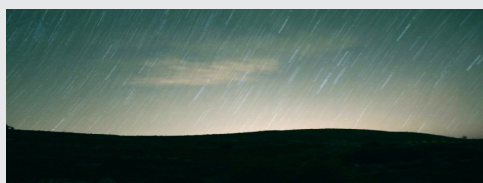


Fig 10a et 10b. trainé des étoiles à Matehuala (Mexique) 23°N, l'angle des trajectoires des étoiles à l'horizon est de 90 moins la latitudes (la colatitude). (Photo: Luis J de la Cruz, Mexique).

En utilisant le modèle de cette manière, les étudiants peuvent essayer les différentes activités ci-dessous

1) Si nous choisissons la latitude 90°N , l'observateur est au pôle Nord. Nous pouvons réaliser que toutes les constellations de l'hémisphère nord sont circumpolaires. Tous celles de l'hémisphère sud sont invisibles et il n'y a pas de constellations qui se lèvent et se couchent.

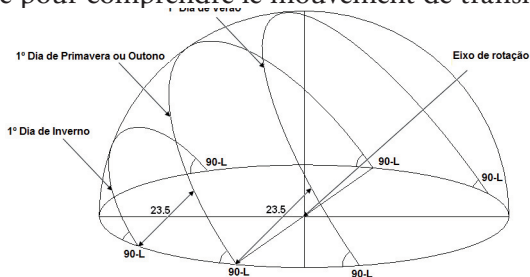
2) Si la latitude est 0° , l'observateur est à l'équateur, et nous pouvons réaliser que toutes les constellations montent et se fixent (perpendiculairement à l'horizon). Aucune n'est circumpolaire ou invisible.

3) Si la latitude est de 20° (N ou S), il y a moins de constellations circumpolaires que si la latitude est de 40° (respectivement N ou S). Mais il y a beaucoup plus d'étoiles qui se lèvent et se couchent si la latitude est de 20° au lieu de 40° .

4) Si la latitude est de 60° (N ou S), il y a beaucoup de constellations circumpolaires ainsi que de constellations invisibles, mais le nombre de constellations qui se lèvent et se couchent est réduit par rapport à la latitude 40° (respectivement N ou S).

Le modèle universel de l'horizon : pourquoi le soleil ne se lève pas de la même point tous les jours

Il est facile à expliquer le mouvement apparent du soleil depuis la Terre. Les élèves savent que le soleil se lève et se couche tous les jours, mais ils seront surpris quand ils découvrent que le soleil se lève et se couche à des endroits différents d'un jour à l'autre. Il est également intéressant de considérer les différentes trajectoires du soleil en fonction de la latitude locale. Il est peut être difficile d'expliquer le phénomène du soleil de minuit ou le passage du soleil au zénith. En particulier, le modèle universel de l'horizon est très utile pour comprendre le mouvement de translation



FFig. 11: Trois trajectoires différentes (1er jour de printemps ou d'automne, 1er jour d'été et 1er jour d'hiver).

et justifier certaines différences du mouvement du soleil en fonction de la latitude.

Construction du modèle universel de l'horizon

Pour construire le modèle universel de l'horizon, il faut prendre en considération la déclinaison du soleil, qui change quotidiennement. Ensuite, nous devons avoir la possibilité de changer la position du soleil en fonction des saisons. Pour le premier jour du printemps et de l'automne, la déclinaison du soleil est de 0° , et le soleil se déplace tout au long de l'équateur. Le premier jour de l'été (hiver dans l'hémisphère sud), la déclinaison du soleil est de $+23,5^{\circ}$ et le premier jour de l'hiver (été dans l'hémisphère sud) de $-23,5^{\circ}$ (figure 11). Nous devons pouvoir modifier ces valeurs dans le modèle si nous voulons étudier la trajectoire du Soleil.

Pour obtenir un modèle robuste (figures 12a et 12b), il est conseillé de coller deux morceaux de carton avant de les couper. Vous pouvez également faire en sorte que l'un des modèles soit deux fois plus grand, pour les explications professeur.

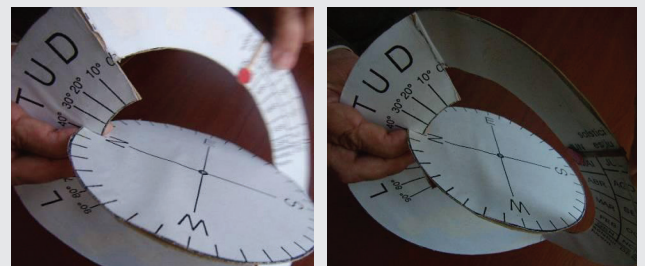


Fig. 12a et 12b: construction d'un modèle universel de l'horizon pour l'hémisphère nord à la latitude $+40^{\circ}$

Modèle pour l'hémisphère nord

- Faire une photocopie des figures 13 et 14 sur un papier carton.
- Couper les deux cercles tout au long de la ligne continue (figures 13 et 14).
- enlever les zones noires de la pièce principale (figure 14).
- Plier la pièce principale (figure 14) selon la ligne pointillée droite. Faire cela plusieurs fois pour rendre le modèle plus facile à utiliser.
- faire une petite fente au-dessus du "N" sur le disque d'horizon (figure 14). La fente doit être suffisamment grande pour que le carton puisse la traverser.
- Coller le quadrant nord-est du disque d'horizon (figure 14) sur le quadrant gris de la pièce principale (figure 13). Il est très important d'avoir la ligne droite nord-sud suivant la double ligne de la pièce principale. De plus, le "W" sur le disque d'horizon doit correspondre à la latitude 90° .

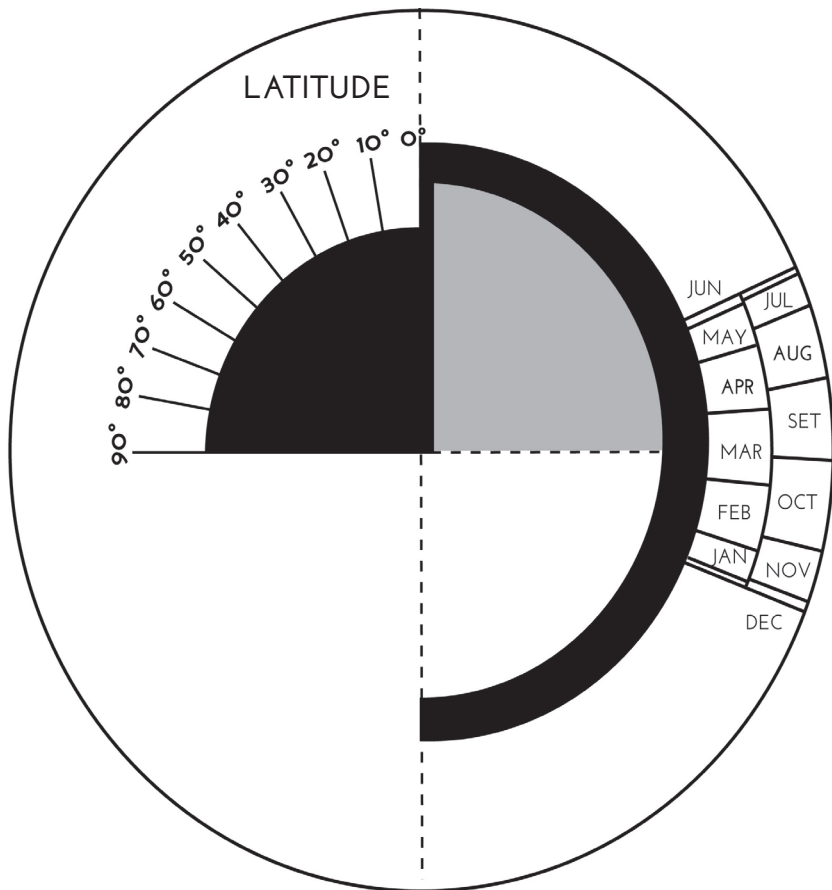


Fig. 13: Partie principale du modèle pour l'hémisphère nord

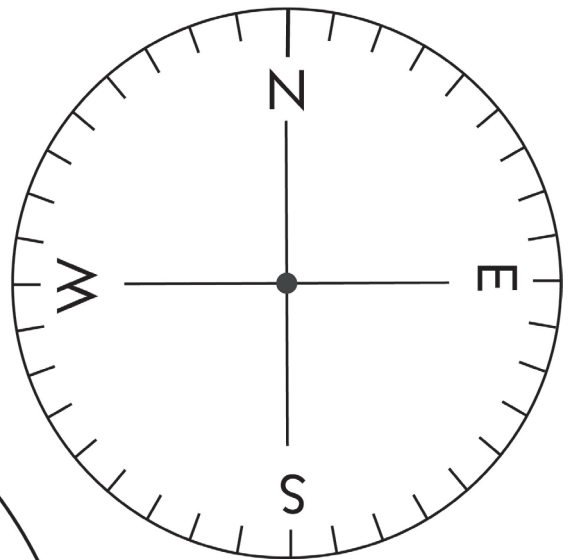


Fig. 14: Le disque de d'horizon.

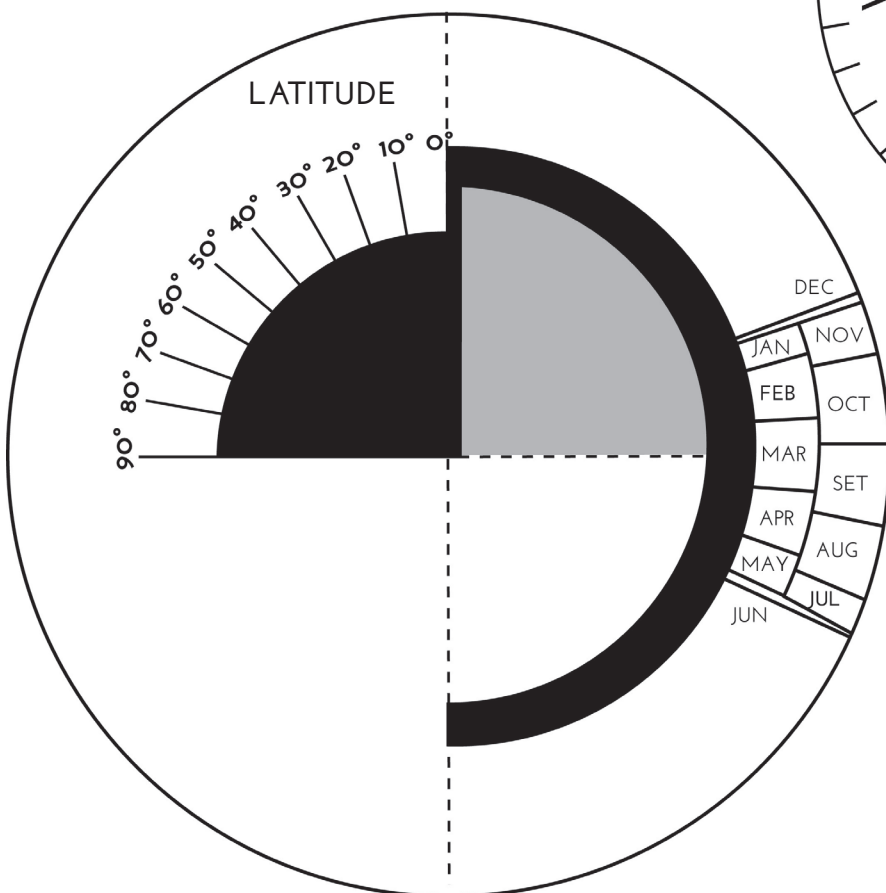


Fig. 15: Partie principale du modèle pour l'hémisphère sud.

g) Lorsque vous placez le disque de l'horizon (figure 14) dans la pièce principale, assurez-vous que les deux restent perpendiculaires. h) Il est très important de coller soigneusement les différentes pièces pour obtenir une précision maximale.

i) Pour placer le soleil dans le modèle, peignez un cercle en rouge sur une feuille de papier. Découpez-le et placez-le entre deux bandes de ruban adhésif. Placez cette bande transparente

avec le cercle rouge sur la zone de déclinaison de la figure 13. L'idée est qu'il devrait être facile à déplacer cette bande vers le haut et le bas afin de situer le point rouge sur le mois de votre choix. (Ou simplement utiliser un trombone coloré qui va jouer le rôle du soleil). Pour construire le modèle universel de l'horizon pour l'hémisphère sud, vous pouvez suivre des étapes similaires, mais remplacez la figure 13 par la figure 15.

Modèle universel de l'horizon pour l'hémisphère sud

a) Faire une photocopie des figures 14 et 15 sur un papier cartonné.

b) Couper les deux cercles tout au long de la ligne continue (figures 14 et 15).

c) enlever les zones noires de la pièce principale (figure 15).

d) Plier la pièce principale (figure 15) tout au long de la ligne pointillée droite. Faire cela à quelques reprises pour rendre le modèle facile à utiliser.

e) Coupez une petite encoche au-dessus du "S" sur le disque d'horizon (figure 14). L'encoche doit être assez grande pour que le carton puisse le traverser.

f) Coller le quadrant sud-ouest du disque d'horizon (figure 14) sur le quadrant gris de la pièce principale (figure 15). Il est très important d'avoir la ligne droite nord-sud suivant la double ligne de la pièce principale. De plus, le "E" sur le disque d'horizon doit correspondre à la latitude 90° .

g) Lorsque vous placez le disque d'horizon (figure 14) dans la pièce principale, assurez-vous que les deux restent perpendiculaires.

h) Il est très important de coller soigneusement les différentes pièces pour obtenir la précision maximale.

i) Pour placer le soleil dans le démonstrateur, peignez un cercle en rouge sur une feuille de papier. Découpez-le et placez-le entre deux bandes de ruban adhésif. Placez cette bande de bande transparente avec le cercle rouge sur la zone de déclinaison de la figure 15. L'idée est qu'il devrait être facile à déplacer cette bande vers le haut et le bas afin de situer le point rouge sur le mois de votre choix. (Ou simplement utiliser un trombone coloré qui va jouer le rôle du soleil).

L'utilisation du modèle

Pour utiliser le modèle, vous devez sélectionner votre

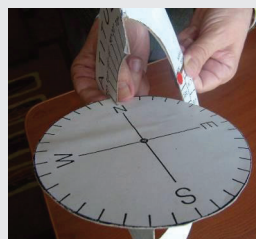


Fig. 16a e 16b: Lever du soleil à Enontekio in Lapland (Finland). L'angle de la trajectoire du soleil par rapport à l'horizon est la colatitude (90 -la latitude) (photo:Sakari Ekko, Finland)

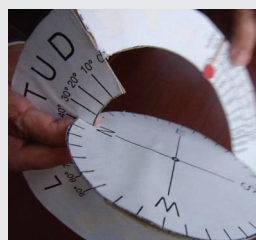
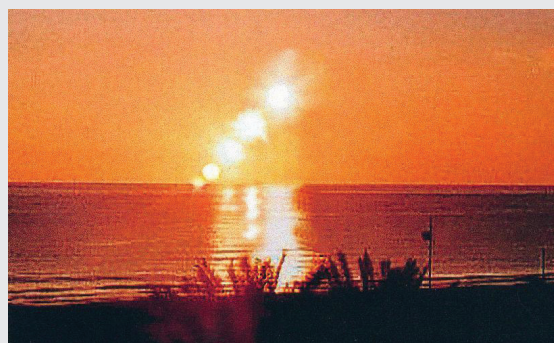


Fig. 17a e 17b: Coucher du soleil à Grenade (Espagne) 41° N. l'angle de la trajectoire du soleil avec l'horizon est 90 - la latitude (Photo, Rosa M. Rose, Spain).

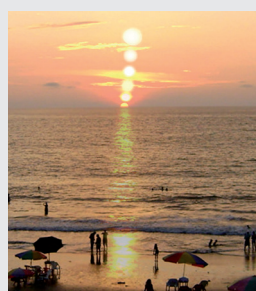


Fig. 18a e 18b: Coucher du soleil à Grenade (Espagne) 41° N. l'angle de la trajectoire du soleil avec l'horizon est 90 - la latitude (Photo, Rosa M. Rose, Spain).

latitude. Encore une fois, nous pouvons voyager sur Terre selon d'un voyage imaginaire à l'aide du modèle universel de l'horizon.

Nous allons considérer trois sites sur la Terre:

1. Lieu situé dans une zone intermédiaire entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud.



Fig. 19a e 19b: La trajectoire du soleil en été et en hiver en Norvège. Il est clair que le soleil est beaucoup plus élevé par rapport à l'horizon en été qu'en hiver. C'est pourquoi il y a beaucoup plus d'heures d'ensoleillement en été.

2. Lieu dans les zones polaires

3. Lieu dans les zones équatoriales

1. - Lieux situés dans les zones intermédiaires (entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud): les saisons

• Angle de la trajectoire du soleil par rapport à l'horizon
En utilisant le modèle, il est très facile de réaliser que l'angle de la trajectoire du Soleil par rapport à l'horizon dépend de la latitude. Si l'observateur se trouve l'équateur (latitude 0°), cet angle est de 90° . Si l'observateur est au pôle Nord ou Sud (latitude 90° N ou 90° S), la trajectoire du Soleil est parallèle à l'horizon. En général, si l'observateur est dans une ville à la latitude L , l'inclinaison du trajet du Soleil par rapport à l'horizon est de 90 moins L chaque jour. Nous pouvons le vérifier en regardant les figures 16a et 16b. La photo de la figure 16a a été prise en Laponie (Finlande) et celle de la figure 17a à Gandia (Espagne). La Laponie est à une latitude supérieure à celle de Gandia, l'inclinaison du chemin du Soleil est donc plus faible. La photographie de la figure 18a a été réalisée à Ladrilleros (Colombie) avec une latitude de 4° et, par conséquent, l'inclinaison de la trajectoire du soleil est proche de la perpendicularité, soit 86° .

• *La hauteur de la trajectoire maximale du soleil dépend des saisons*

1a) L' hémisphère nord

En utilisant le modèle universel de l'horizon de votre ville (sélectionnez la latitude de votre ville), il est facile de vérifier que l'altitude (hauteur) du Soleil au-dessus de l'horizon change en fonction de la saison. Par exemple, le premier jour du printemps, la déclinaison du soleil est de 0° . Nous pouvons mettre le soleil (trombone par exemple) le 21 mars. Ensuite, nous pouvons faire le mouvement du soleil long de l'équateur de l'est vers l'ouest. Nous pouvons voir que la trajectoire du Soleil est à une certaine hauteur au-dessus de l'horizon.

À la même latitude, nous répétons l'expérience pour différents jours. Lorsque nous plaçons le Soleil le long de l'équateur le 1er jour de l'été, le 21 juin (déclinaison

son solaire $+23^\circ 5'$), nous observons que la trajectoire du Soleil est plus élevée que lorsque le soleil est au 1er jour du printemps. Enfin, nous répétons l'expérience pour le 1er jour d'hiver, le 21 décembre (déclinaison solaire $-23^\circ 5'$). Nous pouvons voir que dans ce cas, la hauteur maximale du soleil est plus basse par rapport à l'horizon. Le 1er jour de l'automne, la déclinaison est de 0° et la trajectoire du Soleil suit l'équateur de la même manière qu'au 1er jour du printemps.

Bien sûr, si nous modifions la latitude, la hauteur maximale du Soleil change, mais la plus haute correspond toujours au premier jour de l'été et la plus basse au premier jour de l'hiver (figures 19a et 19b).

1b) L'hémisphère sud

En utilisant le modèle universel de l'horizon de votre ville (sélectionnez la latitude de votre ville), il est facile de vérifier que l'altitude (la hauteur) du Soleil au-dessus de l'horizon change en fonction des saisons. Par exemple, le premier jour du printemps, la déclinaison du soleil est 0° . Nous pouvons mettre le soleil à la date 23 septembre. Ensuite, nous pouvons faire le déplacement du soleil le long de l'équateur de l'est vers l'ouest. Nous pouvons voir que la trajectoire du Soleil est à une certaine hauteur au-dessus de l'horizon.

Bien sûr, si nous modifions la latitude, la hauteur de la trajectoire du soleil change, mais même dans ce cas, la trajectoire le plus haut par rapport à l'horizon est toujours le premier jour de l'été, la plus basse est le premier jour de l'hiver.

Remarque:

En été, lorsque le soleil est plus haut, la lumière du soleil frappe la Terre selon un angle plus perpendiculaire à l'horizon. De ce fait, le rayonnement est concentré dans une zone plus petite et la température s'élève. Toujours en été, le nombre d'heures d'ensoleillement est plus important qu'en hiver. Ce sont les facteurs astronomiques qui augmentent également les températures en été.

• Le soleil se lève et se couche chaque jour dans un endroit différent

Dans les expériences précédentes, si nous avons concentré notre attention sur le lieu où le Soleil se lève et se couche, nous aurions observé que ce n'était pas le même endroit tous les jours. En particulier, la distance à l'horizon entre le lever du soleil (ou le coucher du soleil) au premier jour de deux saisons consécutives augmente avec la latitude croissante (figures 20a, 20b, et 20c).

C'est très simple à simuler en utilisant le modèle universel de l'horizon. Marquez simplement la position du

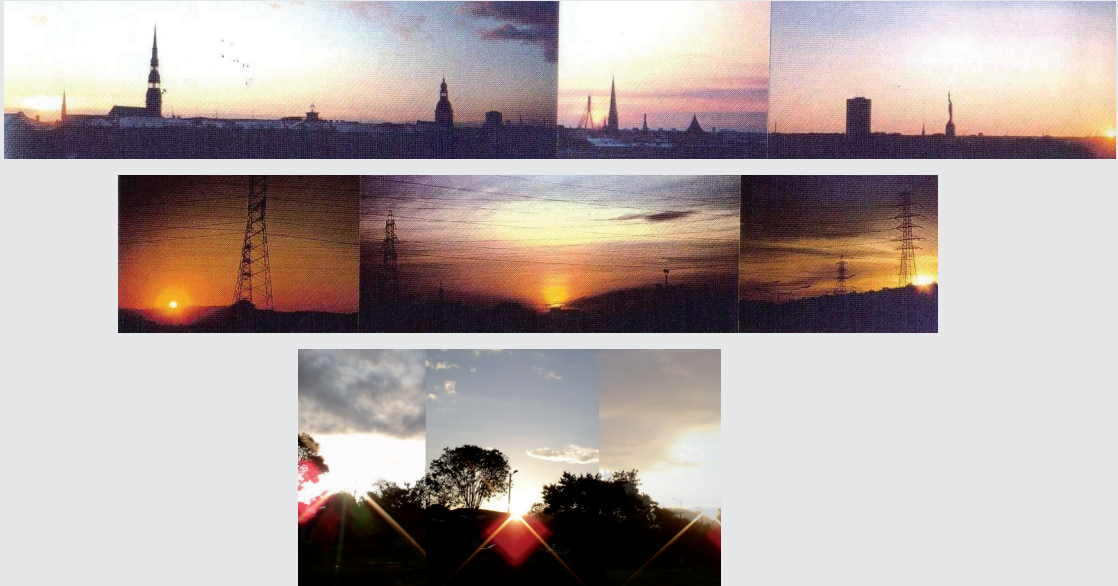


Fig. 20a, 20b e 20c: Couchers de soleil à Riga 57° (Lettonie), Barcelone 41° (Espagne) et Popayán 2° (Colombie) le premier jour de chaque saison (gauche / hiver, centre / printemps ou automne, droite / été). Les couchers de soleil centraux sur les deux photos sont sur la même ligne. Il est facile d'observer que les couchers de soleil d'été et d'hiver à Riga (latitude plus élevée) sont beaucoup plus séparés qu'à Barcelone et plus que Popayán (Photos: Ilgonis Vilks, Lettonie, Rosa M. Ros, Espagne et Juan Carlos Martínez, Colombie).

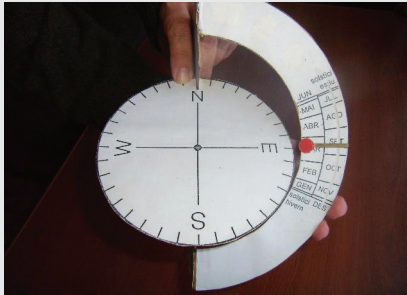


Fig. 21a: Levers de soleil le 1er jour du printemps ou de l'automne.

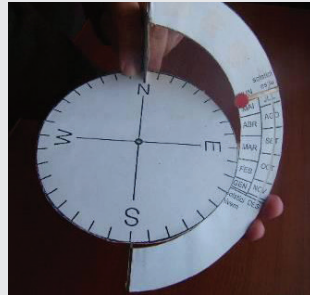


Fig. 21b: Lever de soleil le premier jour d'été.

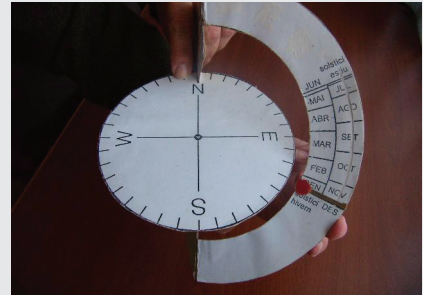


Fig. 21c: Lever de soleil le premier jour d'hiver.

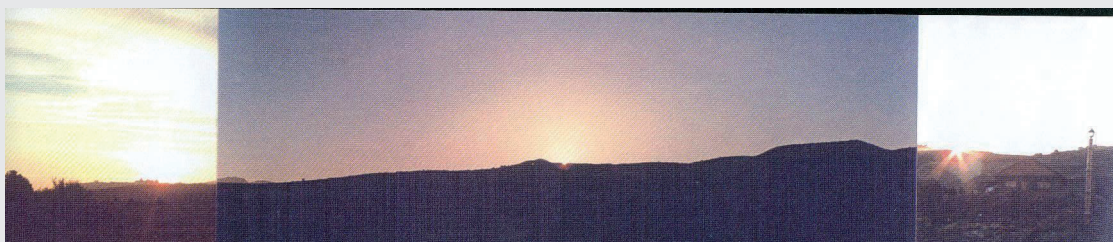
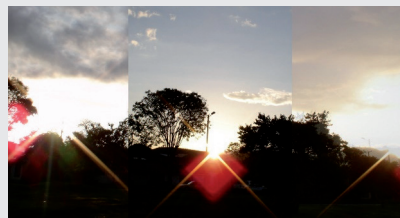


Fig. 22a, 22b e 22c: Couchers de soleil à Popayán 2° (Colombie), La Paz -19° (Bolivie) et Esquel -43° (Argentine) le premier jour de chaque saison (gauche / été, centre / printemps et automne, droite / hiver). Les couchers de soleil centraux sur les deux photos sont sur la même ligne, il est facile d'observer que les couchers de soleil d'été et d'hiver à La Paz (latitude plus élevée) sont beaucoup plus séparés qu'à Popayán (Photos: Juan Carlos Martínez, Colombie, Gonzalo Pereira et Nestor Camino, Argentine).

soleil à chaque saison pour deux latitudes différentes, par exemple 60°, 40° et 0° (figures 21a, 21b et 21c).

Les illustrations des figures 20a, 20b et 20c concernent l'hémisphère nord, mais les mêmes concepts valent l'hémisphère sud (figures 22a, 22b et 22c). La seule différence est le calendrier des saisons..

Remarques:

Le soleil ne se lève pas exactement à l'est et ne se couche pas exactement à l'ouest. Bien que ce soit une idée généralement acceptée, ce n'est pas vraiment vrai. Il ne se produit que deux jours par an: le 1er jour du printemps et le 1er jour de l'automne à toutes les latitudes. Un autre fait intéressant est que le Soleil traverse le méridien (la ligne imaginaire qui relie le pôle Nord, le zénith et le pôle Sud) à midi à toutes les latitudes (à l'heure solaire). Cela peut se servir pour l'orientation.

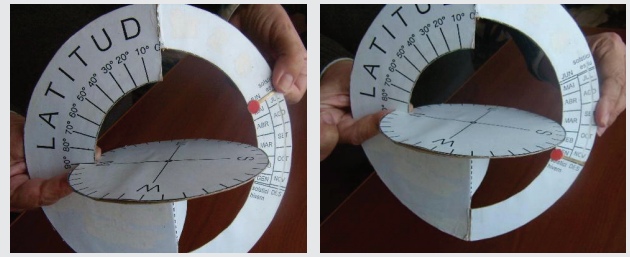


Fig. 24a e 24b: Une simulation par modèle universel de l'horizon montre le soleil à l'horizon pendant six mois et demi au-dessous de l'horizon.

Bien sûr, l'exemple ci-dessus est la situation la plus extrême. Il y a des latitudes septentrionales où le chemin du soleil n'est pas parallèle à l'horizon. A ces latitudes, il n'y a toujours pas de lever ou de coucher de soleil car la latitude locale est trop élevée. Dans ces cas, nous pouvons observer ce que l'on appelle le "soleil de minuit".



Fig. 23a e 23b: La trajectoire du soleil de minuit en Laponie (Finlande). Le soleil s'approche de l'horizon mais ne se couche pas. Au contraire, il recommence à grimper (Photo: Sakari Ekko).

2.- Régions polaires: SOLEIL DE MINUIT

• Été polaire et hiver polaire

Si on introduit la latitude polaire dans le modèle universel de l'horizon (90° N ou 90° S selon le pôle considéré), il y a trois possibilités. Si la déclinaison du soleil est de 0°, le soleil se déplace le long de l'horizon, qui est également l'équateur.

Si la déclinaison coïncide avec le 1er jour de l'été, le Soleil se déplace parallèlement à l'horizon. En fait, le Soleil se déplace toujours parallèlement à l'horizon du deuxième jour du printemps jusqu'au dernier jour de l'été. Cela signifie 6 mois du soleil.

Le 1er jour de l'automne, le soleil se déplace à nouveau sur l'horizon. Mais à partir du deuxième jour de l'automne jusqu'au dernier jour de l'hiver, le soleil se déplace parallèlement à l'horizon mais en dessous. Cela signifie 6 mois de nuit.

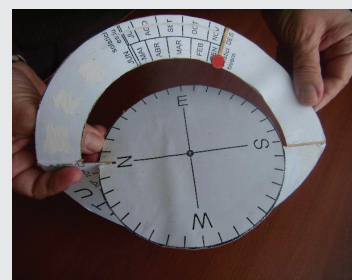
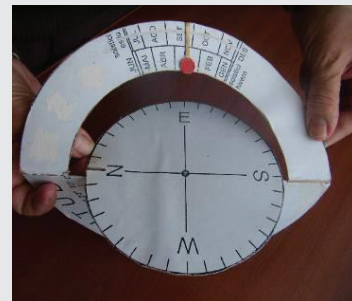


Fig. 25a, 25b e 25c: Le lever du soleil le premier jour de chaque saison: gauche - 1er jour d'été, centre - 1er jour de printemps ou d'automne et droite - 1er jour d'hiver (dans l'hémisphère nord). Sur l'équateur, le chemin du soleil est perpendiculaire à l'horizon. Le soleil se lève presque au même point chaque saison. Les distances angulaires entre les levers de soleil ne sont que de 23,5° (l'obliquité éclipstique). Dans les latitudes plus extrêmes, le trajet du soleil est plus incliné et les distances entre les trois points de lever du soleil augmentent (figures 20a, 20b, 20c, 22a, 22b et 22c).



Fig. 26a: Ombre courte (le soleil est presque au zénith dans un endroit proche de l'équateur).

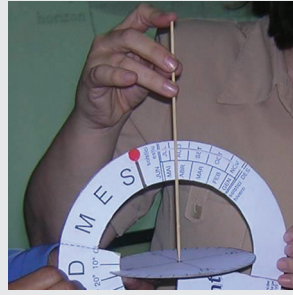


Fig. 26b: Simuler le Soleil au Zénith du Honduras (latitude 15° N).



Fig. 27a: Modèle universel de l'horizon en bois XXL. Fig. 27b: modèle stellaire de l'horizon en bois. Fig. 27c: Avec une caméra, il est possible de photographier la trajectoire solaire en utilisant un temps de pose important. (Photos: Sakari Ekko).

• *Soleil de Minuit*

Si l'on choisit sur le démonstrateur la latitude 70° N (ou 70° S selon l'hémisphère considéré), on peut simuler le concept du soleil de minuit. Si nous plaçons le Soleil le premier jour de l'été, le 21 juin, dans l'hémisphère nord (ou le 21 décembre dans l'hémisphère sud), nous pouvons voir que le soleil ne se lève pas et ne se couche pas ce jour-là. La trajectoire du Soleil est tangente à l'horizon, mais jamais en dessous. Ce phénomène est connu sous le nom de soleil de minuit, car le soleil est déjà au-dessus de l'horizon à minuit (figures 22a et 22b).

Aux pôles (90° N ou 90° S), le Soleil apparaît à l'horizon pendant six mois et demi au-dessus de l'horizon. Il est très facile d'illustrer cette situation en utilisant modèle universel de l'horizon (figures 24a et 24b).

3.- Les zones équatoriales: SOLEIL AU ZÉNITH

• *Le Soleil au zénith*

Dans les zones équatoriales, les quatre saisons ne sont pas très distinctes. Le chemin du Soleil est pratiquement perpendiculaire à l'horizon et la hauteur solaire est pratiquement la même toute l'année. La durée des jours est également très similaire (figures 25a, 25b et 25c).

De plus, dans les pays tropicaux, il y a des journées spéciales: les jours où le soleil passe au zénith. Ces jours-ci, la lumière du soleil frappe la surface de la Terre à l'équateur perpendiculairement. De ce fait, la température est plus élevée et les ombres des gens disparaissent sous leurs chaussures (figure 26a). Dans certaines cultures anciennes, ces jours étaient considérés comme très spéciaux car le phénomène était très facile à observer. C'est toujours le cas aujourd'hui. En fait, il y a deux jours par an lorsque le Soleil est au zénith pour ceux qui habitent entre le tropique du Cancer et le tropique du Capricorne. Nous pouvons illustrer ce phénomène en utilisant le démonstrateur. Il est également possible de calculer approximativement les dates, qui dépendent de la latitude (figure 26b).

Dans certaines cultures anciennes, ces jours étaient considérés comme très spéciaux car le phénomène était très facile à observer. C'est toujours le cas aujourd'hui. En fait, il y a deux jours par an lorsque le Soleil est au zénith pour ceux qui habitent entre le tropique du Cancer et le tropique du Capricorne. Nous pouvons illustrer ce phénomène en utilisant le démonstrateur. Il est également possible de calculer approximativement les dates, qui dépendent de la latitude (figure 26b).

Par exemple (figure 26b), si nous choisissons une latitude de 15° N, en utilisant le modèle universel de l'horizon, nous pouvons calculer approximativement les jours où le soleil est au zénith à midi. Il suffit de tenir un bâton perpendiculaire au disque de l'horizon dans la figure 26b et on voit que ces jours sont fin avril et mi-août.

XXL modèle universel de l'horizon

Naturellement, le modèle universel peut être réalisé avec d'autres matériaux, par exemple du bois (figure 27a). Dans ce cas, on peut se servir d'une source de lumière pour montrer la position du soleil. Avec une caméra utilisant un temps de pose long, il est possible de visualiser le trajet du soleil (figure 27b). Snider, J.L., *The Universe at Your Fingertips*, Frankoi, A. Ed., Astronomical Society

Démonstrateur pour montrer la terre parallèle.

Il est possible d'introduire une balle de ping-pong dans le démonstrateur et ainsi pouvoir donner des explications simples du mouvement annuel du Soleil comme cela est fait avec le modèle de la Terre parallèle. Pour ce faire, nous utiliserons une balle semblable à celles de ping-pong à la place du cercle de l'horizon et nous modifierons la pièce principale en introduisant deux supports pour maintenir tendu un élastique qui retient la balle centrée (figure 28).

Nous percerons la balle de ping-pong, ou similaire, diamétralement comme l'axe de rotation et nous la fixerons à la pièce principale comme vous pouvez le voir sur la figure 30.

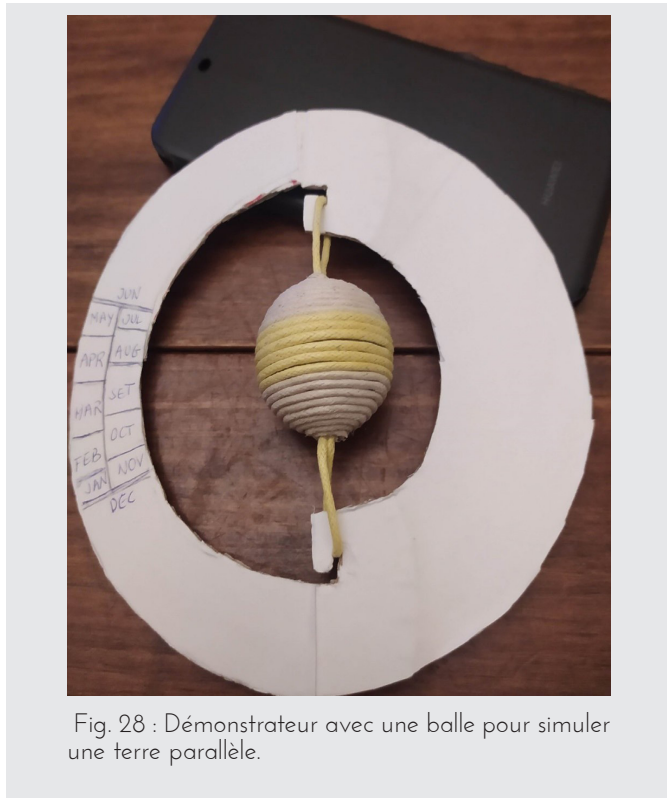


Fig. 28 : Démonstrateur avec une balle pour simuler une terre parallèle.

En même temps, le cercle des latitudes est supprimé car il manque d'intérêt à cette occasion puisque toute la sphère terrestre simulée est utilisée avec la balle de ping-pong (figure 29). On placera ensuite une lampe de poche ou la lampe de poche d'un mobile dans le mois correspondant à la situation du Soleil (où la déclinaison du Soleil est indiquée). Lorsque nous travaillons dans l'hémisphère Sud, cette pièce est analogue avec les mois disposés à l'envers (figure 30).

En plaçant une lanterne à la position de l'équinoxe d'été, il a été possible d'observer que la zone du pôle nord est éclairée et que celle du pôle sud ne l'est pas (figure 31). En plaçant la lanterne aux équinoxes, la ligne lumière/ombre passe exactement par les pôles nord et sud (figure 32). Enfin, en plaçant la lanterne au solstice d'hiver, on observe la zone éclairée du pôle sud et la zone sombre du pôle nord (figure 33).

En fait, ce petit simulateur vous permet de dessiner les cercles polaires de l'Arctique et de l'Antarctique comme des cercles générés par les bords des zones d'ombre et de lumière.

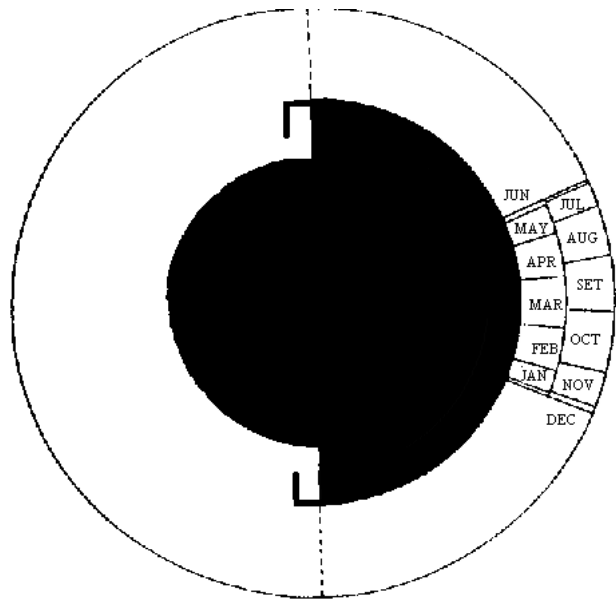


Fig. 29 : Pièce unique du démonstrateur où est fixée la balle de ping-pong, pour l'hémisphère Nord. Il est nécessaire de coller cette photocopie sur un carton légèrement épais pour avoir la force de tenir la balle.

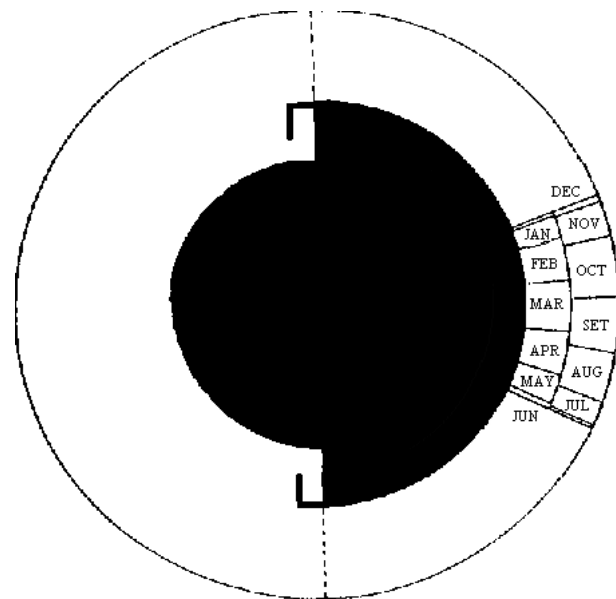


Fig. 30 : Pièce unique du simulateur où est fixée la balle de ping-pong, pour l'hémisphère sud. Il est nécessaire de coller cette photocopie sur un carton un peu épais pour avoir la force de maintenir la balle.

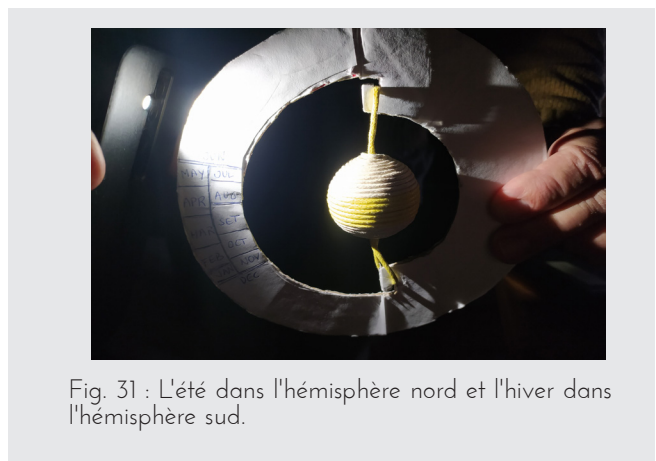


Fig. 31 : L'été dans l'hémisphère nord et l'hiver dans l'hémisphère sud.

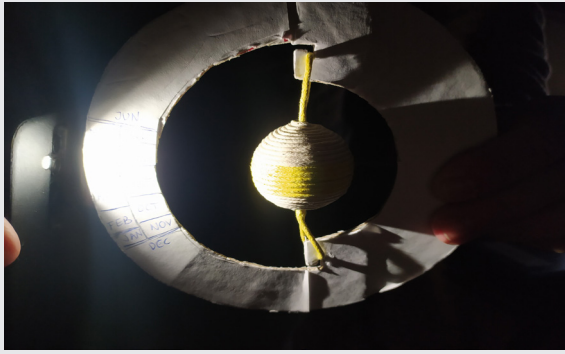


Fig. 32: Les équinoxes dans les deux hémisphères

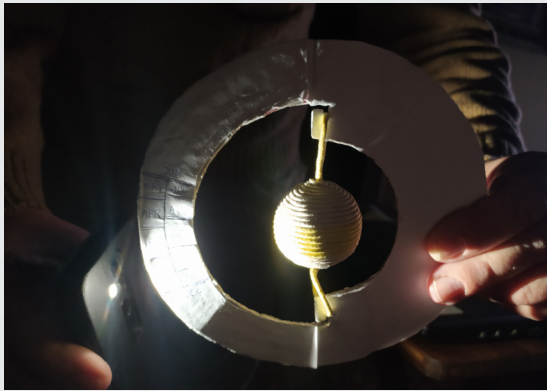


Fig. 33: L'hiver dans l'hémisphère nord et l'été dans l'hémisphère sud.

Modèle Universel de l'Horizon lunaire: pourquoi la Lune sourit à certains endroits?

En enseignant aux élèves la Lune, nous aimerions qu'ils comprennent pourquoi la lune a des phases. En outre, les élèves doivent comprendre comment et pourquoi les éclipses se produisent. Les phases de la lune sont très spectaculaires et il est facile de les expliquer à l'aide d'une balle et une source de lumière.



Fig. 34: Les phases de la Lune.



Fig. 35 Les phases de la Lune observées depuis l'horizon.

Des modèles tels que ceux de la figure 34 donnent une image de la lune en croissant et des changements séquentiels. Il y a une règle de base qui dit que le croissant de lune est un "C" et qu'il décline en "D". Cela est vrai pour les habitants de l'hémisphère sud, mais il est inutile dans l'hémisphère nord où l'on dit que Lune est un "menteur".

Notre modèle simulera les phases de la Lune (figure 34) et montrera pourquoi la lune ressemble à un "C" ou à un "D" selon la phase. Plusieurs fois, la Lune est observée à l'horizon, comme le montre la figure 29. Cependant, selon les pays, il est possible d'observer la Lune comme un "C" incliné, un "D" incliné (figure 30a) ou dans d'autres cas. Comme un "U" (appelé une "lune souriante"; figure 36b).

Comment pouvons-nous expliquer cela? Nous utiliserons le modèle de l'horizon lunaire pour comprendre l'apparence variable du quartier de la Lune à différentes latitudes.

En étudiant les mouvements de la Lune, on doit tenir compte de sa position par rapport au Soleil (qui est la cause de ses phases) et sa déclinaison (car elle change également chaque jour et plus rapidement que le Soleil). Pour cela, on construit un modèle qui permette aux élèves de changer facilement la position de la lune

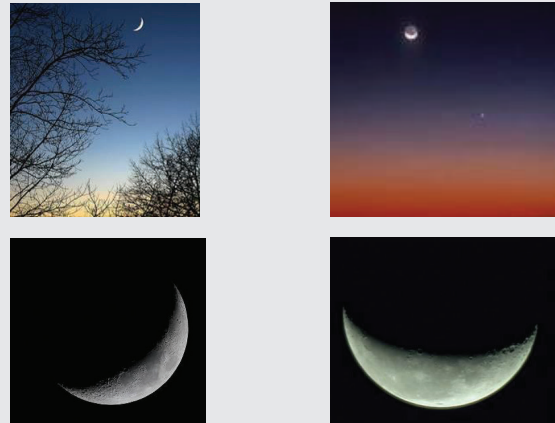


Fig. 36a: Croissant de la lune oblique, fig. 36b : La lune souriante forme U.

par rapport au Soleil et à e déclinaison qui varie considérablement en un mois. En effet, vue de la Terre par rapport aux étoiles, la Lune décrit unetrajectoire en un mois assez proche de l'écliptique, (l'orbite de la Lune est inclinée de 5° par rapport à l'écliptique.

La Lune est dans la direction du Soleil lorsqu'il y a une "Nouvelle Lune". Quand il y a une "pleine lune", elle se trouve à un point opposé à l'écliptique et sa déclinaison est opposée à celle du soleil (à moins de 5 degrés nord ou sud). Par exemple, au solstice de juin, la "pleine lune" se trouve à la position du soleil au solstice de

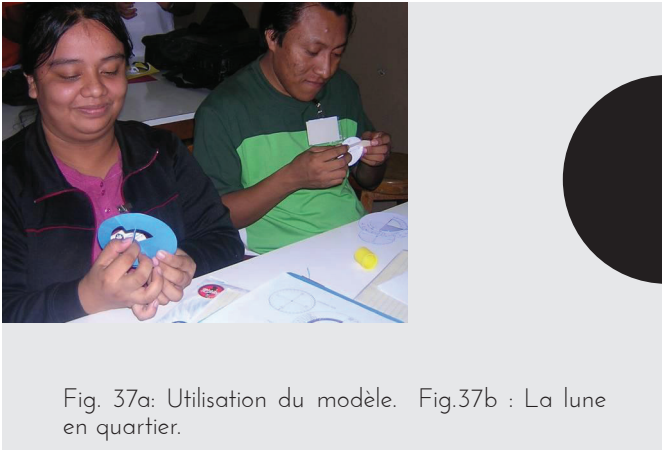


Fig. 37a: Utilisation du modèle. Fig.37b : La lune en quartier.

décembre; sa déclinaison est négative (entre -18° et -29°). Le mouvement diurne de la pleine lune en juin est similaire à celui du Soleil en décembre.

Si l'on considère le "D" en forme de croissant dans l'hémisphère nord (et "C" dans le Sud), on sait que la Lune est à 90° par rapport au Soleil. Cependant, il est "loin" du soleil sur la trajectoire de l'écliptique (environ trois mois de différence). En juin, le croissant de lune aura une déclinaison proche de la déclinaison du soleil en septembre (0°). Au mois de septembre, il aura une déclinaison proche de celle du Soleil en décembre ($-23,5^\circ$), etc ...

Construire le modèle de l'horizon lunaire

Le modèle de l'horizon lunaire est construit de la même manière que celui du Soleil. Comme précédemment, nous avons besoin d'un modèle pour simuler les observations de l'hémisphère nord et un autre pour l'hémisphère sud (figures 13 et 14 pour l'hémisphère nord et 14 et 15 pour l'hémisphère sud). C'est aussi une bonne idée de construire un modèle deux fois plus grand pour les explications de l'enseignant.

Pour placer la Lune dans le modèle, découpez la figure 37b (quart de lune) et collez deux morceaux de ruban adhésif sur et sous la coupe de la Lune (demi-point bleu). Placez cette bande transparente sur la zone des mois (figures 13 ou 15 selon l'hémisphère afin de faciliter le déplacement de cette bande de haut en bas dans cette zone et de la situer sur le mois de son choix.

Utilisation du modèle de l'horizon lunaire

En sélectionnant la latitude, nous effectuons un voyage imaginaire sur la surface de la Terre. À l'aide de votre main gauche, tenez la pièce principale du modèle (figures 38a et 38b) à côté de la zone vierge (sous le quadrant de latitude). Sélectionnez la latitude

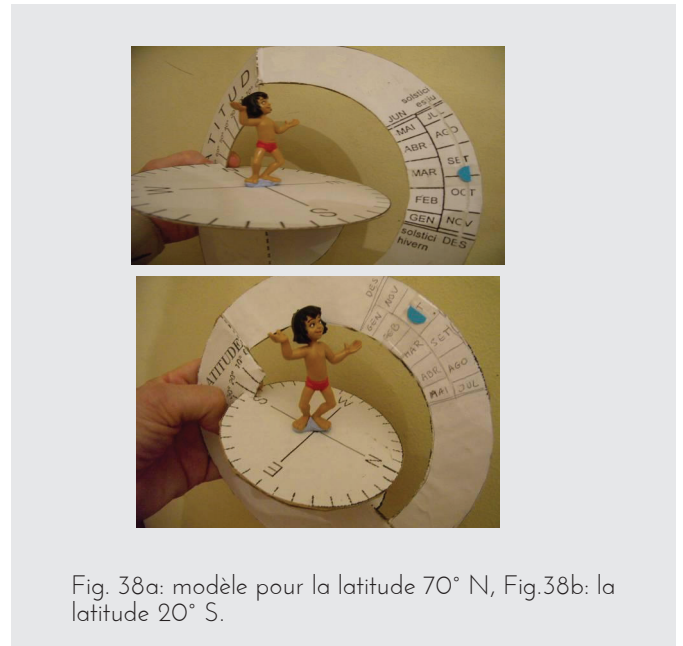


Fig. 38a: modèle pour la latitude 70° N, Fig.38b: la latitude 20° S.

et déplacez le disque d'horizon jusqu'à ce qu'il affiche la latitude choisie. Choisissez le jour pour lequel vous souhaitez simuler le mouvement d'une lune décroissante. Ajouter trois mois à cette valeur et mettre la lune dans la quatrième phase (figure 37b). Le mois auquel la lune fait face est l'endroit où le soleil sera dans trois mois. Utilisez votre main droite pour déplacer le disque qui contient la lune d'est en ouest.

Avec le simulateur pour l'hémisphère nord, vous pouvez voir l'apparence du quatrième quart de lune qui change avec la latitude et la période de l'année. Du point de vue de la poupée, la lune décroissante du quatrième quart peut apparaître comme un "C" ou un "U" à l'horizon

- Si nous choisissons la latitude autour de 70° N ou 70° S, nous pouvons voir le quart de lune comme un «C» se déplaçant d'est en ouest. La période de l'année n'a pas d'importance. Pour toutes les saisons, la Lune ressemble à un "C" (figure 38a).
- Si la latitude est de 20° N ou 20° S, l'observateur est proche des tropiques et on peut voir le quartier de la Lune souriant comme un «U». La Lune se déplace suivant une ligne plus perpendiculaire à l'horizon que dans l'exemple précédent (figure 32b). La forme "U" ne change pas avec le mois. Cela est valable pour toute l'année.
- Si la latitude est 90° N ou 90° S, l'observateur se trouve aux pôles et, selon le jour considéré:
 - Nous pouvons voir le quart de lune comme un "C" se déplaçant sur un chemin parallèle à l'horizon.
 - Nous ne pouvons pas le voir, car sa trajectoire est en dessous de l'horizon.

- Si la latitude est de 0° , l'observateur est sur l'équateur et nous pouvons voir le quart de lune souriant comme un «U». La Lune se lève et se couche perpendiculairement à l'horizon. Il se cachera (à midi) en forme de "U" et reviendra comme ceci: "U".

"Reconnaissance : Les auteurs tiennent à remercier Joseph Snider pour son dispositif solaire produit en 1992 qui l'a inspiré à produire d'autres démonstrateurs".

Pour les autres observateurs qui vivent à des latitude intermédiaires, le quart de lune se lève et se couche plus ou moins incliné et présente une forme intermédiaire entre un "C" et un "U".

Les commentaires ci-dessus s'appliquent de la même manière pour la lune en forme de "D". Encore une fois, nous devons nous rappeler de corriger le jour (dans ce cas, nous devons décaler trois mois) lorsque nous mettrons la position du soleil.

- Si nous introduisons une latitude de -70° (ou 70° sud), nous pouvons voir la lune décroissante comme un "D" qui se déplace d'est en ouest. Cela ne dépend pas de la période de l'année. En toutes saisons, la lune apparaît comme un "D" (figure 38a).

- Si la latitude est de -20° (figure 38b), l'observateur se trouve sous les tropiques et voit la Lune souriante comme un "U", peut-être légèrement inclinée. La Lune se déplace dans une trajectoire perpendiculaire à l'horizon, contrairement à l'exemple précédent (figure 32b). La forme de "U" ne change pas en fonction du mois.

- Si la latitude est de -90° , l'observateur est au pôle Sud et pourra, selon la date:
 - Voir la lune comme un "D" qui se déplace dans un chemin parallèle à l'horizon.
 - Ne pas voir la Lune, car son chemin est sous l'horizon.

- À 0° de latitude, comme dans le simulateur de l'hémisphère nord, l'observateur se trouve à l'équateur et nous pouvons voir le sourire de la lune comme un «U». La lune se lève perpendiculairement à l'horizon et se cache (vers midi) dans un "U" et réapparaît comme " ".

Pour les autres observateurs qui vivent dans les latitudes moyennes, la phase de la Lune se lève et se couche dans une position intermédiaire entre un «D» et un «U» et est plus ou moins inclinée selon la latitude du

lieu.

Ces commentaires peuvent être appliqués de la même manière que lorsque la Lune apparaît comme un "C", soustrayant à nouveau trois mois de la position du Soleil.

"Remerciements: les auteurs souhaitent remercier Joseph Snider pour son dispositif solaire produit en 1992 qui l'a inspirée à produire d'autres démonstrateurs."

.....

Bibliographie

Ros, R.M., *De l'intérieur et de l'extérieur*, Les Cahiers Clairaut, 95, 1, 5, France, 2001.

Ros, R.M., *Sunrise and sunset positions change every day*, Proceedings of 6th EAAE International Summer School, 177, 188, Barcelona, 2002.

Ros, R.M., *"Two steps in the stars" movements: a demonstrator and a local model of the celestial sphere*, Proceedings of 5th EAAE International Summer

Snider, J.L., *The Universe at Your Fingertips*, Frankoi, A. Ed., Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, 1995.

Warland, W., *Solving Problems with Solar Motion Demonstrator*, Proceedings of 4th EAAE International Summer School, 117, 130, Barcelona, 2000.

Le système Terre-Lune-Soleil: Les phases de la lune et les éclipses

Rosa M. Ros

Union Astronomique Internationale, Université Polytechnique de Catalogne (Barcelone, Espagne)

Résumé

Ce travail consiste à étudier les phases de la lune, les éclipses solaires et les éclipses lunaires. On peut se servir des éclipses pour trouver les distances et des diamètres dans le système Terre-Lune-Soleil. Enfin, on explique l'origine des effets de marées.

Objectifs

- Comprendre pourquoi la lune possède des phases
- Comprendre l'origine des éclipses lunaires
- Comprendre pourquoi les éclipses solaires se produisent
- Déterminer les distances et les diamètres dans le système Terre-Lune-Soleil
- Comprendre l'origine des effets de marée.

Les positions relatives

Le mot "éclipse" est employé pour des phénomènes très différents, mais en général une éclipse aura lieu quand un objet s'interpose devant un autre objet; dans ce cours, on évoquera les positions relatives de la Terre et de la Lune qui permettent l'occultation partielle ou totale de la lumière du soleil.

L'éclipse solaire se produit quand la lune s'intercale entre la terre et le soleil, dans ce cas la lune occulte le soleil. Ce type d'éclipse se produit au moment de la nouvelle lune (figure 1).

La Terre et la Lune se déplacent dans des orbites elliptiques qui ne sont pas coplanaires. L'orbite de la Lune est inclinée de 5 degrés par rapport à l'écliptique (plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil). Les deux plans se croisent sur une ligne appelée la Ligne des Nœuds. Les éclipses auront lieu lorsque la Lune est au voisinage de la Ligne des Nœuds. Si les deux plans coïncidaient, les éclipses seraient beaucoup plus fréquentes entre 4 et 7 fois par an.

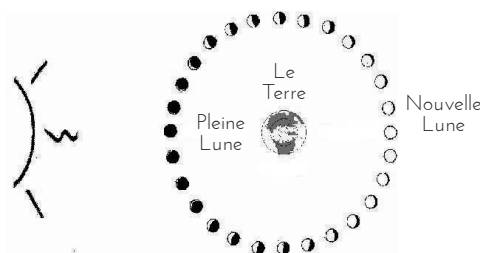


Fig.1: Les éclipses solaires auront lieu lorsque la Lune se situe entre le Soleil et la Terre (pendant nouvelle Lune). Les éclipses lunaires se produisent lorsque la Lune croise le cône d'ombre de la Terre (c'est-à-dire que la Terre se situe entre le Soleil et la Pleine Lune).

Modèles des masques

Modèle des visages cachés

La Lune a deux mouvements: un mouvement de rotation et un mouvement de translation qui ont approximativement la même durée, soit environ quatre semaines. C'est la raison pour laquelle, à partir de la terre, on ne peut voir que la même moitié de la surface de la Lune.

On peut simuler cette situation avec un modèle simple. Nous commençons par placer le volontaire qui joue le rôle de la Terre et le volontaire qui joue le rôle de la Lune (avec un masque blanc). Nous plaçons le volontaire "Lune" devant la Terre, face à face, avant de commencer à bouger. Donc, si la Lune se déplace de 90 degrés dans son orbite autour de la Terre, elle doit également tourner de 90 degrés sur elle-même et donc continuer à regarder en face de la Terre, et ainsi de suite. Nous demanderons au volontaire "Terre" s'il peut voir la même face de la Lune ou voir une partie différente. Nous répétons la même situation quatre fois, tout au long de l'orbite lunaire. Il est évident que à chaque rotation de 90°, c'est-à-dire chaque semaine, depuis la Terre on peut voir toujours la même partie de la lune, le dos et la tête du volontaire n'est jamais visible.

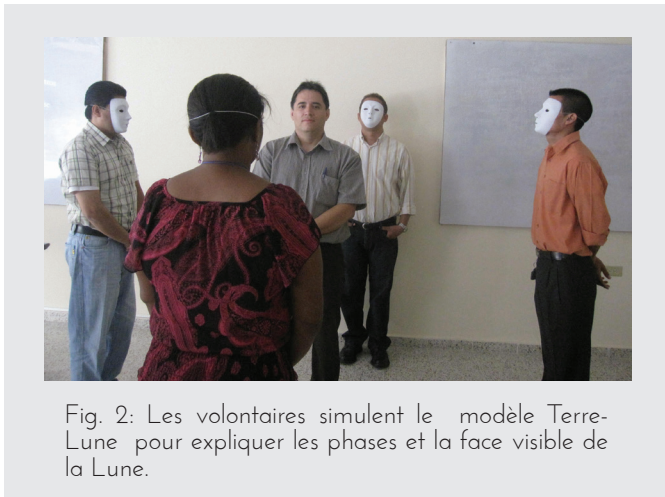


Fig. 2: Les volontaires simulent le modèle Terre-Lune pour expliquer les phases et la face visible de la Lune.

Modèle des phases de la Lune

Pour expliquer les phases de la Lune, il est préférable d'utiliser un modèle avec une lampe de poche ou avec un projecteur (qui représentera le Soleil) et au minimum cinq volontaires. L'un d'eux se placera au centre représentant la Terre, les autres se placeront autour de "la Terre" à distance égale pour simuler les différentes phases de la Lune. Pour le rendre plus attrayant, chaque volontaire qui joue la lune met un masque blanc qui imite la couleur de la lune. Ils devraient tous faire face à la «Terre» parce que nous savons que la Lune montre toujours le même côté à la Terre (figure 2). Nous allons placer la lampe de poche au-dessus et derrière l'un de ces volontaires, et commençons à observer les phases depuis la Terre (au centre). Il est très facile de découvrir que parfois le masque est complètement éclairée, parfois seulement un quart est éclairé et parfois non éclairé. Plus le nombre de bénévoles est grand, plus le nombre des phases qui peuvent être vus n'est grand.

Le modèle Terre-Lune

Ce n'est pas évident de comprendre facilement la géométrie des phases la de lune et des éclipses. Pour cette raison, on propose un modèle simple pour faciliter la compréhension des phénomènes. Sur une planche en bois placer deux boules distantes



plus grand que 120 cm

Fig. 3: Le Modèle Terre-Lune

de 120 cm (les deux boules de diamètre respectivement de 1 cm et 4 cm).

Il est important de maintenir ces dimensions relatives, car ils représentent un modèle à l'échelle du système Terre-Lune..

Diamètre Terre	12 800 Km	4 cm
Diamètre Lune	3 500 Km	1 cm
Distance Terre-Lune	384 000 Km	120 cm
Diamètre Sol	1 400 000 Km	440 cm = 4,4 m
Distance Terre-Soleil	150 000 000 Km	4 700 cm = 0,47km

Tableau 1: Les distances et les diamètres dans le système Terre-Lune-Soleil.

Reproduction des phases de la Lune.

Dans un endroit ensoleillé, lorsque la Lune est visible pendant la journée, pointez le modèle vers la Lune (la petite balle vers la Lune figure 4). L'observateur doit rester derrière la balle représentant la Terre. La balle qui représente la Lune semble être aussi grande que la vraie Lune et la phase est également la même. En modifiant l'orientation du modèle, les différentes phases de la Lune peuvent être reproduites en fonction de l'éclairage reçu du Soleil.

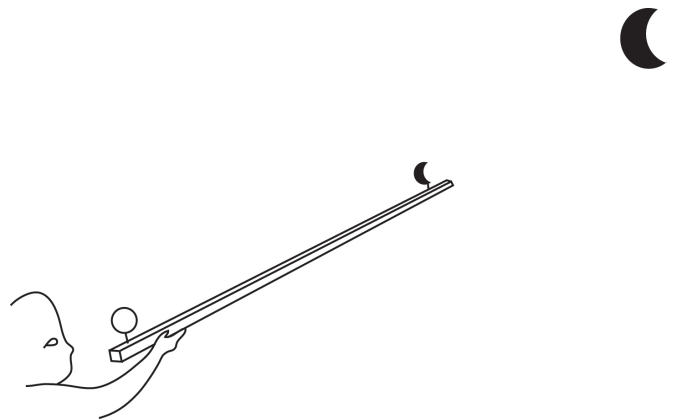


Fig. 4: Utilisation du modèle dans le cour de l'école.

A melhor forma de realizar esta atividade é no pátio, mas caso esteja nublado, também é possível realizar usando um retroprojor como fonte de luz.

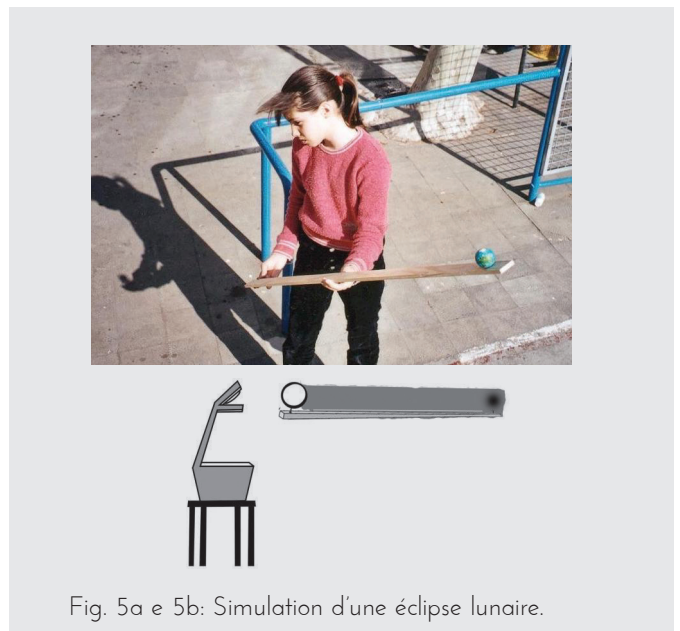


Fig. 5a e 5b: Simulation d'une éclipse lunaire.



Fig. 6: Succession de photos d'une éclipse lunaire. Notre satellite traverse le cône d'ombre produit par la Terre.

Il est préférable de réaliser cette activité à l'extérieur, mais, si le ciel est couvert, elle peut également être réalisée à l'intérieur à l'aide d'un projecteur comme une source lumineuse.

Reproduction des éclipses de Lune

Le modèle est tenu pour que la petite balle représentant la Terre soit face au Soleil (il vaut mieux utiliser un projecteur ou une lampe de poche pour éviter de

regarder directement au Soleil) (figures 5a et 5b). C'est un moyen simple de reproduire une éclipse lunaire.

Reproduction des éclipses solaires



Fig. 7a e 7b: Simulation d'une éclipse solaire



Fig. 8: Détail de la situation précédente 7a.

Fig. 9: Photo prise au bord de la MIR de l'éclipse totale du soleil en 1999 sur une région de la Terre.

Le modèle est placé de sorte que la balle représentant la Lune soit face au Soleil (il vaut mieux utiliser un projecteur ou une lampe de poche à la place du soleil), l'ombre de la Lune va être projetée sur la petite boule Terre. En faisant cela, une éclipse solaire sera reproduite et un petit point noir apparaîtra sur une région de la Terre (figures 7a, 7b et 8).

Il n'est pas facile de reproduire cette situation parce que l'inclinaison du modèle doit être finement ajustée (c'est la raison pour laquelle il y a moins d'éclipses solaires que lunaires).

Observations

- Une éclipse lunaire ne peut avoir lieu que lorsque la lune est pleine et l'éclipse solaire ne peut se produire que lorsque la lune est nouvelle.
- Une éclipse solaire totale ne peut être observable que depuis une petite région de la surface de la Terre
- Il est rare que la Terre et la Lune soient parfaitement alignées pour produire une éclipse, et donc on ne peut pas avoir une éclipse à chaque nouvelle ou pleine Lune.

Modèle Soleil-Lune

Afin de visualiser le système Soleil-Terre-Lune en respectant les distances entre eux, nous allons réaliser un nouveau modèle en prenant compte du point de vue qui est la terre. Dans ce cas, nous invitons les élèves à dessiner et à peindre un grand Soleil de 220 cm de diamètre (plus de 2 mètres de diamètre) sur une bâche et nous leur montrerons qu'ils peuvent le couvrir avec une petite Lune de 0,6 cm de diamètre (moins de 1 cm de diamètre). Il est utile de remplacer la boule lune par un trou dans une planche de bois afin d'être sûr de la position de la Lune et de l'observateur.

Diamètre Terre	12 800 Km	2,1 cm
Diamètre Lune	3 500 Km	0,6 cm
Distance Terre-Lune	384 000 Km	60 cm
Diamètre Soleil	1 400 000 Km	220 cm
Distance Terre-Soleil	150 000 000 Km	235 cm

Table 2: Les distances et les diamètres dans le système Terre-Lune-Soleil.

Dans ce modèle, le Soleil sera placé à 235 mètres de la Lune et l'observateur sera à 60 cm de la Lune. Les étudiants seront très surpris qu'ils puissent masquer le grand Soleil avec cette petite Lune. Cette relation de 400 fois la taille et les distances n'est pas facile à imaginer, donc il est bon de leur montrer un exemple afin de comprendre l'échelle des distances et les dimensions réelles dans l'univers. Tous ces exercices et activités les

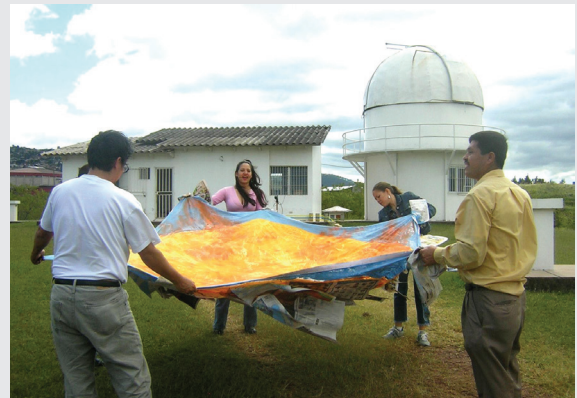


Fig. 10: Modèle du soleil.



Fig. 11: Observation du Soleil et de la Lune dans le modèle .

aident (et peut-être nous aussi les enseignants) à comprendre les relations spatiales entre les corps célestes au cours d'une éclipse solaire.

Mesurer le diamètre du Soleil

Nous pouvons mesurer le diamètre du Soleil de différentes façons. Nous présentons ici une méthode simple il s'agit de recouvrir les deux extrémités d'un tube en



Fig. 12 e 13: Modèle d'un tube en carton percé.

carton par une feuille d'aluminium ou avec du papier calque.

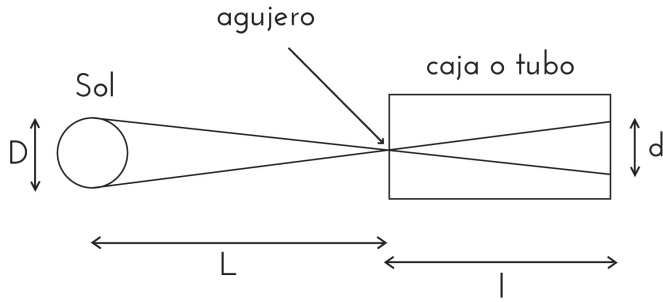


Fig. 14: Scheme.

1. On couvre l'extrémité d'un tube en carton par une feuille de papier calque. On couvre l'autre extrémité du tube par une feuille du papier noir ou du papier calque. On perce au centre de cette feuille un petit trou avec l'épingle (figures 12 et 13).

2. On doit pointer le trou vers le soleil et regarder vers l'autre extrémité qui est recouvert par le papier calque. Par la suite on mesure le diamètre (d) de l'image du soleil sur le papier calque.

Pour calculer le diamètre du soleil, il suffit de prendre en considération la figure 14, où on montre deux triangles semblables.

On peut établir la relation:

$$\frac{D}{L} = \frac{d}{l}$$

et résoudre le diamètre du soleil D:

$$D = \frac{d \cdot L}{l}$$

Connaissant la distance Terre-Soleil $L = 150\,000\,000$ Km, la longueur du tube en carton l et diamètre de l'image du soleil sur le papier calque, on peut calculer le diamètre du Soleil. (à savoir que le diamètre D du soleil est 1392000 km). On peut répéter le même exercice avec la pleine lune sachant que la distance terre-lune est 400000 km).

Tailles et distances dans le système Terre-Lune-Soleil I

Aristarque de Samos (310 à 230 av. J.-C.) a déduit la proportion entre les distances et les rayons dans le système Terre-Lune-Soleil. Il a calculé le rayon du Soleil et de la Lune, la distance de la Terre au Soleil et la distance de la Terre à la Lune en fonction du rayon de la Terre. Quelques années après, Eratosthène (280-

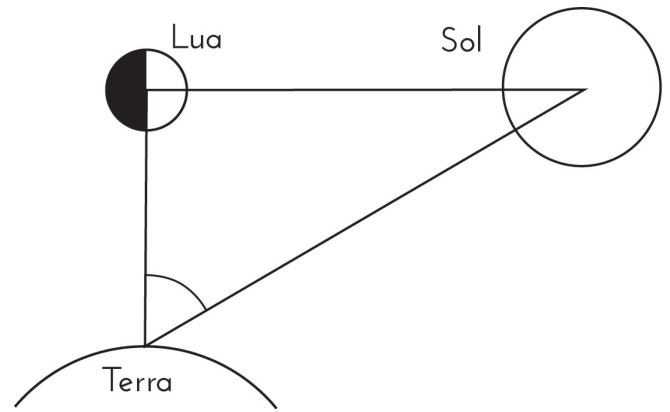


Fig.15: Position relative de la lune en premier quartier.

192 av. J.-C.) a déterminé le rayon de notre planète et il était possible de calculer toutes les distances et les rayons dans le système Terre-Lune-Soleil.

Le but de cette activité est de répéter les deux expériences en tant qu'activité pour les étudiants. L'idée est de répéter le processus mathématique autant que possible ainsi que les observations conçues par Aristarque de Samos et Eratosthène.

L'expérience d'Eratosthène: la relation entre les distances Terre-Lune et Terre-Soleil.

L'expérience d'Aristarque, encore une fois

Aristarque de Samos a déterminé l'angle entre la ligne Lune-Terre et la ligne Terre-Soleil lorsque la lune, au moment du premier quartier est $\alpha = 87^\circ$ (figure 15).

Nous savons aujourd'hui que la valeur qui a été déterminée par Aristarque de Samos n'est pas très précise, parce qu'il était très difficile de déterminer le moment exacte du premier quartier de la lune. En réalité cette valeur est $89^\circ 51'$,

$$\cos \alpha = \frac{EM}{ES}$$

ES: distance Terre-soleil, EM distance Terre-Lune. Par la suite,

$$ES = 400 EM$$

Bien que Aristarque ait déduit que $ES = 19 EM$.

Relation entre le rayon de la Lune et le rayon du Soleil

La relation entre le diamètre de la lune et le diamètre du soleil devrait être similaire à la formule précédemment, car à partir de la Terre, nous observons le diamètre apparent du soleil et de la lune qui vaut $0,5^\circ$. Donc, les deux rapports vérifient

$$R_S = 400 R_M$$

La relation entre la distance Terre-Lune et le rayon de la lune et la relation entre la distance Terre-soleil et le rayon du soleil

Aristarque de Samos suppose que l'orbite de la lune autour de la terre est un cercle. Comme le diamètre apparent de la lune est 0.5°, l'orbite de la lune autour de la Terre (360°) est 720 fois le rayon de la lune. L'orbite vaut aussi 2π fois la distance Terre-Lune, 2 R_M 720 = 2 π EM,

$$EM = \frac{720R_M}{\pi}$$

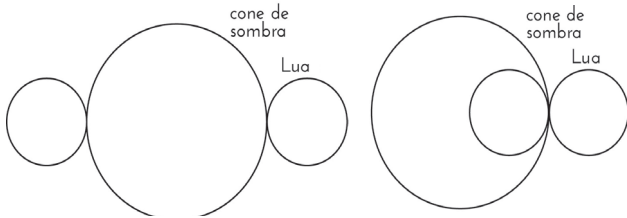


Fig. 16a: Mesurer le cône d'ombre.
Fig. 16b: Mesurer le diamètre de la Lune.

Par le même raisonnement,

$$ES = \frac{720R_S}{\pi}$$

Relation entre les distances à la Terre du Soleil et de la Lune, le rayon lunaire, le rayon solaire et le rayon terrestre

Au cours d'une éclipse lunaire, Aristarque de Samos a remarqué que le temps nécessaire à la Lune pour traverser le cône d'ombre de la Terre était deux fois le temps nécessaire pour que la surface de la Lune pénètre dans le cône d'ombre c'est-à-dire 2:1 en réalité c'est 2.6 :1.

Résumé

En tenant compte des derniers résultats (figure 17). On déduit,

$$\frac{x}{2.6R_M} = \frac{x + EM}{R_E} = \frac{x + EM + ES}{R_S}$$

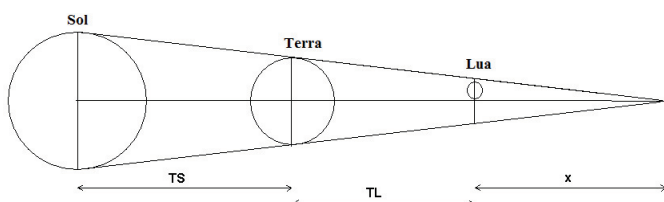


Fig. 17: Le cône d'ombre de la Terre et les positions relatives du système Terre-Lune-Soleil.

Où x est une variable supplémentaire. En introduisant dans cette expression les relations ES = 400 EM et RS = 400 RM, nous pouvons sup-primer x et après simplification, nous obtenons,

$$R_M = \frac{401}{1440} \cdot R_E$$

Cela nous permet d'exprimer toutes les tailles mentionnées précédemment en fonction du rayon de la Terre, donc

$$R_S = \frac{2005}{18} R_E ; ES = \frac{80200}{\pi} R_E ; EM = \frac{401}{2\pi} R_E$$

Où nous devons seulement substituer le rayon de notre planète pour obtenir toutes les distances et les rayons dans le système Terre-Lune-Soleil.

Prendre les mesures avec les élèves

C'est une bonne idée de répéter les mesures faites par Aristarque de Samos avec les élèves. En particulier, il faut d'abord calculer l'angle entre le Soleil et la lune lors du premier quartier. Pour effectuer cette mesure, il suffit d'avoir un théodolite et de connaître le moment exact du premier quartier.

Nous essaierons donc de vérifier si cet angle mesure a = 87° ou a = 89° 51' (bien que cette précision soit très difficile à obtenir).

Deuxièmement, lors d'une éclipse lunaire, à l'aide d'un chronomètre, il est possible de calculer la relation entre les temps suivants: «le premier et le dernier contact de la Lune avec le cône d'ombre de la Terre», c'est-à-dire mesurer le diamètre du cône d'ombre de la Terre Figure 17a) et "le temps nécessaire pour couvrir la surface lunaire", c'est une mesure du diamètre de la lune (figure 20b). Enfin, il est possible de vérifier si le rapport entre les deux est de 2: 1 ou de 2.6: 1 ou il est différent.

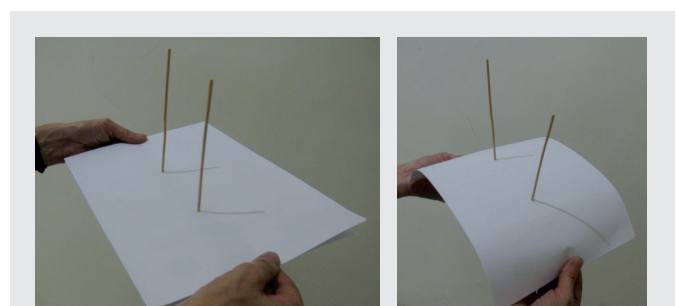


Fig. 18a e 18b: Sur une surface plane, les deux bâtons produisent la même ombre, mais lorsque la surface est courbée, les ombres sont différentes.

L'objectif le plus important de cette activité n'est pas le résultat obtenu pour chaque rayon ou distance. Le plus important est de souligner aux étudiants que s'ils utilisent leurs connaissances et leur intelligence, ils peuvent obtenir des résultats intéressants avec peu de ressources. Dans ce cas, l'ingéniosité d'Aristarque de Samos était très importante pour avoir une idée sur la taille du système Terre-Lune-Soleil.

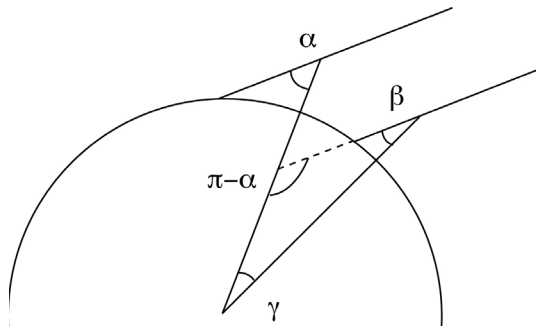


Fig. 19: Expérience d'Eratosthène.

Il est également judicieux de mesurer avec les élèves le rayon de la terre suivant le processus utilisé par Eratosthène. Bien que l'expérience d'Eratosthène soit bien connue, nous présentons ici une brève version de celle-ci afin de compléter l'expérience précédente.

L'expérience d'Eratosthène, encore une fois

Eratosthène était le directeur de la bibliothèque d'Alexandrie. Dans l'un des textes de la bibliothèque, il a lu que dans la ville de Syène (maintenant Assouan) le jour du solstice d'été, à midi solaire, le Soleil se reflète au fond d'un puits, de même, un bâton ne produit pas d'ombre le même jour et à la même heure. Il a noté que ce n'est pas le cas à Alexandrie. C'est -à- dire qu'un bâton produisait un ombre à Alexandrie le jour du solstice de l'été et à midi solaire. De là, il a déduit que la surface de la Terre ne pouvait pas être plate, mais elle devrait être une sphère (figures 18a et 18b).

Considérons deux bâtons placés perpendiculairement au sol, dans deux endroits sur la surface de la Terre sur le même méridien. Les bâtons devraient être pointés vers le centre de la Terre. Nous devrions mesurer la longueur du bâton, et la longueur de son ombre.

Nous supposons que les rayons solaires sont parallèles. Les rayons solaires produisent deux ombres, une pour chaque bâton. Nous mesurons les longueurs des bâtons et des ombres et en utilisant la définition de la tangente, on obtient les angles a et b (figure 19). L'angle central g peut être calculé imposant que la somme des trois angles du triangle est égale π radians. Ensuite, $\rho = \pi - a + b + g$ et simplifiant: $g = \pi - a - b$

Où a et b ont été obtenus par le bâton et son ombre.

Enfin, établissant une proportionnalité entre l'angle g , la longueur de son arc d (déterminée par la distance au-dessus du méridien entre les deux villes), 2 radians du cercle méridien et sa longueur $2\pi R_E$, on trouve,

$$\frac{2\pi R_E}{2\pi} = \frac{d}{g}$$

alors il s'ensuit que:

$$R_E = \frac{d}{g}$$

où g a été obtenu par l'observation et d est la distance en km entre les deux villes. Nous pouvons trouver d à partir d'une bonne carte géographique.

Dans la situation d'Eratosthène, l'angle b était nul et $g = a$, et d qui est la distance entre Alexandrie et Syène, de cette façon, on peut avoir un bon résultat du rayon terrestre. Il convient également de mentionner que le but de cette activité n'est pas l'exactitude des résultats, mais plutôt, nous voulons que les élèves découvrent que penser et utiliser toutes les possibilités qu'on peut imaginer pourraient produire des résultats surprenants. Também é necessário mencionar que o objetivo desta atividade não é a exatidão dos resultados. É esperado que os estudantes descubram que pensando e usando todas as possibilidades pode produzir resultados surpreendentes.

Les effets des marées

Les marées sont la montée et la chute du niveau de la mer causées par les effets combinés de la rotation de la Terre et les forces gravitationnelles exercées par la Lune et le Soleil. La forme du fond de la mer et du rivage dans la zone côtière influence également les marées, mais dans une moindre mesure. Les marées sont pro-

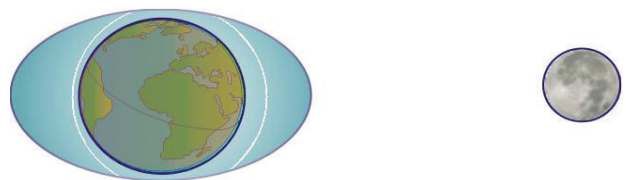


Fig. 20: Effet de marée.

duites avec une période d'environ 12 heures et demie.

Les marées s'expliquent principalement par l'attraction entre la Lune et la Terre. Des marées hautes se produisent sur les côtés de la Terre face à la lune et en face de la lune (figure 20). Les marées basses se produisent dans les points intermédiaires.

Les phénomènes de marée étaient déjà connus dans l'antiquité, mais leur explication n'était possible

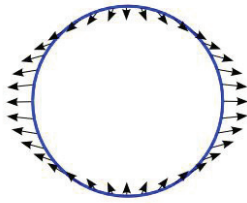


Fig. 21: Effet sur l'eau de l'accélération différentielle de la Terre dans différentes zones de l'océan.

qu'après la découverte de la loi de Newton sur la gravitation universelle (1687).



La lune exerce une force gravitationnelle sur Terre. Quand il y a une force gravitationnelle, il y a une accélération gravitationnelle selon la deuxième loi de Newton ($F = ma$). Ainsi, l'accélération provoquée par

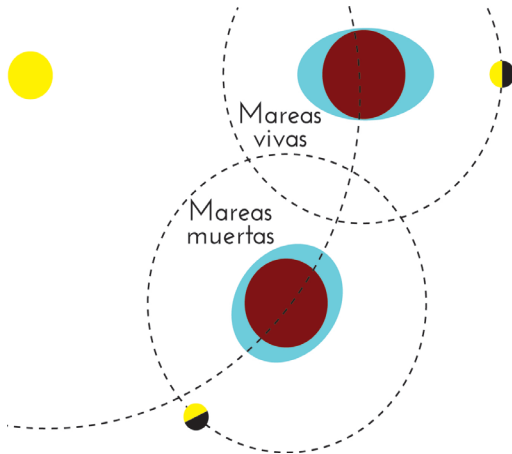


Fig 22: Grande marée et faible marée.

la lune sur Terre est donnée par

$$a_g = G (m_l/d^2)$$

où m_l est la masse de lune et d est la distance de la lune à un point sur la Terre.

La partie solide de la Terre est un corps rigide, par conséquent, on peut considérer toute l'accélération sur cette partie solide appliquée au centre de la Terre. Cependant, l'eau est liquide et subit une accélération distincte qui dépend de la distance à la lune. Ainsi, l'accélération du côté le plus proche de la lune est supérieure que celle du côté opposé. Par conséquent, la surface de l'océan génère un ellipsoïde (figure 21).

Cet ellipsoïde est toujours allongé vers la Lune (figure 20) alors que la Terre est en rotation au centre. Ainsi,

chaque point sur Terre aura une marée haute suivie d'une marée basse deux fois par jour. En effet, la période entre les marées est un peu plus de 12 heures et la raison est que la lune tourne autour de la Terre avec une période synodique d'environ 29,5 jours. Cela signifie qu'il court 360° en 29,5 jours, de sorte que la lune se déplace dans le ciel près de $12,2^\circ$ tous les jours ou $6,6^\circ$ toutes les 12 heures.

Comme chaque heure, la Terre elle-même tourne autour d'environ $15^\circ/h$, donc $6,6^\circ$ est équivalente à environ 24 minutes, ce qui fait que chaque cycle de marée dure 12 heures et 24 minutes. Comme l'intervalle de temps entre la marée haute et la marée basse est d'environ la moitié, le temps qu'il faut pour que les marées hautes deviennent des marées basses, et vice versa, seront environ 6 heures 12 min.

En raison de sa proximité, la Lune a une forte influence sur les marées. Mais le Soleil a également une influence sur les marées. Lorsque la Lune et le Soleil sont en conjonction (Nouvelle Lune) ou en opposition (Pleine Lune), c'est là que les grandes marées se produisent. Par contre quand la Lune et le Soleil exercent une attraction gravitationnelle perpendiculaire (Premier quartier ou dernier quartier), la Terre connaît alors des faibles marées (figure 22).

Bibliographies

Broman, L., Estalella, R., Ros, R.M., *Experimentos de Astronomía. 27 pasos hacia el Universo*, Editorial Alambra, Madrid, 1988.

Broman, L., Estalella, R., Ros, R.M., *Experimentos de Astronomía*, Editorial Alambra, México, 1997.

Fucili, L., García, B., Casali, G., "A scale model to study solar eclipses", Proceedings of 3rd EAAE Summer School, 107, 109, Barcelona, 1999.

Lanciano, N., *Strumenti per i giardino del cielo*, Edizioni junior, Spaggiari Eds, Roma, 2016.

Ros, R.M., "Lunar eclipses: Viewing and Calculating Activities", Proceedings of 9th EAAE International Summer School, 135, 149, Barcelona, 2005.

Ros, R.M., Viñuales, E., Aristarchos' Proportions, Proceedings of 3rd EAAE International Summer School, 55, 64, Barcelona, 1999.

Ros, R.M., Viñuales, E., El mundo a través de los astrónomos alejandrinos, *Astronomía, Astrofotografía y Astronáutica*, 63, 21. Lérida, 1993.

Porte-documents pour Jeune astronome

Rosa M. Ros

Union Astronomique Internationale, Université Polytechnique de Catalogne (Barcelone, Espagne)

Résumé

Pour poursuivre l'observation, il est nécessaire que les élèves disposent d'un ensemble d'outils simples. A l'école, nous pouvons construire certains outils qui seront utilisés dans l'observation du ciel. Les élèves doivent comprendre d'une manière fondamentale comment divers instruments ont été introduits au fil des siècles, comment ils se sont développés et sont devenus nécessaires. C'est une partie importante de l'astronomie, pour cela il est recommandé d'attirer leur attention sur l'effort fourni et les compétences nécessaires pour la conception et l'utilisation de ces instruments. Ces techniques ne sont pas faciles à développer avec les étudiants et pour cette raison nous proposons ici des instruments très simples.

Objectifs

- Comprendre l'importance de faire des observations minutieuses.
- Comprendre la construction et l'utilisation de divers instruments.

Les Observations

Nous pouvons acquérir une certaine pratique dans la mesure du temps et des positions des corps célestes avec des maquettes. Nous donnons quelques informations sur la constitution d'une collection d'outils d'observation dans une valise. La valise et son contenu sont généralement faits en carton à l'aide de colle, ciseaux, etc. Le sujet peut avoir la possibilité d'étudier de nombreux autres instruments anciens et modernes.

La capacité artistique et l'imagination des étudiants permettront de faire des valises très personnelles. Cette activité pourrait être facilement modifiée et adaptée aux étudiants en fonction de leur âge, avec des outils plus ou moins sophistiqués.

Cette valise comprend notamment:

- Une règle pour mesurer les angles
- Un quadrant simplifié
- Un goniomètre horizontal
- Une planisphère
- Une carte de la Lune

- Un cadran solaire équatorial
- Un spectroscopie

Nous proposons une valise avec des outils très simples. La petite valise peut être facilement transportée à l'école ou pendant le temps libre, prête à l'emploi. Il est important qu'elle ne soit ni trop grande ou ni trop fragile (surtout si elle doit être utilisée par des jeunes étudiants). Nous soulignons que l'exactitude des mesures n'est pas le but de cette activité.

Contenu

Nous ne pouvons évidemment que simuler cela sur une cour d'école en été. L'idée est de faire de la pratique avec les outils que nous allons construire.

Nous ne pouvons évidemment que simuler cela sur une cour d'école en été. L'idée est de faire de la pratique avec les outils que nous allons construire.

- Une «**règle pour mesurer les angles**» qui peut être utilisée pour mesurer la distance angulaire entre deux étoiles d'une constellation. Il est très facile à utiliser si nous ne voulons pas introduire les coordonnées.

- Un **quadrant simplifié** est utilisé pour mesurer la hauteur des étoiles. Lorsque les élèves voient un objet à travers le viseur, le fil indique la position angulaire par rapport à son horizon.

- Un **goniomètre horizontal** simple est utilisé pour déterminer l'azimut des étoiles. Évidemment, vous devez utiliser une boussole pour orienter l'instrument dans la direction Nord-Sud.

- Un **planisphère** avec des constellations photocopiées très clairement sur un disque de papier blanc et une pochette en carton, qui comprend une fenêtre transparente indiquant la latitude du lieu, pour mettre le disque du ciel à l'intérieur. En tournant le disque, la fenêtre d'horizon montre la partie du ciel de nuit qui est visible à une certaine date et heure.

- Un **spectroscope** pour décomposer la lumière en sept couleurs qui la composent.
- Une **carte de la Lune** avec les noms de mers et quelques cratères qui sont facilement reconnaissables à travers des jumelles.
- Une **lampe de poche** (lumière rouge) pour éclairer

les cartes avant de regarder le ciel réel. La lumière blanche brillante rendra difficile l'adaptation des yeux des élèves à l'obscurité. Si les élèves apportent une lampe de poche dans leur valise, vous devez mettre un filtre rouge.

- Une **boussole** pour aligner les différents instruments.
- Et bien sûr, tous les accessoires que chaque étudiant devrait avoir: cahier, stylo, une montre et, si c'est possible, un appareil photo.

En suivant les instructions et les dessins, nous pouvons obtenir nos outils de manière très simple et les utiliser à l'extérieur. Pendant le jour, nous mesurerons, par exemple, avec le quadrant la position (hauteur) d'un arbre, d'une colline, et ainsi de suite. La nuit, nous pouvons mesurer la position de deux étoiles différentes ou de la Lune afin de comprendre le cycle périodique de ses phases. Nous encourageons les étudiants à prendre des données.

Pour les premières observations nocturnes, il est préférable d'utiliser des cartes simples préparées à l'avance pour se familiariser avec les constellations les plus importantes.

Une règle pour mesurer les angles

Considérant une simple proportion, nous pouvons construire un instrument de base pour mesurer les angles dans n'importe quelle position. Notre objectif principal est de répondre à la question suivante: "Quelle est la distance (rayon R) dont j'ai besoin pour obtenir un dispositif me permettant d'avoir: 1° équivalent à 1 cm?".

Dans la figure 1 nous considérons la relation entre

la circonférence de longueur $2\pi R$ en centimètres qui correspond à 360 degrés, avec 1 cm qui correspond à 1°:

$$\frac{2\pi R \text{ cm}}{360^\circ} = \frac{1 \text{ cm}}{1^\circ}$$

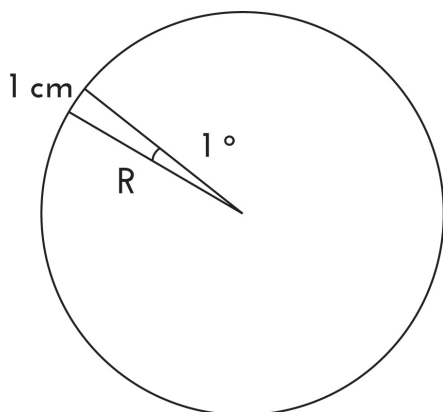


Fig. 1: Le rayon R qui permet d'obtenir l'équivalent à 1 cm.

Alors,

$$R = 180 / \pi = 57 \text{ cm}$$

Pour construire l'instrument:

Nous prenons une règle, où nous fixons une corde de 57 cm de longueur. Il est très important que la corde ne s'étire pas.

Comment l'utilisons-nous?

- Nous regardons avec l'extrémité de la corde qui touche presque notre œil (sur la joue, sous l'œil).
- Nous mesurons l'angle avec la règle en faisant correspondre 1cm à 1 degré si la corde est étendue (figure 2).

Exercices proposés:

Quelle est la distance angulaire entre deux étoiles d'une même constellation?

Utilisez la «règle pour mesurer les angles» pour calculer la distance (en degrés) entre Merak et Dubhe de la

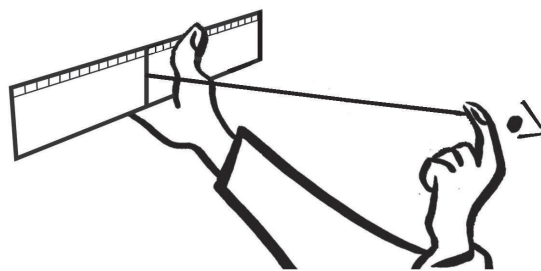


Fig. 2: En utilisant l'instrument (une règle et un morceau de ficelle de 57 cm de long), nous pouvons mesurer des angles avec l'équivalence "1cm = 1°".

Grande ourse.

Un quadrant simplifié: quadrant "PISTOLET"

Un modèle très simplifié du quadrant peut être très utile pour mesurer les angles. Ici, nous présentons le modèle "PISTOLET" qui est simple à utiliser par les étudiants.

Pour le construire:

Vous avez besoin d'un morceau de carton rectangulaire (environ 12x20cm). Nous découpons une zone rectangulaire comme dans la figure 3 afin de tenir l'instrument. Nous mettons deux petits pitons (achetés dans une quincaillerie) sur le côté (figure 3).

Dans un quadrant, vous attachez un quart de cercle en papier gradué de 0° à 90° (figure 4) de sorte que l'un des crochets est sur la position 0° (figure 3). Sur l'angle droit du papier, attachez un fil avec un petit poids à son extrémité (perle).

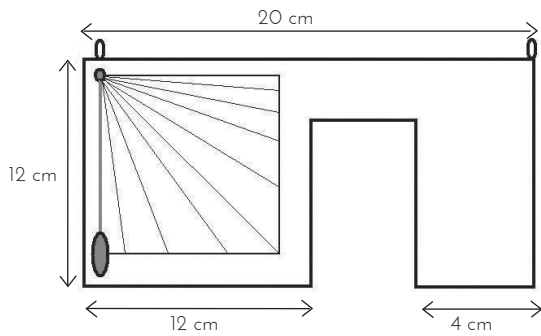


Fig. 3: Quadrant « Pistolet ».

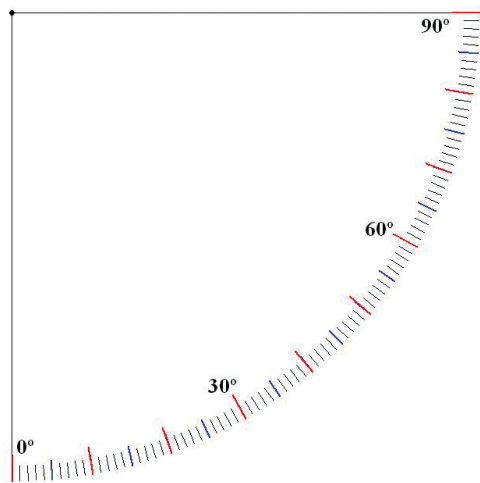


Fig. 4: Graduation de 90° à coller sur le quadrant.

Comment l'utiliser?

- Lors de la visualisation de l'objet à travers les deux crochets, le fil indique la position angulaire 0° en se référant à l'horizon (figure 5b).
- Une paille à boire passant à travers les crochets est un excellent viseur qui nous permettra de mesurer la hauteur du Soleil en projetant l'image sur un morceau de carton blanc.

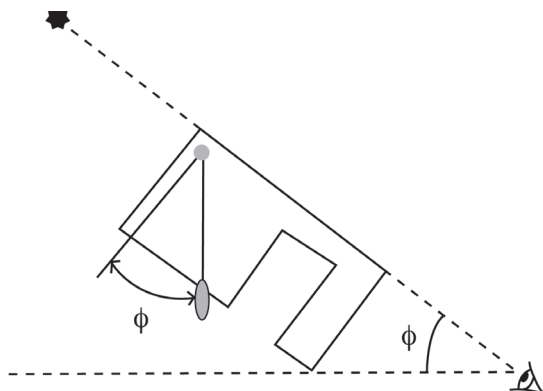


Fig. 5a et 5b : Utilisation du quadrant "canon".

ATTENTION: NE JAMAIS REGARDER DIRECTEMENT AU SOLEIL !!!

Exercices proposés:

Quelle est la latitude de l'école?

Nous utiliserons le quadrant pour mesurer la hauteur de l'étoile polaire. La latitude d'un lieu est égale à la hauteur de l'étoile polaire à cet endroit (figure 6).

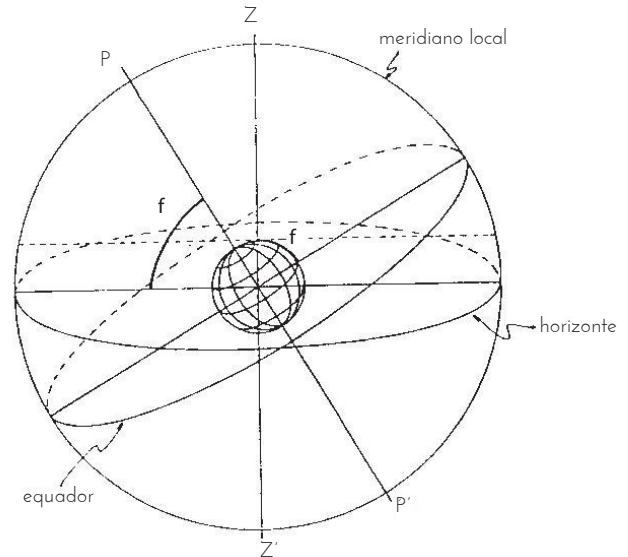


Fig. 6: La latitude du lieu f est égale à la hauteur de l'étoile Polar.

Vous pouvez également utiliser le quadrant pour calculer (en classe de mathématiques) la hauteur de l'école ou un autre bâtiment à proximité.

Goniomètre Horizontal

Un modèle simplifié du goniomètre horizontal est utilisé pour connaître la deuxième coordonnée nécessaire pour déterminer la position d'un corps céleste (l'azimut).

Pour construire l'outil:

Découpez un rectangle de carton d'environ 12x20cm

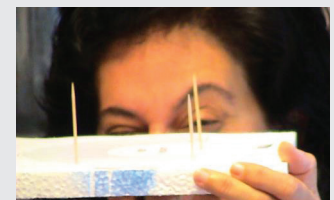
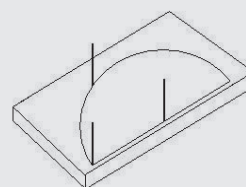


Fig. 7a e 7b: Utilisation du goniomètre horizontal.

(figure 7a). Nous collons un demi-cercle de papier (figure 8) avec les angles indiqués de sorte que le diamètre du demi-cercle soit parallèle au côté le plus long du rectangle. A l'aide de 3 "aiguilles", nous pouvons marquer deux directions dans le goniomètre (figure 7b). niómetro (figura 7b).

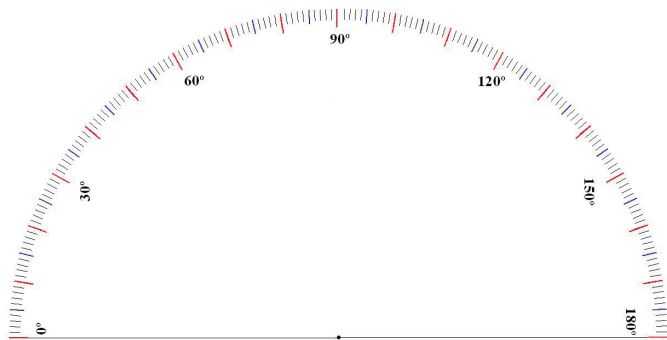


Fig. 8: Graduation de 180° à coller sur le goniomètre horizontal.

Comment est-il utilisé?

- Si nous voulons mesurer l'azimut d'une étoile, nous alignons la ligne de départ du demi-cercle dans la direction Nord-Sud.
- L'azimut est l'angle entre la ligne Nord-Sud et la ligne passant par le centre du cercle et la direction du corps.

Exercices proposés:

Quelle est la position de la Lune ce soir?

Utilisez le quadrant et le goniomètre horizontal pour calculer la hauteur et l'azimut de la Lune. Pour étudier le mouvement de la Lune pendant la nuit, vous pouvez déterminer ses deux coordonnées trois fois par heure tous les 20 minutes. De cette façon, vous pouvez comparer le mouvement de la Lune par rapport à celui des étoiles dans le ciel.

Le planisphère

Nous utilisons des cartes du ciel, qui dépendent de la latitude, pour reconnaître les constellations. Nous construisons l'une de ces cartes et nous recommandons aussi de l'agrandir avec un photocopieur.

Pour construire le planisphère:

Nous utiliserons une copie des constellations du ciel dans un disque "blanc" que nous placerons dans un support en fonction de notre latitude par rapport à l'équateur.

Hémisphère nord

Pour les localités de l'hémisphère nord de latitudes entre 0 et 20 degrés, vous devez préparer deux planisphères, un pour chaque horizon. Pour construire l'horizon nord, on coupe la fenêtre de la figure 9a par la ligne continue correspondant à la latitude et on la plie sur la ligne pointillée pour former une poche. Nous placerons la carte des étoiles de la figure 10a à l'intérieur. Maintenant nous avons le planisphère de l'horizon nord.

Nous procédons de la même façon pour la construction du planisphère de l'horizon sud. Couper et plier,

comme précédemment, la fenêtre de la figure 9b, et placer à l'intérieur la carte des étoiles (figure 10a). Nous utiliserons les deux planisphères alors que nous observons soit vers l'horizon nord ou vers l'horizon sud.

Quand nous voulons observer dans l'hémisphère nord avec des latitudes entre 30 et 70 degrés, il suffit de couper la fenêtre de la figure 9e par la ligne pleine et de plier la ligne pointillée pour obtenir une poche où nous placerons le cercle d'étoiles que nous avons coupé auparavant (figure 10a).

Hémisphère sud

Pour les localités de l'hémisphère sud, avec des latitudes entre 0 et 20 degrés, nous devrions préparer deux planisphères, un pour chaque horizon. Au début, nous construisons l'horizon nord. On coupe la fenêtre de la figure 9c par la ligne continue correspondant à la latitude et on la plie par la ligne pointillée pour former une poche. Nous placerons la carte des étoiles de la figure 10b à l'intérieur. Avec cette opération nous avons le planisphère de l'horizon nord. Nous procédons de la même façon pour la construction du planisphère de l'horizon sud. Couper et plier, comme précédemment, la fenêtre de la figure 9d pour placer à l'intérieur la carte des étoiles sur la figure 10b. Nous utiliserons les deux planisphères alors que nous observons l'horizon nord ou l'horizon sud.

Quand nous observons dans la direction de l'hémisphère sud avec des latitudes entre 30 et 70 degrés, il suffit de couper la fenêtre de la figure 9f par la ligne pleine et de plier la ligne pointillée pour obtenir une poche où nous placerons le cercle d'étoiles que nous avons coupé auparavant (figure 10b).

Comment on l'utilise:

La date du jour au cours de laquelle nous allons observer, alignée sur l'heure d'observation, est pivotée en tournant le cercle d'étoiles et le planisphère est utilisé face au ciel dans la direction indiquée. La partie du ciel visible ne semble pas recouverte de papier.

Attention: un planisphère est utilisé comme parapluie. C'est une carte du ciel et nous devons la placer au-dessus de notre tête afin de reconnaître les constellations.

Exercices proposés:

Quel ciel pouvons-nous observer ce soir?

En utilisant le planisphère que vous avez construit à la latitude de votre école, tournez le disque stellaire jusqu'à ce que la date d'aujourd'hui coïncide avec l'heure de l'observation.

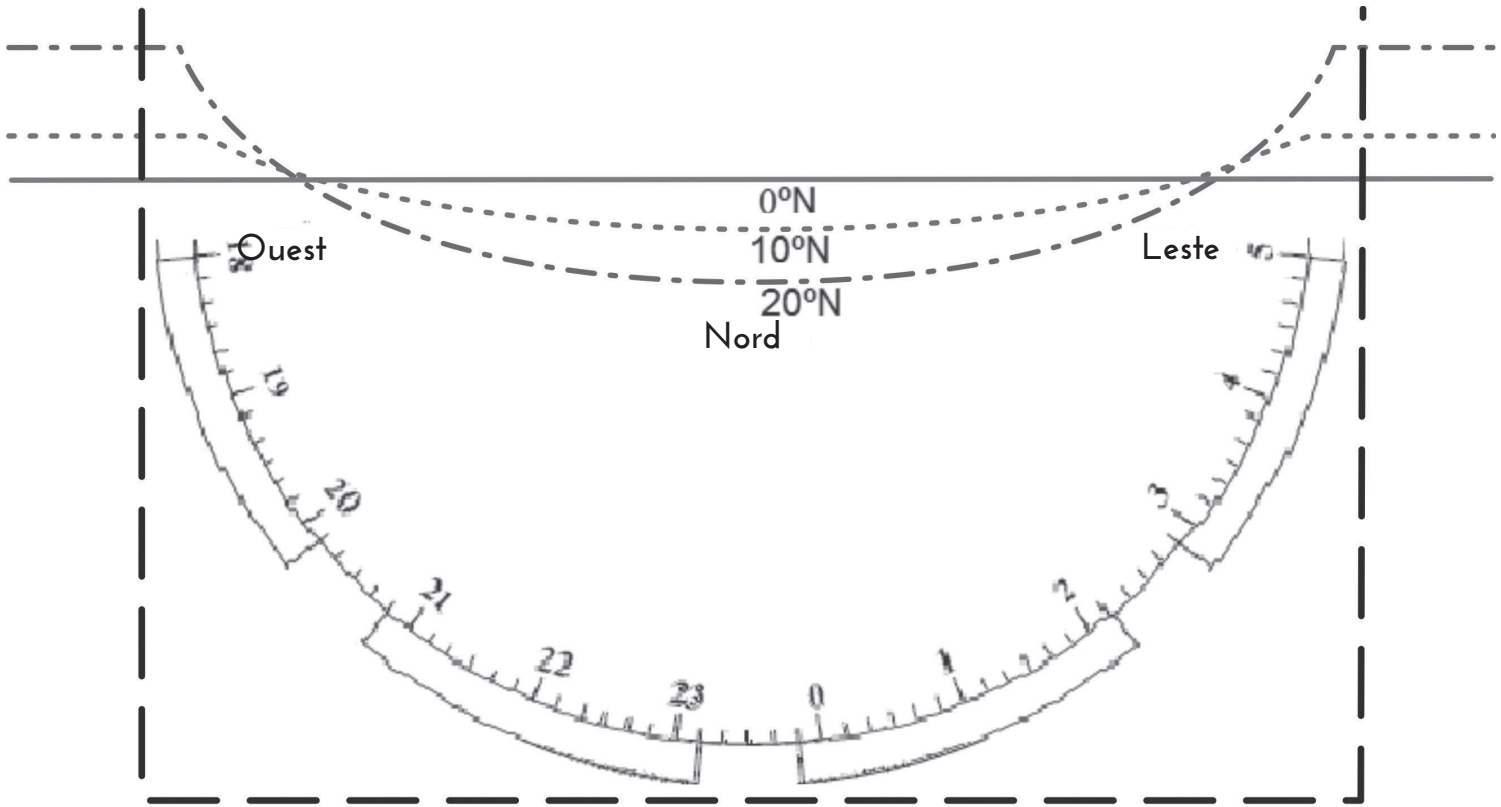


Fig. 9a: Poche pour l'horizon nord dans l'hémisphère nord (latitude 0, 10 et 20 Nord).

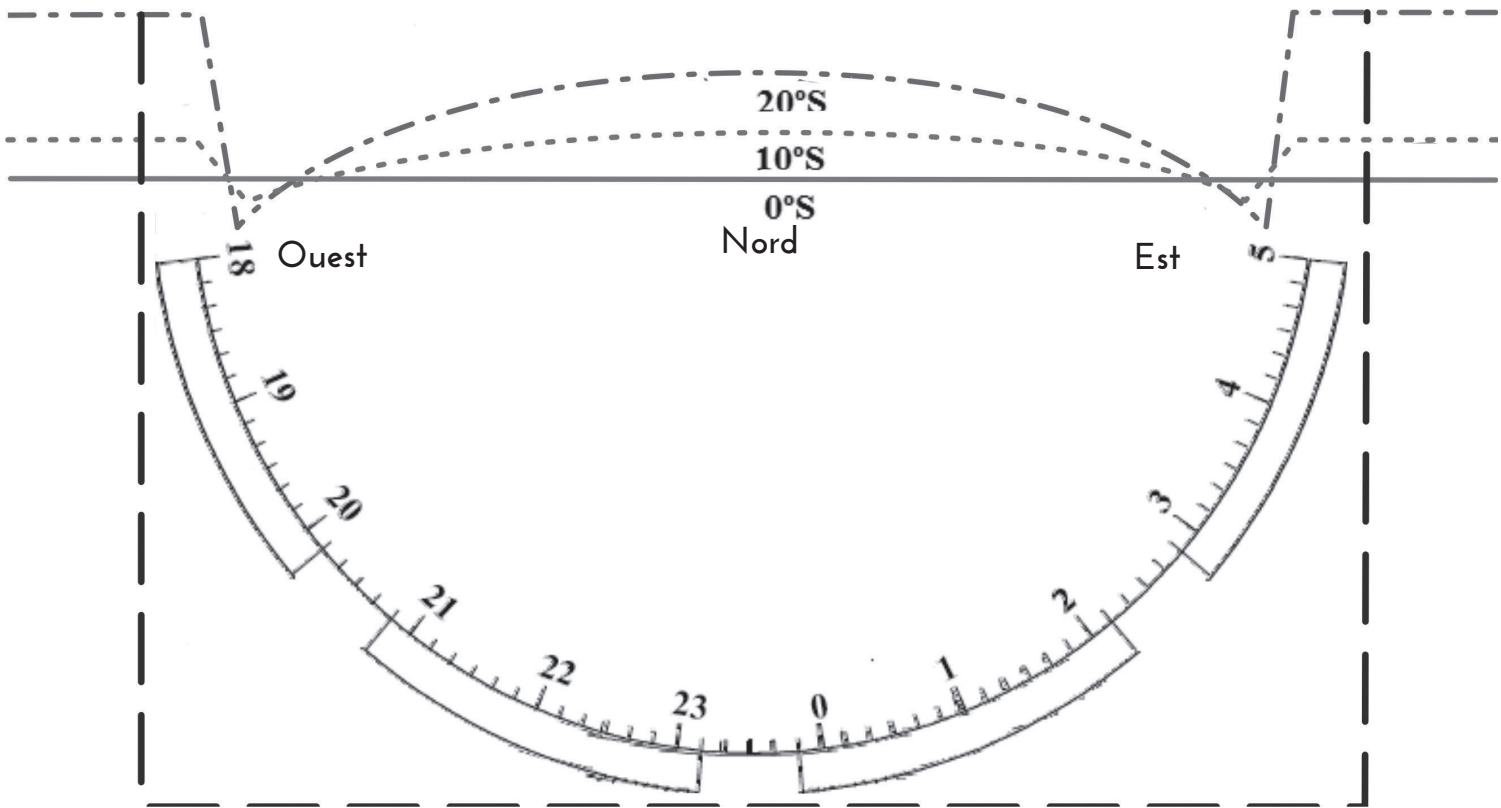


Fig. 9b: Poche pour l'horizon sud dans l'hémisphère nord (latitude 0, 10 et 20 Nord).

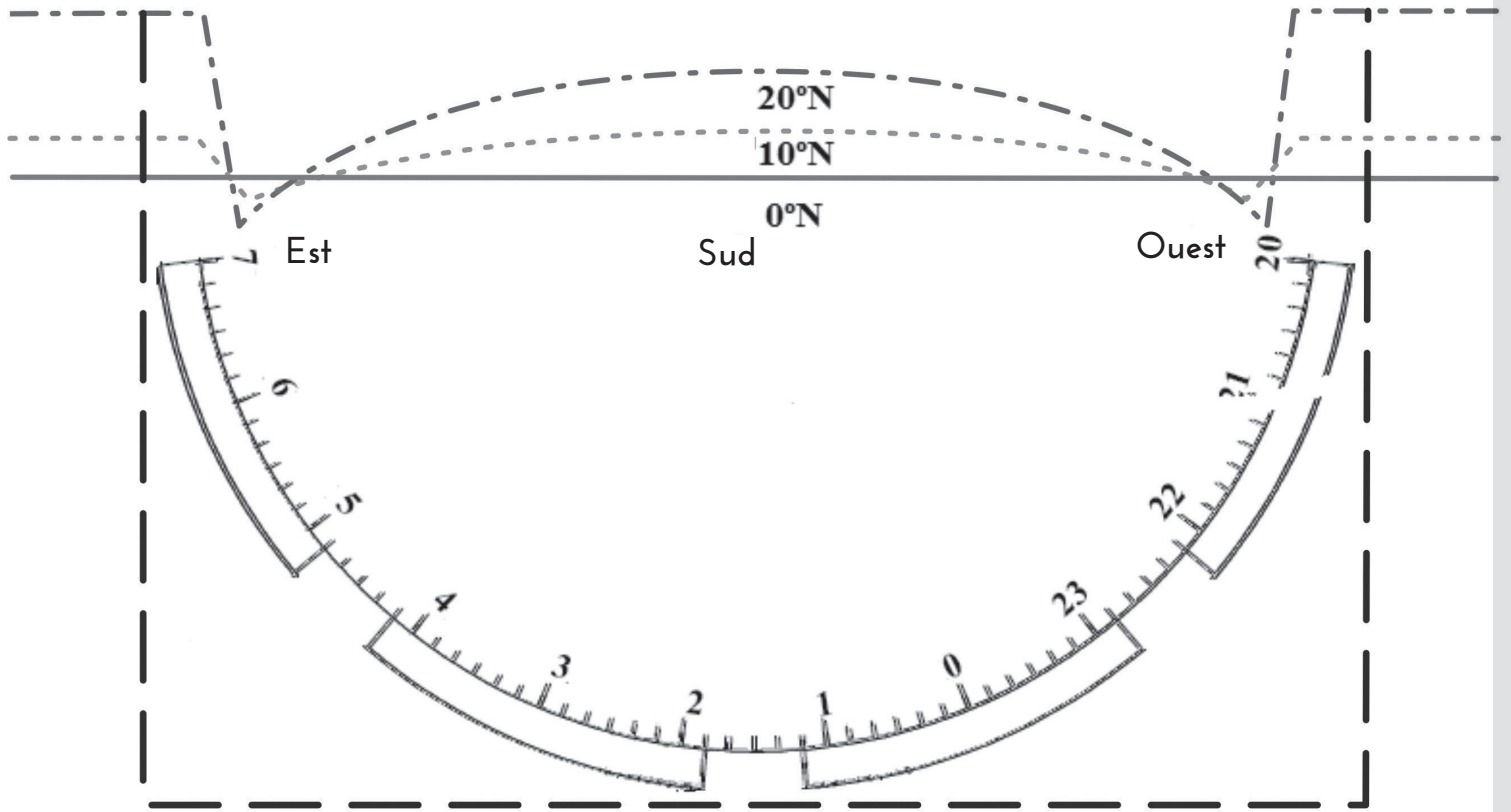


Fig. 9c: Poche pour l'horizon nord dans l'hémisphère sud (latitude 0, 10, 20 sud).

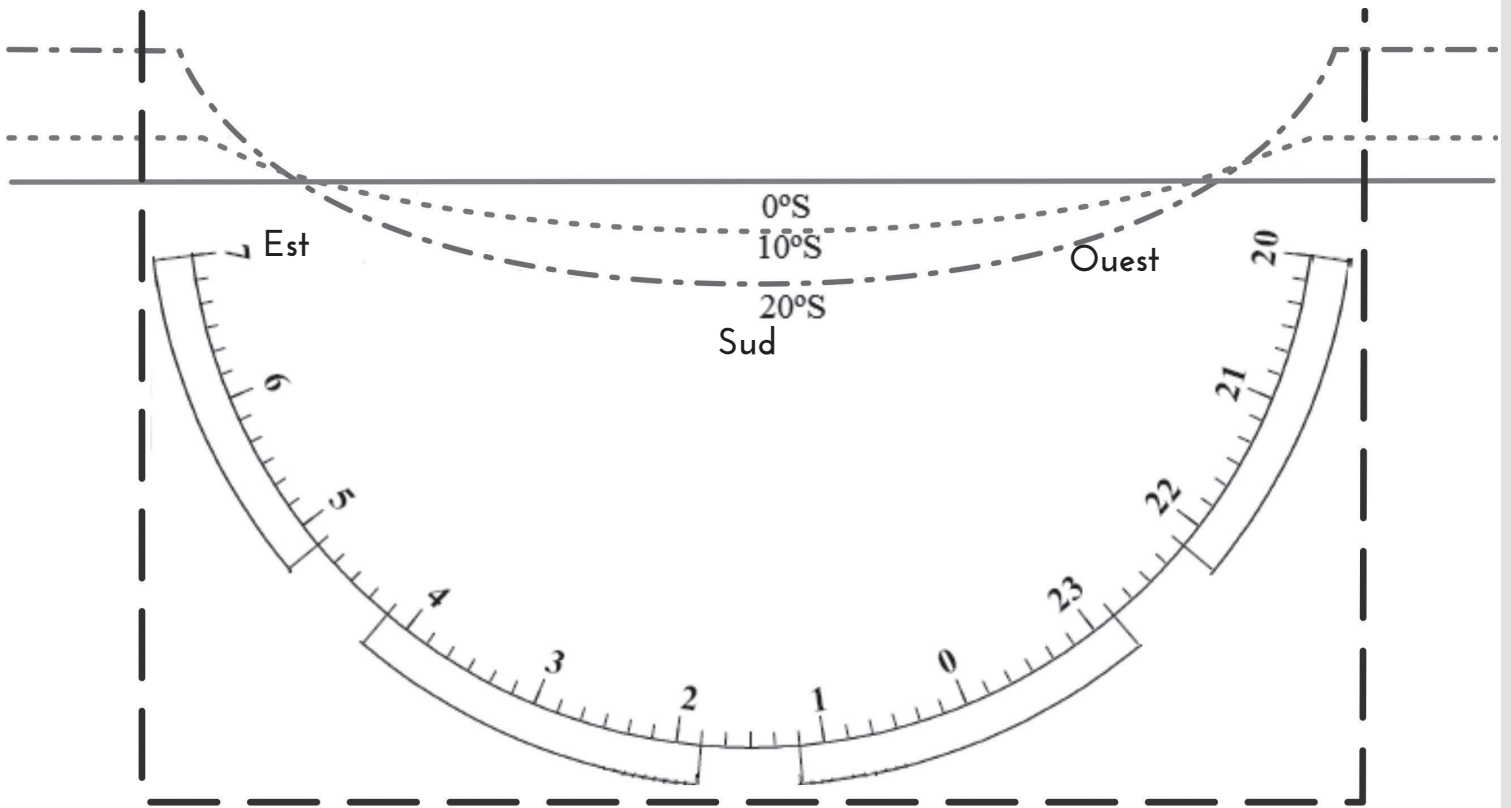


Fig. 9d: Poche pour l'horizon sud dans l'hémisphère sud (latitude 0, 10, 20 sud).

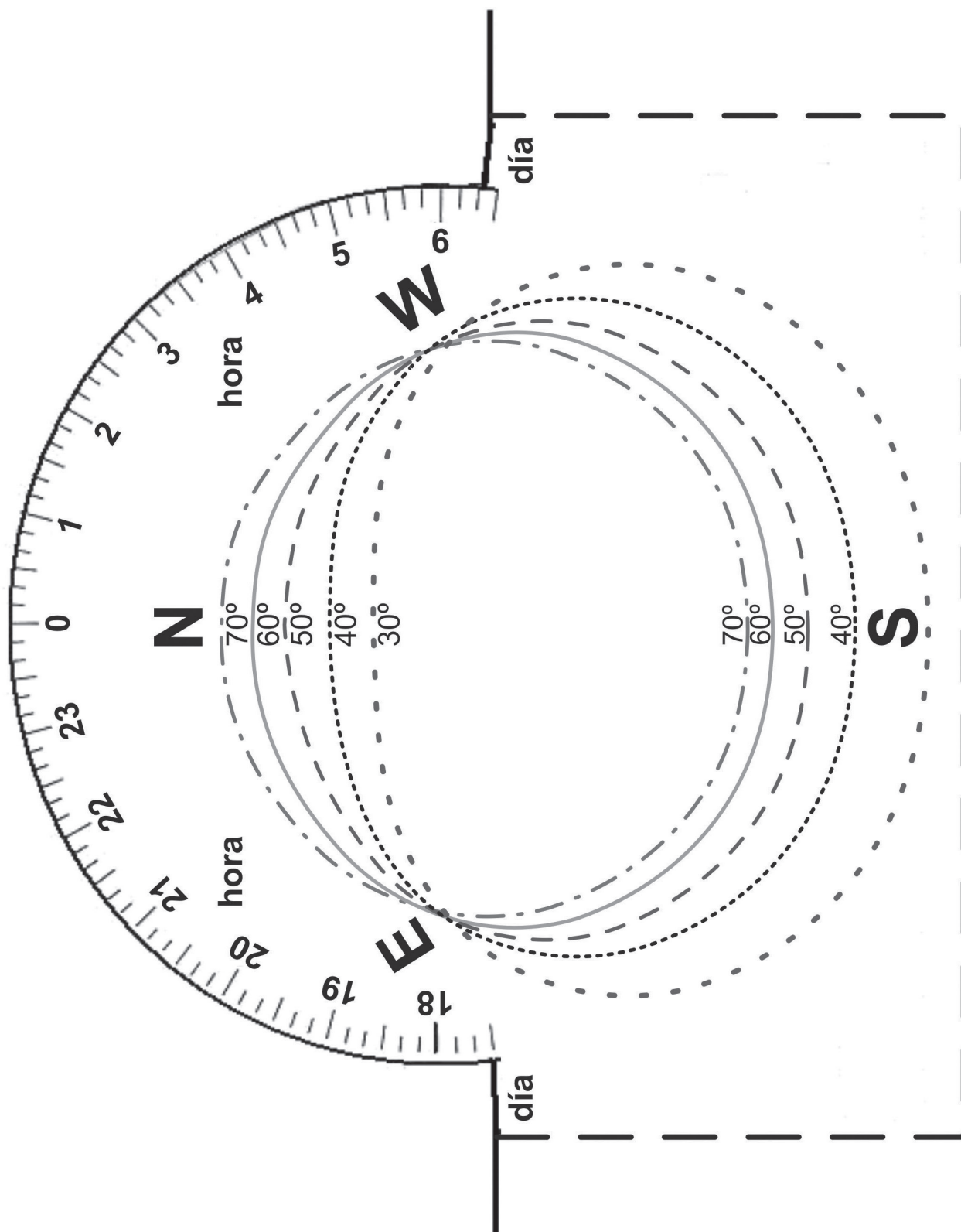


Fig. 9e: Poche pour les deux horizons dans l'hémisphère nord. Latitudes 30, 40, 50, 60 et 70 Nord.

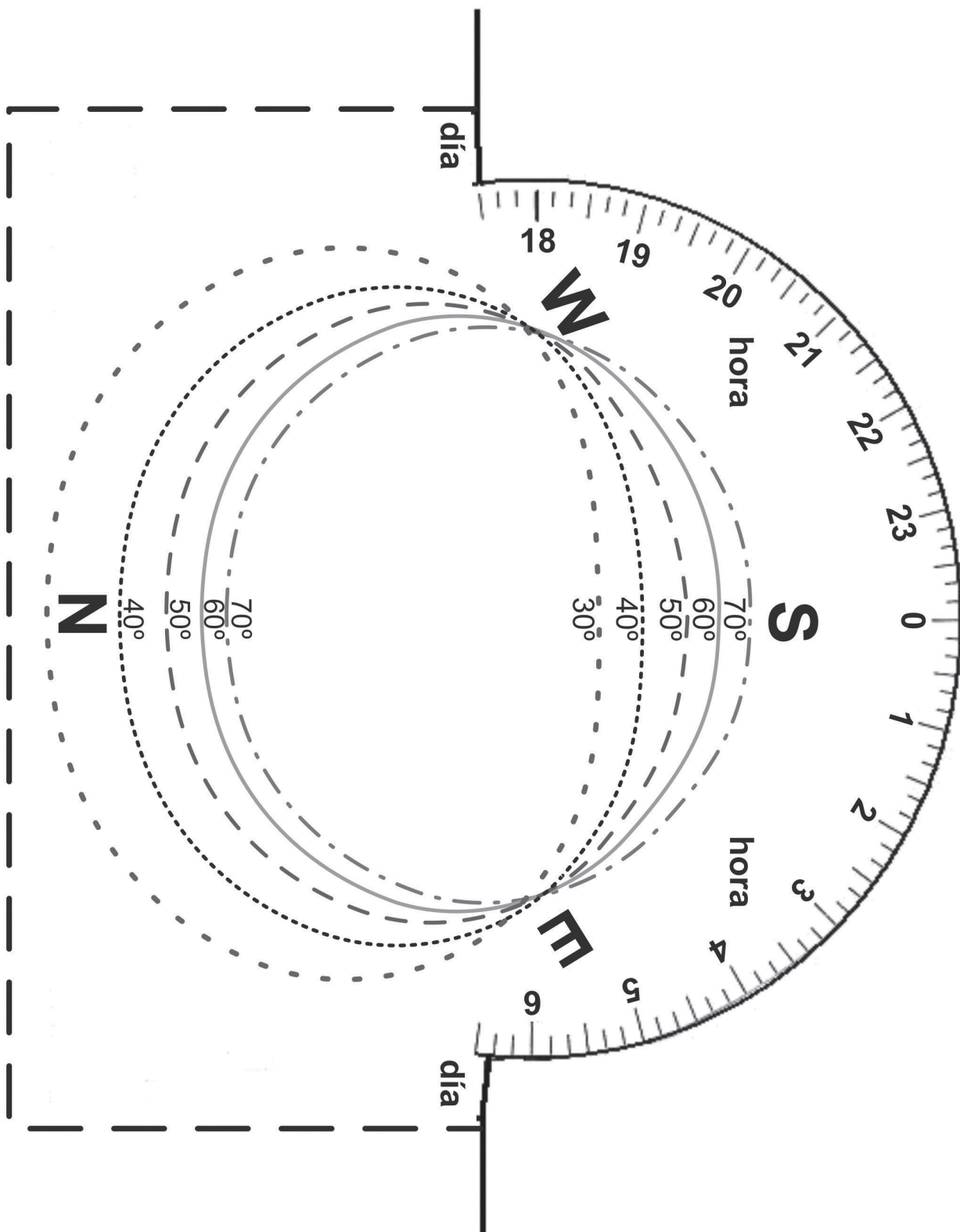


Fig. 9f: Poche pour les deux horizons dans l'hémisphère sud. Latitudes 30, 40, 50, 60 et 70 Sud.

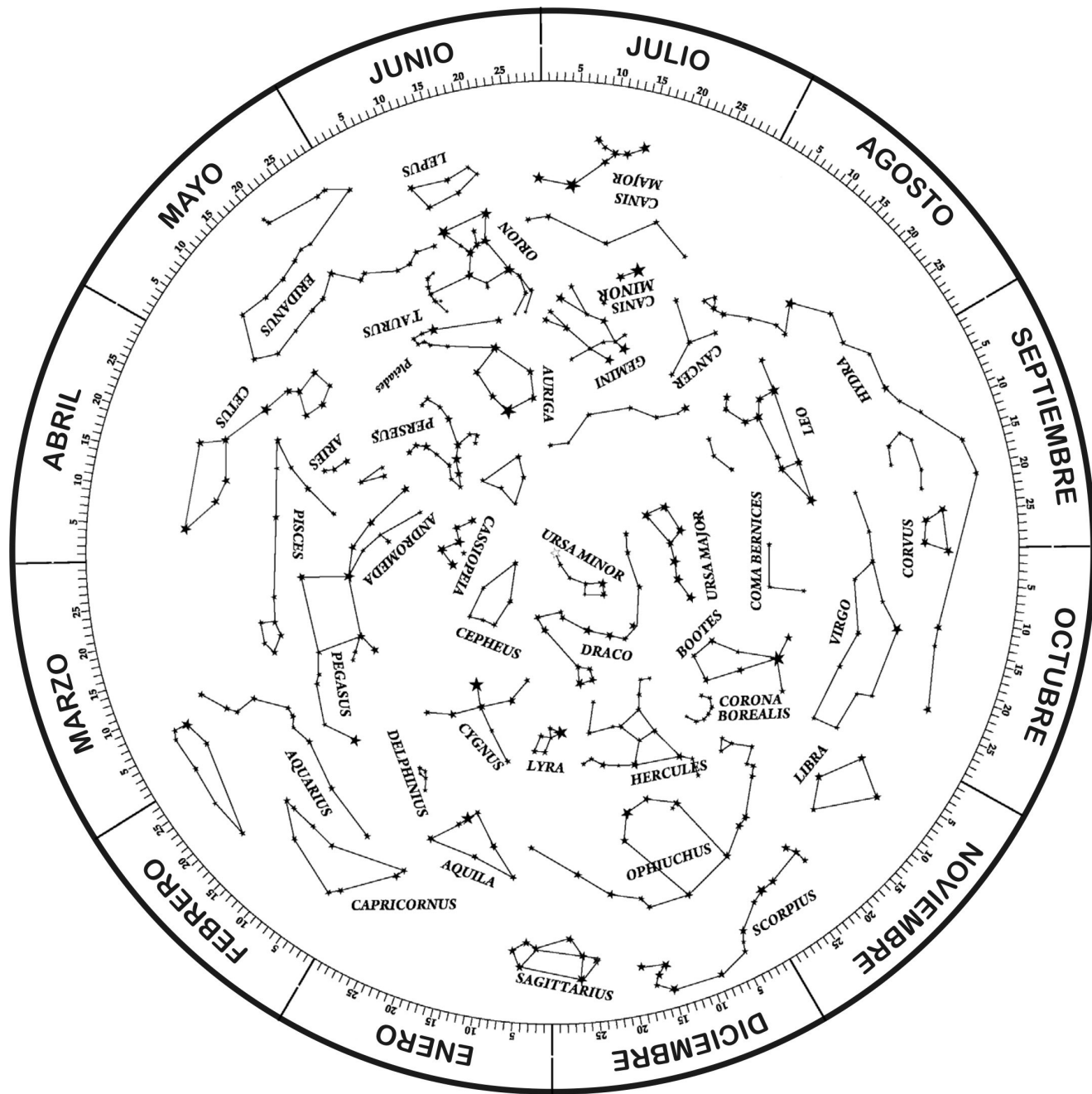


Fig. 10a: Le disque ou la carte stellaire qui est placée à l'intérieur de la poche. Hémisphère nord.

Notez que le planisphère est une "carte stellaire" et que vous devez le soulever sur votre tête "comme un parapluie" (ce n'est pas une carte de votre ville!).

Spectroscopie

En passant la lumière du soleil à travers cet instrument sensible, l'étudiant sera capable de visualiser la décomposition spectrale de la lumière. C'est un moyen simple pour les étudiants d'observer le spectre stellaire avec un instrument qu'ils ont construit.

Comment construire un spectroscopie:

Peindre l'intérieur d'une grande boîte d'allumettes (de la taille généralement utilisée dans une cuisine). Faire une coupe longitudinale (figure 11b) à travers laquelle l'observateur peut voir le spectre. Coupez un CD endommagé (ou autrement inutilisable) en 8 parties égales, et placez une des pièces à l'intérieur sur le fond de la boîte, de façon que la surface enregistrable du CD soit vers le haut. Fermez la boîte, en laissant seulement une petite section ouverte, en face de l'endroit où vous avez construit la fente de visualisation.



Fig. 11a y 11b: Comment utiliser un spectroscopie.

Comment l'utiliser:

- Orientez la boîte afin que la lumière du soleil passe à travers la section ouverte ensuite observez à travers la fente (figure 11a).
- À l'intérieur de la boîte d'allumettes, vous verrez la lumière du soleil se décomposer en plusieurs couleurs, c'est son spectre.

Exercices proposés:

Comparer le spectre solaire avec celui d'une lampe fluorescente ou autres lampes qui sont à l'école. Vous pourrez observer les variations qui apparaissent dans le spectre en fonction du type de lampe que vous utilisez.

Carte de la Lune

Il est bien d'inclure dans votre porte-document un modèle simplifié de la carte lunaire qui contient les noms des mers et certains des cratères qui peuvent être vus avec des jumelles ou avec de petits télescopes.

Pour le construire:

Vous avez besoin d'un morceau de carton de forme carré (environ 20x20 cm) (figures 12 ou 13).

Comment l'utiliser?

Sachez que l'orientation changera selon le matériel utilisé soit vous utilisez l'œil nu, soit vous utilisez des jumelles ou un télescope (image inversée) et si vous observez depuis l'hémisphère nord ou l'hémisphère sud.

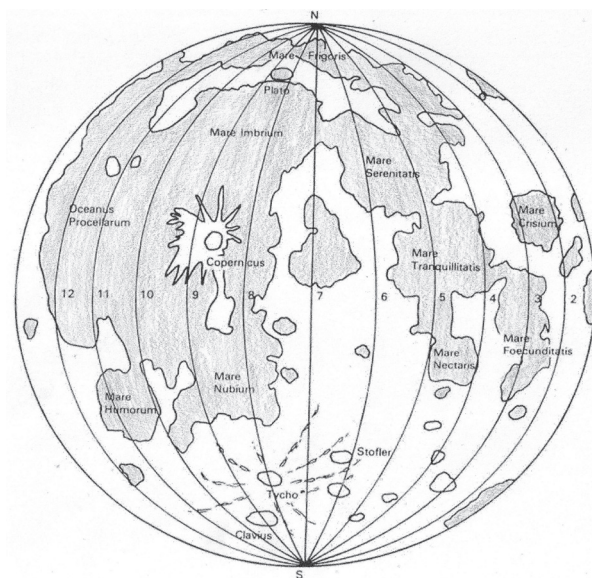


Fig. 12: Carte schématique de la Lune, vue de l'hémisphère nord.

Il est plus facile de commencer par identifier les mers, vérifier que la position est correcte, puis continuer à identifier d'autres caractéristiques lunaires.

Exercices proposés:

Quel est le cratère Tycho?

Regardez la Lune quand plus de sa moitié est éclairée et identifiez, dans la zone centrale, un cratère avec un grand système de rayons (lignes qui sort du cratère dans toutes les directions de la surface de la Lune).

Organisez votre porte-documents

Placez un sac en papier avec une feuille sur la face supérieure de la boîte ouverte (figure 14) pour stocker le planisphère, la carte de la Lune, le cadran solaire, etc.

Dans la partie profonde de la boîte placer les instruments de sorte qu'ils ne peuvent pas se déplacer, à l'aide de clips, d'épingles, et de petites ceintures. Les pitons du quadrant doivent être placés vers le centre parce que la valise contient des instruments délicats qui peuvent être déplacés lors de sa manipulation. On peut mettre une liste du contenu à l'extérieur de la valise, ainsi nous serions sûrs d'avoir tout rassemblé à la fin de l'activité. En outre, bien sûr, une étiquette avec votre

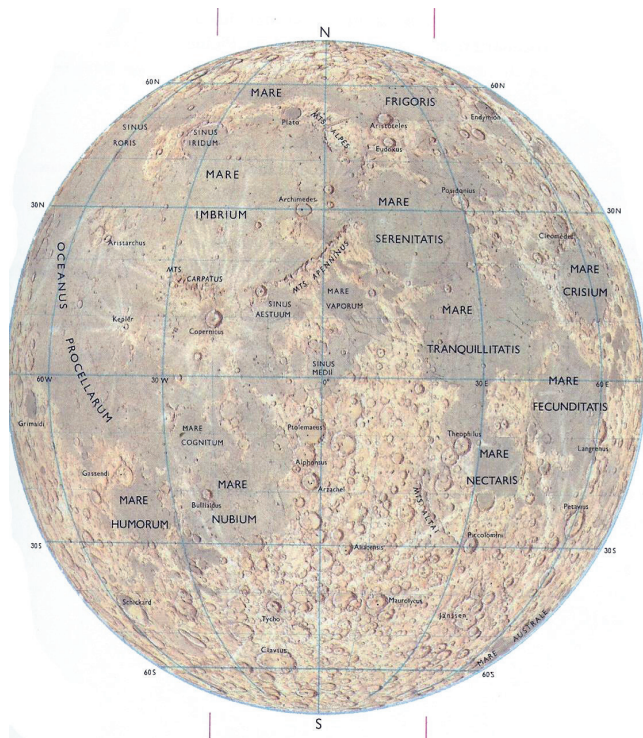


Fig. 13: Carte simplifiée de la Lune.

nom et toutes les décorations que vous pouvez penser, afin de personnaliser la valise.

Conclusions

Il est important pour les jeunes astronomes d'observer comment le ciel se déplace pendant la nuit et pendant la journée. Avec ce type de projets, les étudiants pourront:

- Avoir confiance dans les mesures;
- Assumer la responsabilité de leurs propres instruments;
- Développer leur créativité et leur capacité manuelle;
- Comprendre l'importance de la collecte systématique des données;
- Faciliter la compréhension d'instruments les plus sophistiqués;



Fig. 14: La valise.

- Reconnaître l'importance de l'observation à l'œil nu.

Bibliographie

- Palici di Suni, C., "First Aid Kit, What is necessary for a good astronomer to do an Observation in any moment?", *Proceedings of 9th EAAE International Summer School*, 99, 116, Barcelona, 2005.
- Palici di Suni, C., Ros, R.M., Viñuales, E., Dahringer, F., "Equipo de Astronomía para jóvenes astrónomos", *Proceedings of 10th EAAE International Summer School*, Vol. 2, 54, 68, Barcelona, 2006.
- Ros, R.M., Capell, A., Colom, J., *El planisferio y 40 actividades más*, Antares, Barcelona, 2005.

Spectre solaire et les taches solaires

Alexandre Costa, Beatriz García, Ricardo Moreno

Union Astronomique Internationale, École secondaire de Loulé (Portugal), Université Nationale de Technologie (Mendoza, Argentine), École Retamar (Madrid, Espagne)

Résumé

Cet atelier comprend une approche théorique du spectre de la lumière solaire qui peut être utilisé au secondaire. Les activités sont destinées aux élèves du primaire et du secondaire.

Le Soleil est la principale source de tous les rayonnements de différentes longueurs d'ondes. Cependant, notre atmosphère a une absorption élevée pour plusieurs longueurs d'ondes visibles et invisibles. Nous ne considérerons ici que les expériences liées au spectre visible, qui est la partie présente dans la vie quotidienne des élèves. Pour les activités des longueurs d'ondes invisibles, voir l'atelier correspondant.

Nous allons d'abord présenter l'historique théorique suivi par des démonstrations expérimentales de tous les concepts développés. Ces activités sont des expériences simples que les enseignants peuvent reproduire en classe, en introduisant des sujets tels que la polarisation, l'extinction, le rayonnement du corps noir, le spectre continu, le spectre d'émission, le spectre d'absorption (par exemple la lumière du soleil) et les raies de Fraunhofer.

Nous discutons également des différences entre les zones de production solaire régulière et l'émission de taches solaires. En outre, nous mentionnons la preuve de la rotation solaire et comment ce concept peut être utilisé pour des projets scolaires.

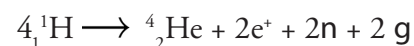
Objectifs

- Comprendre le spectre de la lumière solaire.
- Comprendre les taches solaires.
- Comprendre la signification historique des taches solaires et du travail de Galilée sur la rotation du Soleil.
- Comprendre quelques caractères de la lumière telles que la polarisation, la dispersion, etc.

Radiation solaire

L'énergie solaire est créée à l'intérieur du Soleil dans

une région appelée le noyau où la température atteint 15 millions de degrés et la pression est très élevée. Les conditions de pression et de température dans le cœur permettent habituellement des réactions nucléaires. Lors de la réaction nucléaire principale qui se produit dans le cœur du Soleil, quatre protons (noyaux d'hydrogène) sont transformés en particules alpha (noyaux d'hélium) générant deux positons, deux neutrinos et deux photons gamma selon l'équation:



La masse résultante est inférieure à la somme des masses de quatre protons. La masse perdue s'est transformée en énergie selon l'équation suivante découverte par Einstein:

$$E=mc^2$$

Chaque seconde, 600 millions de tonnes d'hydrogène se sont transformés en hélium, et la masse perdue de 4 à 5 millions de tonnes s'est convertie en énergie. Bien que cette perte semble très importante, la masse du Soleil lui permet de trouver l'énergie nécessaire pour briller pendant 10 milliards d'années. L'énergie produite dans le noyau suivra un long voyage avant d'atteindre la surface du Soleil.

Après avoir été émise par le Soleil, l'énergie se propage dans l'espace à une vitesse de 299,793 km / s sous forme de rayonnement électromagnétique.

Le rayonnement électromagnétique peut avoir des longueurs d'onde ou des fréquences qui sont habituellement regroupées dans différentes régions, comme le montre la figure 1.

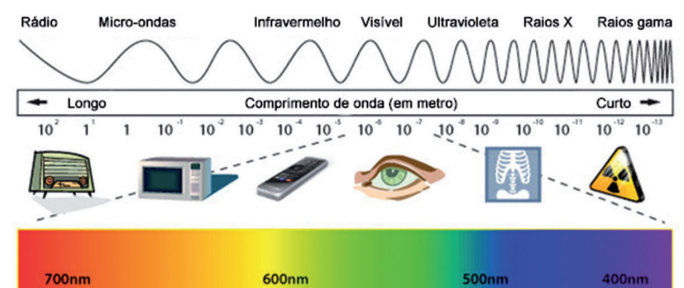


Fig. 1: Le spectre solaire.

La fréquence ν , la longueur d'onde λ et la vitesse de la lumière c sont liées par l'expression

$$c = \lambda \cdot \nu$$

Bien que le Soleil soit une source majeure de nombreuses longueurs d'ondes de la lumière, nous ferons nos recherches sur le rayonnement solaire en utilisant le spectre visible. À l'exception des fréquences radio et des petites bandes dans l'infrarouge ou l'ultraviolet, les longueurs d'ondes de la lumière visible sont celles auxquelles notre atmosphère est transparente (figure 3) et nous n'avons pas besoin de matériel sophistiqué pour les visualiser. Par conséquent, elles sont les meilleures pour l'expérimentation en classe.

Polarisation de la Lumière

Un rayonnement électromagnétique parfait, polarisé linéairement, présente un profil semblable à celui de la figure 2.

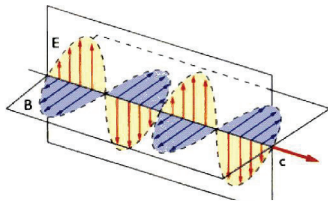


Fig. 2: Lumière polarisée.

La lumière du soleil n'a pas de sens privilégié de vibration, mais peut être polarisée lorsqu'elle est réfléchie sous un angle déterminé, ou si elle passe à travers certains filtres appelés polariseurs.

La lumière passant par l'un de ces filtres (figure 3) ne vibre que dans un seul plan. Si vous ajoutez un second filtre, deux cas peuvent se présenter: lorsque les deux filtres ont une orientation de polarisation parallèle, la lumière passe à travers les deux (figure 4a), mais lorsqu'ils ont une polarisation perpendiculaire, la lumière passant par le premier filtre est bloquée par le second (Figure 3) et les filtres de

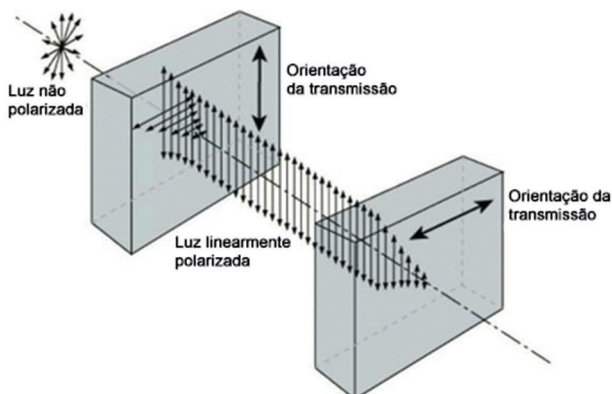


Fig. 3: Lorsque deux filtres ont des orientations de transmission perpendiculaires, la lumière qui traverse la première est bloquée par le second.

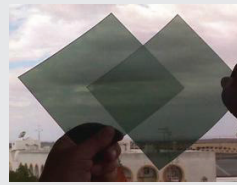


Fig. 4a: Si les filtres ont la même orientation, la lumière passe.

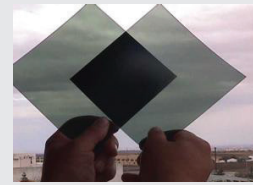


Fig. 4b: Si l'un des filtres est tourné à 90°, la lumière est bloquée.

viennent opaques (figure 4b).

Beaucoup de lunettes de soleil sont polarisées pour filtrer la lumière réfléchie, abondante dans la neige ou sur la mer, qui est habituellement polarisée (figures 5a et 5b). Les filtres polarisants sont également utilisés dans la photographie, et avec eux les reflets sont élimi-



Fig. 5a y 5b: Lumière réfléchie, photographiée avec et sans filtre polarisant.

nés et le ciel paraît plus sombre.

Activité 1: Polarisation de la Lumière

Pour fabriquer des filtres polarisants, coupez le pont du nez de lunettes 3D incolores pour créer deux pièces (des verres verts / rouges ne peuvent pas être utilisés dans cette activité). Vous pouvez alors faire l'activité des figures 4a et 4b. Et pour éviter de les casser en deux morceaux, vous pouvez prendre deux paires de lunettes de soleil ou des lunettes 3D et les orienter pour montrer la polarisation.

Beaucoup de lunettes de soleil sont des polarisateurs pour filtrer la lumière. Les écrans d'ordinateurs LCD et les téléviseurs (non plasma) émettent une lumière qui est polarisée. Vous pouvez vérifier les deux en regardant l'écran d'un ordinateur portable avec des lunettes de soleil ensuite tournez la tête: si elles sont polarisées, la visualisation à un angle spécifique rendra l'écran noir.

Il y a des plastiques et des verres qui affecteront la lumière polarisée qui passe à travers, selon leur épaisseur et leur composition. Si vous les regardez avec des lunettes de soleil polarisées, vous verrez une lumière de

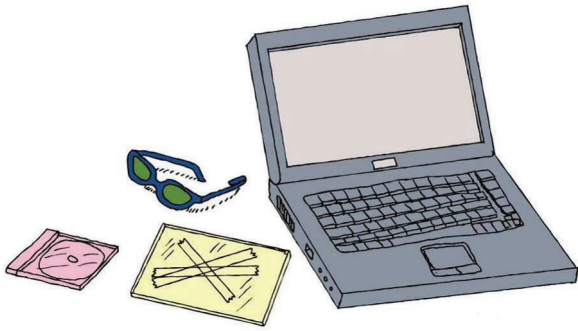


Fig. 6: La lumière de l'écran TFT d'un ordinateur est polarisée, et le ruban adhésif fait tourner l'angle de polarisation. Des couleurs apparaissent lorsqu'on regarde l'écran à travers le ruban adhésif et avec

une lumière de couleur différente.

Collez plusieurs bandes de ruban adhésif sur un morceau de verre (par exemple à partir d'un cadre photo) de sorte que dans certaines zones trois couches de ruban se chevauchent, dans d'autres zones deux morceaux se chevauchent et dans d'autres zones, il n'y a qu'une seule pièce (figure 6). Sur un téléviseur ou un ordinateur avec écran LCD, affichez une image qui a le blanc comme couleur principale, par exemple, un document vierge dans un traitement de texte. Placez le verre devant l'écran et regardez avec des lunettes de soleil polarisées. Si vous tournez le verre, vous verrez la bande qui apparaît avec différentes couleurs. Au lieu de verre, vous pouvez utiliser un étui en plastique transparent CD. Vous verrez les points où plus de tension concentrée dans le plastique. Si vous pliez le plastique, vous verrez des changements de couleur dans le plastique lorsque vous regardez avec la lumière polarisée et les filtres.

La structure du soleil

Le Soleil a une structure qui peut être divisée en cinq parties principales:

- 1) Le noyau et la zone radiative sont les zones où se produisent les réactions de fusion thermonucléaire. La température à l'intérieur du cœur est de 15 millions de Kelvin (K) qui est de « seulement » d'environ 8 000 000 K dans la zone radiative. L'énergie est transférée par rayonnement à travers la région la plus proche du noyau. La zone centrale et la zone radiative peuvent être considérées comme deux régions distinctes, mais il est très difficile de les limiter parce que leurs fonctions sont mélangées.
- 2) La zone de convection a une température inférieure à 500 000 K. Dans cette zone, l'énergie est transportée par convection. Elle se trouve entre 0,3 rayon solaire et la partie juste en dessous de la photosphère.
- 3) La photosphère, que nous pouvons considérer en quelque sorte comme la «surface» du Soleil, est la sou-

source de l'absorption et du spectre continu. Elle a une température comprise entre 6400 à 4200 K. Elle a quelques zones plus froides ("seulement" 4 200 K), qui ressemblent à des taches sombres.

4) La chromosphère, située à l'extérieur de la photosphère, a une température comprise entre 4 200 et 1 million de degré Kelvin. Elle ressemble à des filaments verticaux ressemblant à une «prairie en feu», avec des protubérances et des éruptions.

5) La couronne, qui est la source du vent solaire, a une température comprise entre un et deux millions de degré Kelvin.

Activité 2: Modèle simple des couches solaires

Cette activité peut se faire avec de jeunes enfants. Le but est de découper les différentes figures ci-dessous (figures 7 et 8). Elles peuvent être colorées

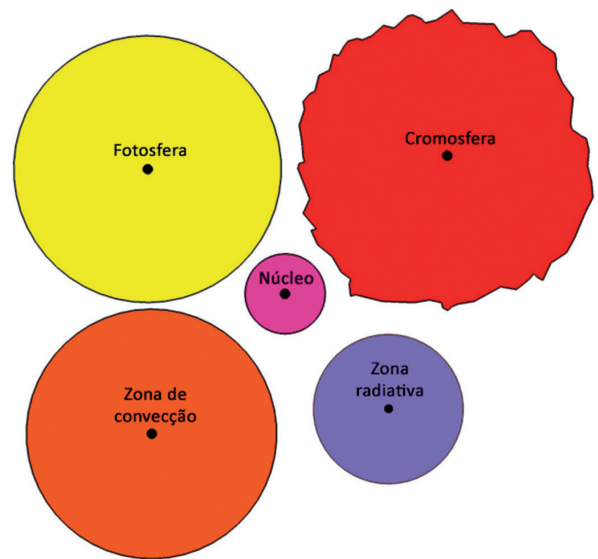


Fig 7: Les couches du Soleil à découper.

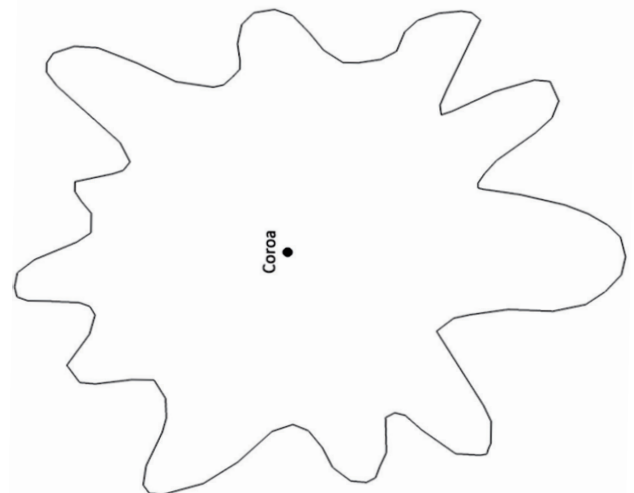


Fig 8: Couronne à découper.

avec les couleurs suivantes: couronne en blanc, chromosphère en rouge, photosphère en jaune, zone de convection en orange, zone radiative en bleu et noyau en marron.

Enfin, vous pouvez coller l'un au-dessus de l'autre, dans le bon ordre (la taille de chaque pièce indique également l'ordre).

Taches solaires

Souvent, les taches foncées, appelées taches solaires, sont observées dans la photosphère. Une tache solaire se compose généralement d'une région centrale sombre appelée l'ombre, entourée par

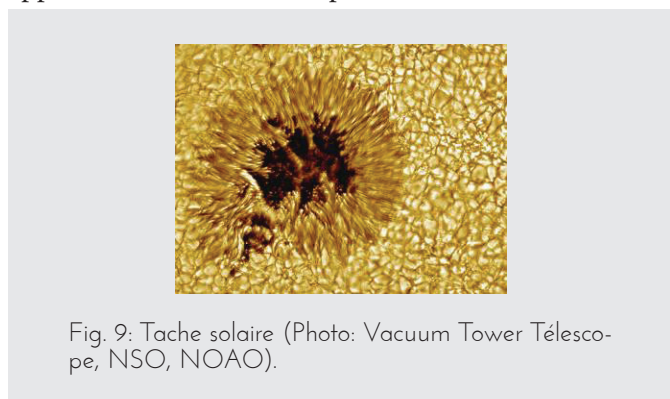


Fig. 9: Tache solaire (Photo: Vacuum Tower Telescope, NSO, NOAO).

une zone de filaments brillants et foncés qui rayonnent à partir de l'ombre. Les filaments des taches solaires sont entourés par les granules typiques de la photosphère (figure 9).

Les taches apparaissent noires avec un petit télescope, mais ce n'est qu'un effet de contraste. Si vous pouviez observer la tache isolée, elle serait effectivement plus lumineuse que la pleine lune. La différence d'intensité des taches est due au fait que la température de la tâche est de 500 à 2000 °C inférieure à celle de la photosphère environnante. Les taches solaires sont le résultat de l'interaction de forts champs magnétiques verticaux avec la photosphère.

Les taches solaires ont une grande importance historique car elles ont permis à Galileo Galilée de déterminer la période de rotation du Soleil et de vérifier que sa rotation était différentielle, c'est-à-dire que le Soleil tourne plus rapidement à l'équateur (période de rotation 25,05 jours) qu'aux pôles (34,3 jours de rotation).

Activité 3: Détermination de la période de rotation du Soleil

Une simple expérience que vous pouvez effectuer dans la salle de classe est de mesurer la période de rotation solaire en utilisant les taches solaires. Dans cette expérience, vous devez suivre une trace des taches solaires



Fig. 10a: Observation solaire par projection avec un télescope.

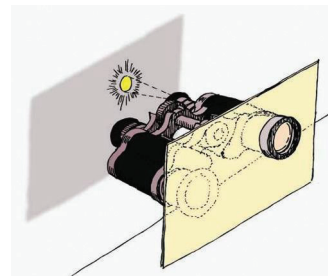


Fig. 10b: Observation par projection avec des jumelles).

pendant plusieurs jours afin de mesurer la rotation du Soleil. Les observations solaires doivent toujours être effectuées par projection à l'aide d'un télescope (figure 10a) ou de jumelles (figure 10b). Il ne faut jamais re

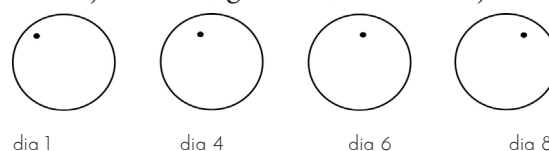


Fig. 11: Changement de position d'une tache solaire sur plusieurs jours.

garder directement le Soleil et encore moins avec des jumelles ou des télescopes, car ça peut causer des dommages permanents (définitifs) aux yeux.

Rappelez-vous que vous ne devriez jamais regarder directement le soleil à l'œil nu, avec des jumelles ou avec des télescopes car cela peut causer des dommages irréparables aux yeux.

Si vous observez des taches solaires pendant plusieurs jours, le mouvement d'une tache ressemblera à l'exemple de la figure 11.

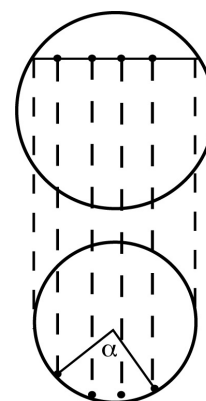


Fig. 12 : Détermination de la rotation angulaire des taches solaires

Superposez les observations sur un papier transparent comme le montre la figure 12. La période peut ensuite être calculée simplement par une simple proportion:

$$\frac{T}{t} = \frac{360^\circ}{a}$$

Lorsque t indique l'intervalle de temps entre deux observations d'une même tache solaire, a est l'angle cen-

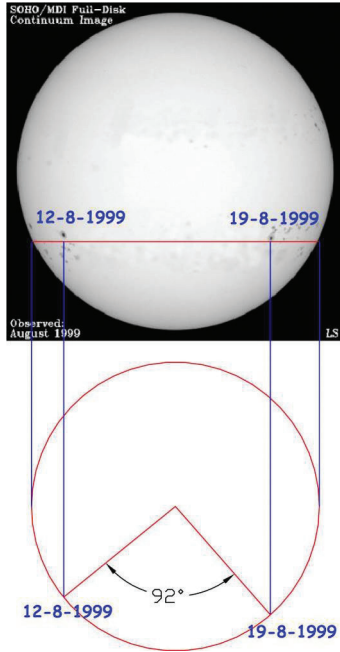


Fig. 13: Détermination de la période de la rotation solaire.

tral entre le déplacement des deux points considérés (figure 12) et P est la période de rotation solaire que nous voulons calculer. Ce calcul donne un bon niveau d'exactitude.

Voici un exemple concret: la figure 13 est une superposition de deux photographies, prises le 12 août 1999 et le 19 du même mois et de la même année. Nous dessinons le cercle pour le Soleil et marquons une ligne du centre vers chacune des taches. Nous mesurons alors l'angle entre les deux lignes et nous obtenons 92°. Par conséquent, la rotation solaire sera:

$$T = \frac{360^\circ \cdot 7 \text{ jours}}{92^\circ} = 27,3 \text{ jours}$$

Les radiations provenant du soleil

Le Soleil est un grand réacteur nucléaire. En son centre, d'énormes quantités d'énergie sont produites en continu et transportées à la surface sous forme de photons. Les photons sont les particules responsables du rayonnement électromagnétique et possèdent une quantité d'énergie qui est calculée par l'expression suivante

$$E = h \cdot n$$

Où E est l'énergie du photon, h est la constante de

Planck (h) et n est la fréquence du rayonnement électromagnétique associée au photon. Les photons générés par le Soleil sont responsables de son spectre.

La luminosité totale (ou la puissance) du Soleil est énorme: chaque seconde, elle émet plus d'énergie que des milliards de bombes atomiques. Nous pouvons imaginer la transmission de cette énergie travers l'espace comme une bulle qui devient de plus en plus grande avec la distance. La zone de cette bulle est $4\pi R^2$. Si la

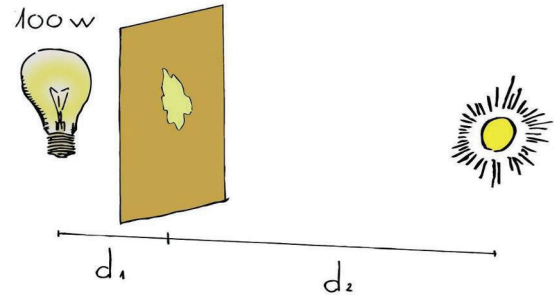


Fig. 14: Comparaison entre la puissance du Soleil et une ampoule de 100W.

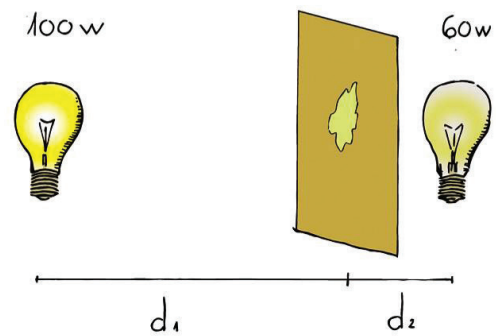


Fig. 15: Si la lumière qui atteint chaque côté est la même, la marée noire n'est pas visible.

puissance du soleil est P, l'énergie atteignant un mètre carré à une distance R est:

$$E = \frac{P}{4\pi R^2}$$

En d'autres termes, l'énergie est transmise comme un carré inverse de la distance. Et si nous connaissons la distance de l'objet, nous pouvons calculer sa puissance totale.

Activité 4: Détermination de la luminosité solaire

La luminosité, ou la puissance du soleil est l'énergie qu'elle émet dans une seconde. Le soleil est vraiment une source lumineuse très puissante. Calculons sa puissance par rapport à une ampoule de 100 W (figure 14).

Nous pouvons construire un photomètre qui nous permettra de comparer la luminosité de deux sources lumineuses. Pour ce, mettre quelques gouttes d'huile au milieu d'une feuille de papier d'emballage (papier



Fig. 16 Photomètre de marée noire, entre deux ampoules.

blanc ordinaire fait l'affaire aussi). La tache qui se forme rend le papier un peu transparent et ce sera notre photomètre. On la place entre deux sources de lumière (figures 14 à 16) et la distance peut être ajustée jusqu'à ce que nous ne puissions pas voir la tâche. Alignée de cette façon, l'éclairage de part et d'autre du papier est le même et les énergies de part et d'autre se valent.

Dans ce cas:

$$\frac{100}{4 \cdot \pi \cdot d_1^2} = \frac{60}{4 \cdot \pi \cdot d_2^2}$$

Lors d'une journée ensoleillée, prenez le photomètre à l'extérieur avec une ampoule d'au moins 100 W (de préférence plus lumineuse). Placez le photomètre entre le soleil et l'ampoule à une distance telle que les deux côtés de part et d'autre du photomètre apparaissent également éclairés. Mesurez la distance d_1 , en mètres, du photomètre au filament de l'ampoule.

SSachant que la distance entre le Soleil et la Terre est approximativement $d_2 = 150\,000\,000$ km, on peut calculer la puissance du Soleil P avec la loi du carré inverse (le terme 4π se simplifie):

$$\frac{100 \text{ W}}{d_1^2} = \frac{P_{\text{Sol}}}{d_2^2}$$

Le résultat devrait être proche de la luminosité réelle du Soleil, qui est de $3,83 \times 10^{26}$ W.

Opacité

L'énergie associée à un photon produit dans le noyau du Soleil prendra jusqu'à 1 million d'années pour at-

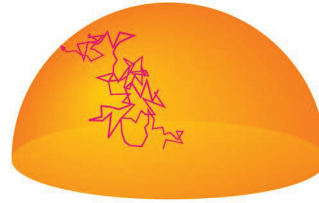


Fig. 17: Les photons prennent 1 million d'années pour quitter la photosphère.

Opacité

atteindre la photosphère, car elle est produite dans les parties les plus intimes du Soleil où les photons interagissent avec la matière très dense. Les interactions entre les photons et la matière se produisent en grand nombre dans le noyau mais diminuent à fur et à mesure qu'on s'éloigne de la photosphère. Les photons prennent un chemin en zigzag (figure 17) du noyau vers les parties extérieures du Soleil, cela peut prendre des milliers d'années.

Lorsque le rayonnement atteint la photosphère (l'atmosphère du soleil), il est rayonné vers l'extérieur sans aucune interaction. La plupart des longueurs d'ondes, en provenance de la photosphère, constituent le spectre continu. L'intérieur du soleil est opaque à toutes les longueurs d'ondes du rayonnement. En astronomie, les concepts d'opacité et de transparence sont peu différents de l'usage quotidien.

Un gaz peut être transparent ou opaque selon la façon dont il absorbe ou diffuse les photons qui le traversent. Par exemple, notre atmosphère est transparente aux longueurs d'onde visibles. Cependant, si le ciel est nuageux, ça devient sombre, donc il est opaque. Il convient de souligner que la transparence ne signifie pas invisible. Une flamme d'un brûleur ou d'une bougie est transparente aux longueurs d'onde d'un rétroprojecteur.

Activité 5: Transparence et opacité

Vous pouvez montrer ces concepts en utilisant un bec

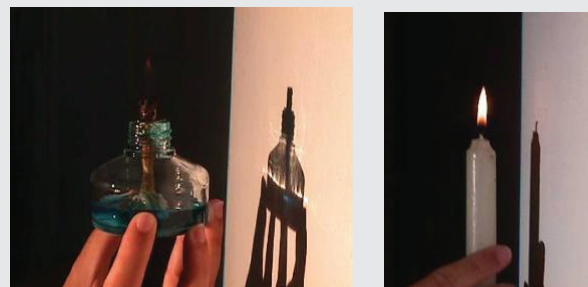


Fig. 18a e 18b: Les lampes à alcool ou les flammes de bougies ne produisent pas d'ombre sur le mur. Observez que le verre n'est pas complètement transparent.

Bunsen ou une bougie (le bec Bunsen est meilleur que la bougie car cette dernière produira parfois la fumée noire opaque due à la combustion incomplète).

La démonstration est très simple : Placez des objets transparents et opaques devant la lumière projetée sur un mur ou un écran par un rétroprojecteur et demandez-lui s'il est transparent ou opaque. Pour les objets communs, la plupart des gens connaissent la réponse.

La flamme d'une bougie, d'un bec Bunsen ou d'un briquet est également transparente et il est surprenant pour les élèves de voir que la flamme ne produit aucune ombre sur le mur (figure 11). Vous pouvez expliquer que c'est comme la photosphère du Soleil, qui est presque transparente à tout rayonnement.

Spectre

En 1701, Newton a utilisé un prisme pour la première fois pour décomposer la lumière du soleil en plusieurs couleurs. Toute lumière peut être dispersée avec un prisme ou un réseau de diffraction, et donne un spectre. Spectre s'explique par les trois lois que Gustav

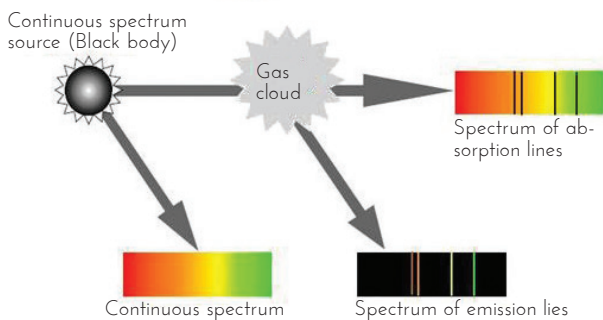


Fig. 19: Les lois de Kirchhoff et de Bunsen.

Kirchhoff et Robert Bunsen ont découvertes au XIXe siècle. Les trois lois sont illustrées à la figure 19.

- 1. Un gaz à pression élevée, un liquide ou un solide, s'ils sont chauffés, émettent un rayonnement continu qui contient toutes les couleurs.
- 2. Un gaz chaud, à basse pression, émet un rayonnement uniquement pour certaines couleurs bien spécifiques : le spectre de ce gaz présente des raies d'émission.
- 3. Un gaz froid, à basse pression, éclairé par une source de rayonnement continu, absorbe certaines couleurs, produisant ainsi dans le spectre des raies d'absorption. Ce gaz absorbe les mêmes couleurs qu'il émettrait s'il était chaud.

Les raies d'émission de gaz sont dues à des transitions d'électrons entre deux niveaux d'énergie, qui se produisent lors de l'interaction des photons avec la matière.

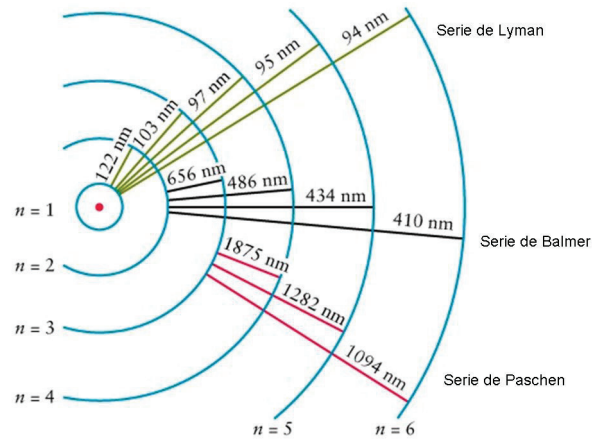


Fig. 20: Série spectrale pour l'émission de l'atome d'hydrogène. Les transitions possibles ont toujours la même quantité d'énergie entre les niveaux .

Les niveaux d'énergie dans les atomes sont parfaitement quantifiés et les fréquences émises sont toujours les mêmes, car la différence d'énergie entre les niveaux est constante. Ceci a été expliqué plus tard par Niels Bohr. (Figure 20).

Un gaz froid peut absorber la même énergie qu'il émet lorsqu'il est chaud. Par conséquent, si vous mettez le gaz entre une source incandescente et un spectroscope, le gaz absorbe les mêmes raies du spectre continu de la source qu'il émet s'il est chaud, générant ainsi un spectre d'absorption.

La même chose se passe dans l'atmosphère du Soleil. Les éléments chimiques contenus dans le gaz de l'atmosphère solaire absorbent les fréquences associées aux raies spectrales de ces éléments. Ce fait a été vérifié

Let-tre	Longueur d'onde (nm)	Origine chimique	Gamme de couleurs
A	7593,7	O2 atmospheric	dark red
B	6867,2	O2 atmospheric	red
C	6562,8	Hydrogen alpha	red
D1	5895,9	Neutral Sodium	oranged-red
D2	5890,0	Neutral Sodium	yellow
E	5269,6	Neutra Iron	green
F	4861,3	H beta	cyan
G	4314,2	CH molecular	blue
H	3968,5	Ionized Calcium	dark violet
K	3933,7	Ionized Calcium	dark violet

Table 1: Les raies spectrales du soleil de Fraunhofer

par Joseph Fraunhofer en 1814, ainsi les raies spectrales du soleil sont appelées les raies de Fraunhofer et sont énumérées dans le tableau ci-dessous, selon les désignations originales par Fraunhofer (1817) des lettres aux raies d'absorption dans le spectre solaire.

Il est important de réaliser qu'en analysant la lumière provenant du soleil ou d'une étoile, nous pouvons savoir ses constituants sans avoir y aller. Aujourd'hui, les spectres sont enregistrés avec des instruments de haute résolution pour détecter de nombreuses raies.

Rayonnement des corps noirs

Quand un métal est suffisamment chauffé, il devient rouge. Dans un endroit sombre, le métal devient visible à une température de 400 ° C. Si la température continue à monter, la couleur du métal devient orange, jaune et devient même bleue après avoir traversé l'émission de lumière blanche à environ 10 000 ° C. Un corps opaque métallique ou non, rayonnera avec ces caractéristiques.

Quand un corps noir (un objet qui ne réfléchit pas la lumière) est chauffé, il émet un rayonnement dans de nombreuses longueurs d'onde. Si l'on mesure l'intensité de ce rayonnement à chaque longueur d'onde, on peut la représenter par une courbe appelée courbe de Planck. Sur la figure 21, les courbes sont indiquées pour une variété de températures de corps noirs. La courbe a un pic à une certaine longueur d'onde, ce qui nous donne la couleur dominante de l'objet. Alors λ_{max} est lié à la température du corps selon la loi de Wien:

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T} \text{ (m)}$$

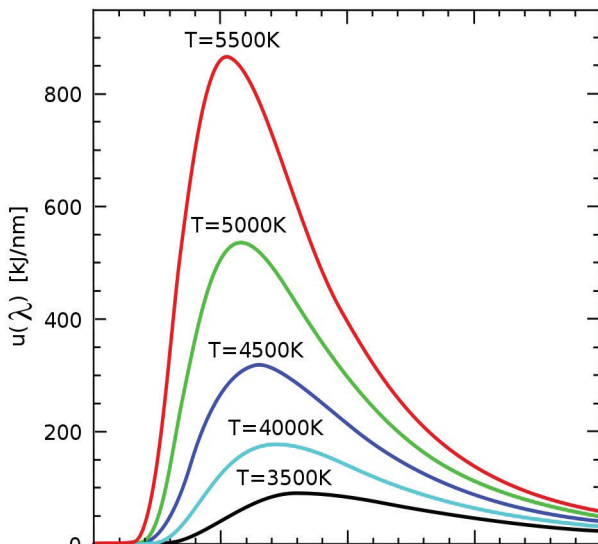


Fig. 21: Les courbes de Planck pour les corps noirs à différentes températures.

T étant la température du corps. Notez qu'en raison de cette loi, en étudiant le rayonnement qui nous vient d'un objet éloigné, nous pouvons connaître sa température sans avoir besoin d'y aller et de la mesurer directement.

Des exemples d'objets astronomiques qui peuvent être appelés corps noirs opaques sont les étoiles (à

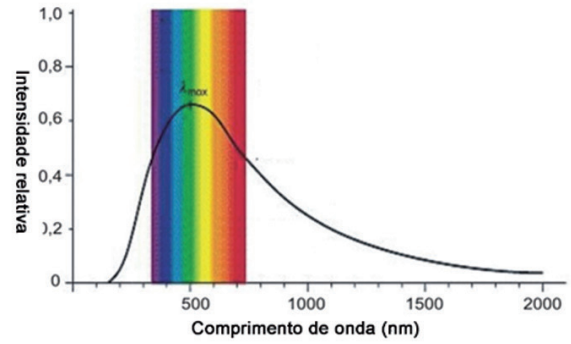


Fig. 22: Courbe d'émission pour le "spectre continu" du Soleil.

l'exception de leurs atmosphères et couronnes), les planètes, les astéroïdes ou le rayonnement du fond micro-ondes cosmiques.

La loi de Wien est une loi générale pour l'émission thermique des corps opaques. Par exemple, le corps humain rayonne dans la région infrarouge avec une émission maximale à une longueur d'onde de 9,4 μm, selon la loi de Wien (utiliser une température de 37 ° C (310 K)). Les militaires utilisent donc des dispositifs d'observation nocturne dans ces longueurs d'ondes.

En revenant au Soleil, puisque l'atmosphère est transparente, le rayonnement du corps noir est déterminé par la température à la photosphère, où le soleil devient transparent (environ 5800 K) de sorte que le rayonnement du corps noir ne doit pas dépasser une longueur d'onde autour de 500 nm, comme le montre la figure 22.

Notre atmosphère absorbe le rayonnement infrarouge et ultraviolet. Mais, l'œil humain ne peut voir que la partie visible de la lumière du soleil qui atteint la surface de la Terre.

Dispersion de la lumière du soleil

Lorsqu'un faisceau de lumière blanche traverse un gaz contenant des particules plus grandes que la longueur d'onde de la lumière, la lumière ne se propage pas et toutes les longueurs d'onde sont dispersées. Cela se produit lorsque la lumière du soleil passe à travers un nuage contenant de petites gouttelettes d'eau d'où il apparaît blanc. La même chose se produit lorsque la lumière passe à travers des grains de sel ou de sucre.

Mais si la lumière est dispersée par des particules de taille similaire à la longueur d'onde (couleur) des photons, ces photons sont dispersés mais pas le reste. C'est ce qu'on appelle la diffusion Rayleigh.

Dans notre atmosphère, la lumière bleue est plus diffusée que la lumière rouge, et les photons nous parviennent de toutes les directions. C'est pour cela que le ciel

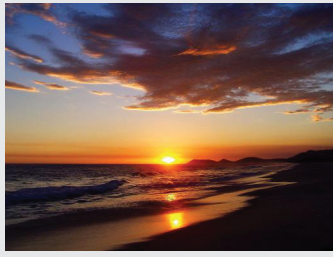


Fig. 23: La couleur du ciel dépend de la diffusion de Rayleigh.

prend la couleur bleue (figure 23) au lieu de noir, comme vu dans l'espace. Au crépuscule, la lumière traverse une atmosphère plus épaisse donc elle s'appauvrit en lumière bleue et le ciel apparaît plus jaune. Au coucher du Soleil les photons rouges sont plus dispersés.

C'est aussi la raison pour laquelle, lorsque la lumière passe par des gaz de particules de grandes épaisseurs (par exemple les nébuleuses), elle devient rouge (car le bleu va se disperser dans toutes les directions et seul le rouge va venir en pleine intensité à l'observateur). C'est la dispersion de Rayleigh.

Activité 6: Extinction et diffusion

Cette expérience est faite avec un rétroprojecteur (ou toute autre source de lumière intense), une solution diluée de lait, un morceau de carton noir et un grand verre. Préparer une solution de lait d'environ 1 goutte de lait dans 50 ml d'eau (c'est la chose très importante, vous devez tester que la concentration de la solution est bonne avant la séance).



Fig. 24 a : Au début, la lumière qui atteint le mur est blanche.

Fig.24b: Avec un peu de solution, la lumière sera jaune.

Fig. 24c: Lorsque le verre est plein, la lumière atteignant le mur est rouge.

Découpez un cercle dans le carton noir avec la forme et la taille du verre. Placez le verre vide sur le cercle ouvert et allumez le projecteur (figure 24a). La lumière qui atteint le mur sera blanche.

Remplir le verre avec la solution de lait diluée. La lumière qui atteint le mur est de plus en plus rouge (figures 24b et 24c). Les côtés du verre montrent une lumière bleue-blanche.

Bibliographies

- Broman, L, Estalella, R, Ros, R.M. *Experimentos en Astronomía*. Editorial Alhambra Longman S.A., Madrid, 1993.
- Costa, A, "Sunlight Spectra", *3rd EAAE Summer School Proceedings*, Ed. Rosa Ros, Briey, 1999.
- Costa, A, "Simple Experiments with the Sun", *6th International Conference on Teaching Astronomy Proceedings*, Ed. Rosa Ros, Vilanova i la Geltrú, Barcelona, 1999.
- Dale, A. O., Carrol, B. W, *Modern Stellar Astrophysics*, Addison-Wesley Publ. Comp., E.U.A, 1996.
- Ferreira, M., Almeida, G, *Introdução à Astronomia e às Observações Astronómicas*, Plátano Ed. Téc., Lisboa, 1996.
- Johnson,P.E., Canterna,R, *Laboratory Experiments For Astronomy*, Saunders College Publishing, Nova Iorque, 1987.
- Lang,K.R, *Sun, Earth & Sky*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1995.
- Levy,D, *Skywatching-The Ultimate Guide to the Universe*, Harper Collins Publishers, London, 1995.
- Moreno, R. *Experimentos para todas las edades*, Editorial Rialp, Madrid, 2008.
- Rybicki,G.B., Lightman, A.P, *Radiative Processes in Astrophysics*,John Wiley & Sons, E.U.A, 1979.
- Sousa, A.S, *Propriedades Físicas do Sol*, Ed. ASTRO, Porto, 2000.
- Zeilik, M., Gregory, S.A., Smith, E.V.P, *Introductory Astronomy and Astrophysics*, 3rd Ed., Saunders College Publishing, Orlando, E.U.A, 1992.

Internet sources

NASA Polar Wind and Geotail Projects
<http://www-istp.gsfc.nasa.gov>

Space & astronomy experiments
<http://www.csiro.au/csiro/channel/pchdr.html>

The Sun
<http://www.astromia.com/solar/sol.htm>

Nine planets
<http://www.astrored.net/nueveplanetas/solarsystem/sol.html>

La vie des étoiles

Alexandre Costa, Beatriz García, Ricardo Moreno, Rosa M Ros

Union Astronomique Internationale, École secondaire de Loulé (Portugal), Université Nationale de Technologie (Mendoza, Argentine), École Retamar (Madrid, Espagne), Université Polytechnique de Catalogne (Barcelone, Espagne).

Résumé

Pour comprendre la vie des étoiles, il est nécessaire de comprendre ce qu'elles sont, comment nous pouvons trouver leurs distances, comment elles évoluent et quelles sont les différences entre elles. Grâce à des expériences simples, il est possible d'expliquer aux élèves le travail accompli par les scientifiques pour étudier la composition des étoiles et aussi de construire des modèles simples.

Objectifs

Cet atelier complète le cours NASE sur l'évolution stellaire, il présente des activités variées et des démonstrations centrées sur la compréhension de l'évolution stellaire. Les principaux objectifs sont les suivants:

- Comprendre la différence entre la magnitude apparente et la magnitude absolue.
- Comprendre le diagramme Hertzsprung-Russell en réalisant un diagramme couleur-magnitude.
- Comprendre des concepts tels que supernova, étoile à neutron, pulsar et trou noir.

Activité 1: Le Concept de parallaxe

La parallaxe est un concept qui est utilisé pour calculer les distances en astronomie. Nous réalisons une simple activité qui va nous permettre de comprendre ce qu'est la parallaxe. Tenez-vous à une certaine distance et face à un mur sur lequel il y a des éléments repères : armoire, tables, portes, etc. Tendez votre bras en face de vous et maintenez votre pouce verticalement (figures 1a and 1b).

Tout d'abord fermez votre œil droit, regardez l'exemple avec le doigt au centre de l'image. Sans bouger votre doigt, fermez votre œil droit et ouvrez l'œil gauche. Le doigt s'est déplacé, il ne coïncide plus avec le centre de l'image mais avec le bord du cadre.

Pour cette raison, lorsque l'on observe le ciel à partir de deux villes éloignées, les objets qui sont plus proches, comme la lune, sont décalés par rapport aux étoiles

les d'arrière-plan, qui sont beaucoup plus éloignées. Le décalage est plus important si la distance entre les deux lieux où les observations sont réalisées, est plus grande. Cette distance est appelée la ligne de base.



Fig. 1a: Avec votre bras, regardez la position de votre pouce par rapport à l'objet à l'arrière-plan, d'abord avec l'œil gauche (en fermant le droit) et ensuite, Fig. 1b, regardez avec l'œil droit (Avec l'œil gauche fermé).

Calcul de la distance des étoiles par la parallaxe

La parallaxe est le changement apparent de la position d'un objet, vu de différents endroits. La position d'une étoile proche par rapport aux étoiles d'arrière-plan, qui sont plus loin, semble changer lorsqu'elle est vue à partir de deux endroits différents. Ainsi, nous pouvons déterminer la distance des étoiles proches.



Fig. 2: L'angle de parallaxe p est le changement angulaire qu'on voit lors de l'observation d'une étoile à partir de deux emplacements qui sont séparés par une distance Terre-Soleil.

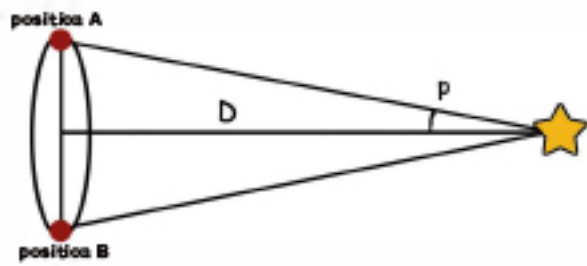


Fig. 3: En mesurant l'angle de parallaxe, p , il est alors possible de calculer la distance D de l'objet.

La parallaxe est appréciable si la distance entre les lieux d'observations c.-à-d. La ligne de base est maximisée. Cette distance correspond au diamètre de l'orbite de la Terre autour du Soleil (figure 2).

Par exemple, si l'on observe une étoile proche par rapport aux étoiles d'arrière-plan à partir de deux positions A et B de l'orbite de la Terre (figure 3), séparés par six mois, nous pouvons calculer la distance D de l'étoile:

$$\tan p = \frac{AB/2}{D}$$

Comme p est un très petit angle, la tangente est équivalente à l'angle mesuré en radians:

$$D = \frac{AB/2}{p}$$

La base du triangle $AB / 2$ est la distance Terre-Soleil, 150 millions de km. Si nous avons l'angle de parallaxe p , alors la distance à l'étoile, en kilomètres, sera $D = 150000000 / p$, avec l'angle p exprimé en radians. Par exemple, si l'angle p est une seconde arc, la distance à l'étoile sera:

$$D = \frac{150000000}{2p/(360 \ 60 \ 60)} = 30939720937064 \text{ km} = 3,26 \text{ a.l.}$$

Ceci est l'unité de distance qui est utilisé dans l'astronomie professionnelle. Si vous observez une étoile avec une parallaxe d'une seconde d'arc, elle est à une distance de 1 parsec (par seconde), ce qui équivaut à $1 \text{ pc} = 3,26$ années-lumière. Une parallaxe plus petite implique une plus grande distance à l'étoile. La relation entre la distance (en pc) et de la parallaxe (en secondes d'arc) est:

$$d = 1/p$$

La simplicité de cette expression est la raison pour laquelle elle est utilisée. Par exemple, l'étoile la plus proche est Proxima de Centaure, a une parallaxe de $0,76''$, ce qui correspond à une distance de $1,31 \text{ pc}$, ce qui équivaut à $4,28 \text{ al}$. La première observation de parallaxe d'une étoile (61 Cygne) a été faite par Bessel en 1838. Bien qu'à l'époque, il a été déjà soupçonné que

les étoiles étaient très éloignées, mais cela ne pouvaient pas être mesurées avec des distances précises.

Actuellement, nous utilisons la parallaxe pour mesurer la distance des étoiles qui sont à moins de 300 années-lumière de nous. Au-delà de cette distance, l'angle de parallaxe est négligeable, donc nous devons utiliser d'autres méthodes pour calculer les distances.

Cependant, ces méthodes sont généralement basées sur des comparaisons avec des étoiles dont la distance est connue par le procédé de parallaxe. La parallaxe fournit une base pour d'autres mesures de distance en astronomie, à l'échelle des distances cosmiques. La parallaxe est essentiellement le barreau du bas de cette échelle de distance.

Activité 2: La loi inverse des carrés

Une expérience simple peut être utilisée pour comprendre la relation entre luminosité, éclat et distance. Elle montrera que la magnitude apparente est fonction de la distance. Comme le montre la figure 11, vous utiliserez une ampoule et une carte (ou une boîte) avec un petit trou carré découpé. La carte avec le trou est placée d'un côté de l'ampoule. L'ampoule rayonne dans toutes les directions. Une certaine quantité de lumière passe à travers le trou et illumine un écran mobile placé parallèlement à la carte avec le trou. Sur l'écran des carrés de la même taille que le trou dans la carte sont dessinés. La quantité totale de lumière traversant le trou et atteignant l'écran ne dépend pas de la distance à laquelle nous mettons l'écran. Cependant, comme nous mettons l'écran plus loin cette même quantité de lumière doit couvrir une plus grande surface, et par conséquent la luminosité de l'écran diminue. Pour simuler une source ponctuelle et réduire les ombres, nous pouvons également utiliser une troisième carte avec un trou très proche de l'ampoule. Cependant, veillez à ne pas laisser cette carte près de l'ampoule pendant trop longtemps, car elle pourrait brûler.

Nous observons que lorsque la distance entre l'écran

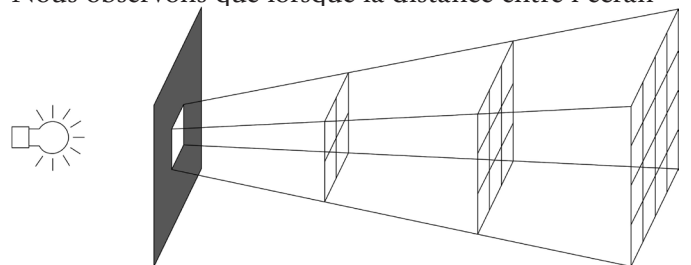


Fig. 4: Montage expérimental

et l'ampoule double, la surface que la lumière illumine devient quatre fois plus grande. Cela implique que l'intensité de la lumière (la lumière arrivant par unité

de surface) devient un quart de la quantité d'origine. Si la distance est triplée, la surface de l'écran sur laquelle la lumière est étalée devient neuf fois plus grande, de sorte que l'intensité lumineuse sera un neuvième de la quantité initiale. Ainsi, on peut dire que l'intensité est inversement proportionnelle au carré de la distance à la source. En d'autres termes, l'intensité est inversement proportionnelle à la surface totale où le rayonnement se répand, qui est une sphère de surface $4\pi D^2$.

Le système des magnitudes

Imaginez qu'une étoile ressemble à une ampoule. La luminosité dépend de la puissance de l'étoile ou de l'ampoule et de la distance à laquelle nous la voyons. Cela peut être vérifié en plaçant une feuille de papier en face d'une lampe: la quantité de lumière qui atteint la feuille de papier dépend de la puissance de l'ampoule et de la distance entre la feuille et l'ampoule. La lumière de l'ampoule est répartie uniformément sur la surface d'une sphère, qui a une surface de $4\pi R^2$, où R est la distance entre les deux objets. Par conséquent, si vous doublez la distance (R) entre la feuille de papier et l'ampoule (figure 5), l'intensité qui atteint le papier n'est pas la moitié, mais le quart (la zone dans laquelle la lumière est distribuée est quatre fois plus grande). Et si la distance est triplée, l'intensité qui atteint le papier est le neuvième (la zone de la sphère sur laquelle la lumière est distribuée est neuf fois plus élevée).

L'éclat d'une étoile peut être définie comme l'intensité (ou flux) d'une énergie atteignant une surface d'un mètre carré située sur Terre (figure 5). Si la luminosité (ou la puissance) de l'étoile est L , alors:

$$B = F = \frac{L}{4\pi D^2}$$

Étant donné que l'éclat dépend de l'intensité et de la distance de l'étoile, on peut comprendre qu'une étoile intrinsèquement faible qui est proche peut être observée avec le même éclat qu'une étoile intrinsèquement plus lumineuse, mais qui est plus éloignée.

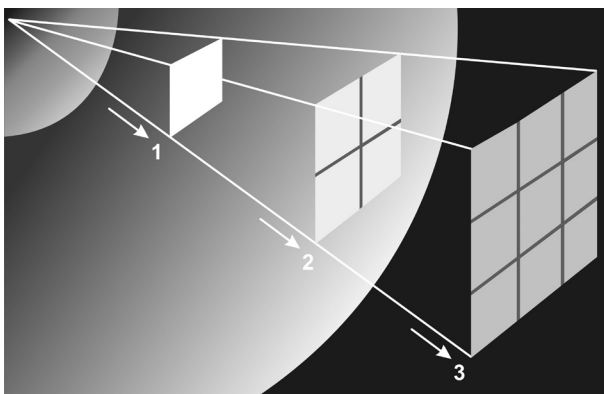


Fig. 5: La lumière devient moins intense, plus elle est loin.

Hipparque de Samos, au deuxième siècle av. J.-C., a fait le premier catalogue d'étoiles. Il a classé les étoiles les plus brillantes comme étoiles de première grandeur, et les étoiles les plus faibles comme étoiles de la 6ème grandeur. Il a inventé un système de division de l'éclat de l'étoile qui est encore utilisé aujourd'hui, bien qu'il soit légèrement redéfini avec des mesures plus précises que ce qui a été fait à l'œil à l'origine. Une étoile de magnitude 2 est plus brillante qu'une étoile avec une magnitude de 3. Il y a des étoiles qui ont une magnitude de 0, et même des étoiles qui ont des magnitudes négatives, comme Sirius, qui a une magnitude de -1,5. En étendant la balance à des objets encore plus brillants, Vénus a une magnitude visuelle de -4, la pleine lune a une magnitude de -13, et le Soleil a une magnitude de -26,8.

Ces valeurs s'appellent des magnitudes apparentes m , puisqu'elles mesurent l'éclat des étoiles vues de la Terre. Cette échelle est telle qu'une étoile de magnitude 1 est 2,51 fois plus brillante qu'une étoile de magnitude 2, et cette étoile est 2,51 fois plus brillante qu'une autre étoile de magnitude 3, etc. Cela signifie qu'une différence de 5 magnitudes entre deux étoiles est équivalent à une étoile de plus petite magnitude et de $2,51^5 = 100$ fois plus brillante. Cette relation mathématique peut être exprimée comme suit:

$$\frac{B_1}{B_2} = (\sqrt[5]{100})^{m_2 - m_1}$$

ou

$$m_2 - m_1 = 2.5 \log \left(\frac{B_1}{B_2} \right)$$

La magnitude apparente m est une mesure liée au flux de lumière d'une étoile dans le télescope. En fait, m est calculé à partir du flux F et d'une constante C (qui dépend des unités d'écoulement et de la bande d'observation) par l'expression:

$$m = -2.5 \log F + C$$

Cette équation nous montre que plus le flux est grand, plus la magnitude d'une étoile sera négative. La magnitude absolue M est définie comme la magnitude apparente m qu'un objet aurait si elle était vue à une distance de 10 parsecs. Pour convertir la magnitude apparente en une magnitude absolue, il faut connaître la distance exacte de l'étoile. Parfois, c'est un problème, car les distances en astronomie sont souvent difficiles à déterminer avec précision. Cependant, si la distance en parsecs d est connue, la magnitude absolue M de

l'étoile peut être calculée en utilisant l'équation:

$$M = m - 5 \log d + 5$$

La couleur des étoiles

On sait que les étoiles ont des couleurs différentes. Au premier coup d'œil, à l'œil nu, on peut distinguer des variations entre les couleurs des étoiles, mais les différences entre les couleurs des étoiles sont encore plus évidentes lorsque les étoiles sont observées avec des jumelles et des photographies. Les étoiles sont classées selon leurs couleurs; ces classifications sont appelées types spectrales, et elles sont étiquetées comme: O, B, A, F, G, K, M. (figure 6).

Selon la loi de Wien (figure 7), une étoile avec une intensité maximale atteint un point culminant en lumière bleue correspondant à une température plus élevée, alors que si l'intensité maximale d'une étoile atteint



Fig. 6: Types spectrales d'étoiles, selon leurs couleurs.

le rouge, elle est plus froide. D'une autre manière, la couleur de l'étoile indique la température de surface de l'étoile.

Activité 3: Les couleurs stellaires

Tout d'abord, vous utiliserez une simple lampe à incandescence avec une résistance variable pour illustrer le rayonnement du corps noir. En plaçant des filtres colorés entre la lampe et le spectroscope, les élèves peuvent examiner la longueur d'onde de la lumière transmise par les filtres. En comparant ceci au spectre de la lampe, les élèves peuvent démontrer que les filtres absorbent certaines longueurs d'ondes. Ensuite, les élèves peuvent utiliser un dispositif similaire à

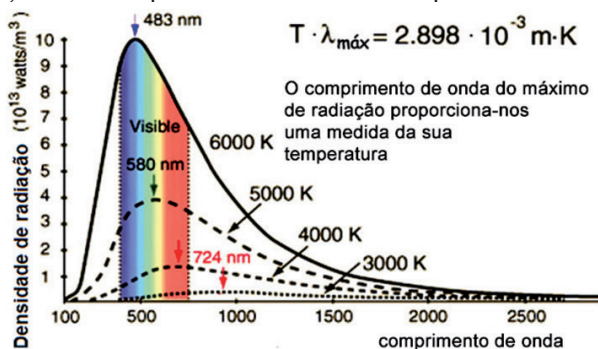


Fig. 7: Si la température augmente, le pic de l'intensité de l'étoile passe du rouge au bleu.

celui de la figure 3, qui a des lumières bleues, rouges et vertes, et qui est équipé de potentiomètres, pour comprendre les couleurs des étoiles. Cet appareil peut être construit en utilisant des lampes, où les tubes des lampes sont fabriqués avec du papier de construction noir et l'ouverture opposée à l'ampoule est recouverte de feuilles de cellophane colorées. En utilisant ce dispositif, nous pouvons analyser (figure 2) et essayer de reproduire l'effet de l'élévation de température stellaire. À des températures basses, l'étoile n'émet que de la lumière rouge en quantités importantes. Si la température augmente, il y aura également des longueurs d'ondes qui traverseront le filtre vert. Comme cette contribution devient plus importante, la couleur de l'étoile passera par l'orange au jaune. À mesure que la température augmente, les longueurs d'ondes qui passent le filtre bleu deviennent importantes et, par conséquent, les couleurs de l'étoile deviennent blanches. Si l'intensité des longueurs d'ondes bleues continue de croître et devient significativement plus grande que les intensités des longueurs d'ondes qui traversent les filtres rouge et vert, l'étoile devient bleue. Pour

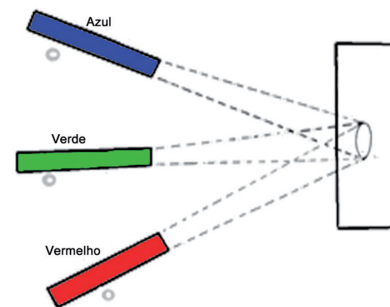


Fig. 8a: Dispositif pour expliquer la couleur de l'étoile.

illustrer cette dernière étape, il est nécessaire de réduire l'intensité des lampes rouge et verte si vous a

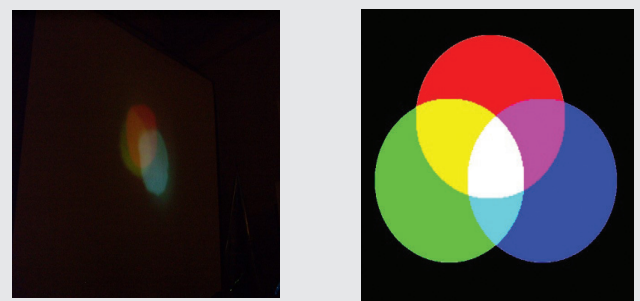


Fig. 8b: Projection pour expliquer la couleur des étoiles et la production de la couleur blanche.

vez utilisé la puissance pour produire du blanc.

Comment savoir que les étoiles évoluent?

Les étoiles peuvent être placées sur un diagramme

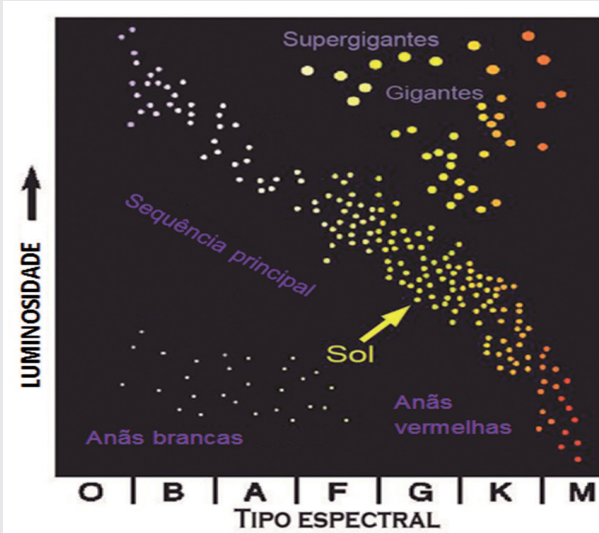


Fig. 9a: Diagramme H-R. Fig. 9b: Le Soleil éjectera son atmosphère extérieure et se transformera en Naine, comme celle qui existe au centre de cette nébuleuse planétaire



Fig. 10 : Image de la boîte à bijoux.

de Hertzsprung-Russell (figure 9a), qui trace une intensité stellaire (luminosité ou grandeur absolue) par rapport à la température ou à la couleur stellaire. Les étoiles froides ont une luminosité faible (en bas à droite de la figure); Les étoiles chaudes sont plus brillantes t

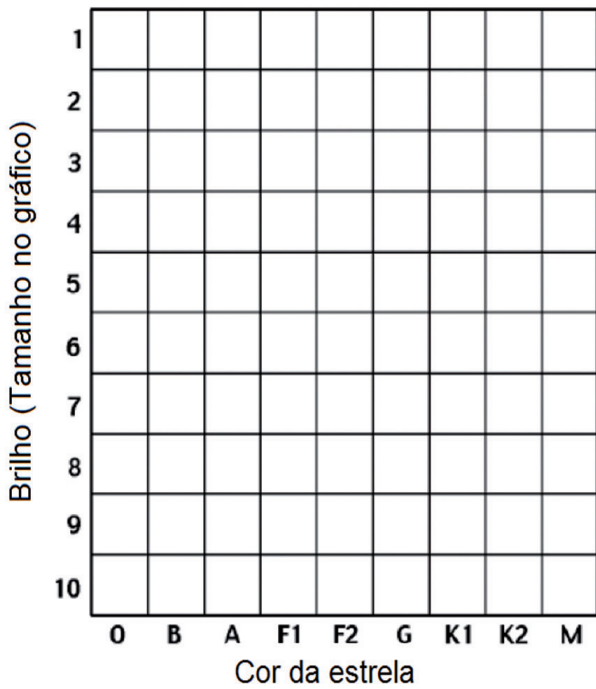


Fig. 11 : Feuille de travail.

et ont une intensité plus élevée (en haut à gauche de la figure). Cette suite d'étoiles qui forme une séquence d'étoiles à partir de la température faible / luminosité faible jusqu'à température élevée / luminosité élevée est connue sous le nom de Séquence principale. Certaines étoiles plus développées ont « bougé » de la séquence principale. Les étoiles qui sont très chaudes, mais qui ont une faible luminosité, sont des naines blanches. Les étoiles qui ont des températures basses mais qui sont très brillantes sont connues sous le nom de super-géantes.

Au fil du temps, une étoile peut évoluer et "bouger" dans le schéma HR. Par exemple, le Soleil (centre), au bout de sa vie, gonflera et deviendra une géante rouge. Le Soleil éjectera alors ses couches extérieures et finira

par devenir une naine blanche, comme dans la figure 9b.

Activité 4: L'âge des amas ouverts

Analyser l'image (figure 10) de l'amas Jewell Box (Boîte à Bijoux) ou Kappa Crucis, dans la constellation de la Croix du Sud. Il est évident que les étoiles ne sont pas toutes de la même couleur. Il est également difficile de décider où se termine le groupe d'étoiles. Sur la figure 10, marquez où vous pensez que le bord de l'amas se trouve.

Dans la même figure 10, indiquez par un "X" l'endroit où vous pensez que se trouve le centre de l'amas d'étoiles, et utilisez une règle pour mesurer et dessiner un carré de 4 cm autour de ce centre. Mesurez la luminosité de l'étoile la plus proche du coin supérieur gauche de votre carré à partir de la comparaison avec le guide dans la marge de la figure 10. Estimez la couleur de l'étoile à l'aide du guide des couleurs de comparaison situé dans la marge de la figure 10. Marquez cette étoile en dessinant un point sur la grille de la figure 11.

Notez que la couleur est en abscisse et la luminosité (taille) est en ordonnée. Après avoir marqué la première étoile, il faut mesurer et marquer la couleur et la luminosité (taille) de toutes les étoiles dans le carré de 4 cm.

Les étoiles de la boîte à bijoux doivent ressembler à un certain motif dans le graphique créé dans la figure 11. Sur l'image de la figure 10, des étoiles apparaissent qui sont devant et derrière l'amas ouvert mais n'en font pas partie. Les astronomes appellent ces étoiles "étoiles de champ". Si vous avez le temps, estimez le nombre d'étoiles de champ qui ont été incluses dans le carré de 4 cm et évaluez leur couleur et leur luminosité. Pour ce

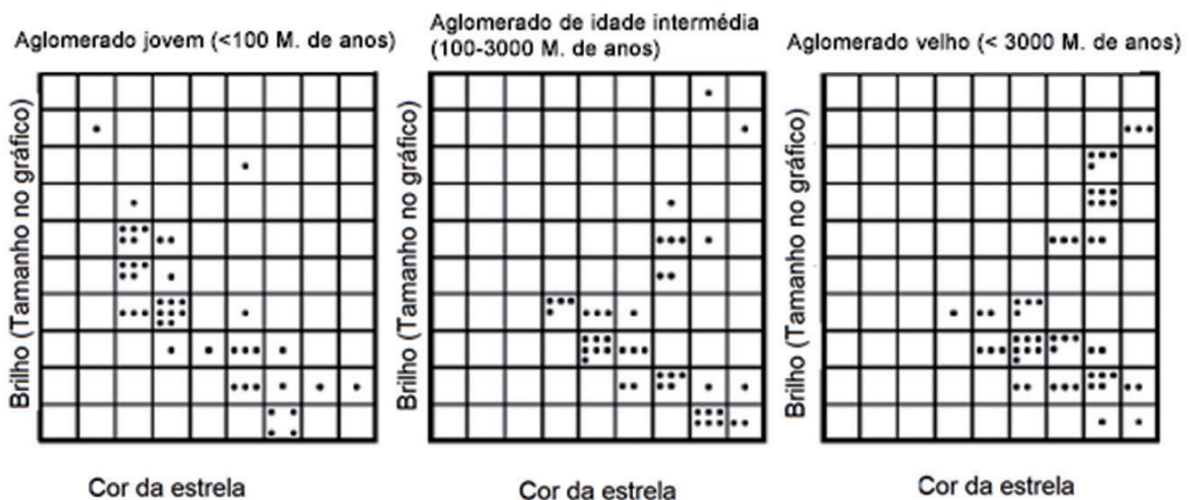


Fig. 12a, 12b et 12c : Diagrammes H-R des grappes de référence.

faire, localisez les étoiles de champ dans le diagramme couleur-grandeur, en les indiquant par un x minuscule au lieu d'un point. Notez que les étoiles des champs sont réparties de manière aléatoire sur le graphique et ne semblent pas former de motif.

La plupart des étoiles sont réparties dans une bande de la carte qui va du coin supérieur gauche au coin inférieur droit. Les étoiles moins massives sont plus froides et sont rouges. Les étoiles les plus massives sont chaudes, bleues et brillantes. Cette "bande" formée par les étoiles est appelée la Séquence Principale. Ces étoiles sont classées (la plus brillante, la plus massive et température la plus élevée : environ 40 000 K) à M (la moins lumineuse, de faible masse et de très faible température : environ 3 500 K).

Pendant la majeure partie de la vie d'une étoile, les mêmes forces internes qui produisent l'énergie de l'étoile l'empêchent également de s'effondrer sur elle-même. Lorsque le combustible de l'étoile s'épuise, cet équilibre s'arrête et les immenses forces d'attraction gravitationnelle de l'étoile provoquent son effondrement et sa mort.

La transition d'une étoile entre la séquence principale et l'effondrement est une partie de son cycle appelée "géante rouge". Les géants rouges sont brillants parce qu'ils ont un diamètre de 10 à plus de 300 fois plus grand que le Soleil. Ils sont considérés comme rouges parce que leur température de surface est basse. Dans le diagramme, elles sont classées comme des étoiles K ou M mais sont très brillantes. Les étoiles les plus

massives épuisent leur carburant très rapidement et sont les premières à abandonner la séquence principale pour devenir des géants rouges. En raison de leur taille énorme, qui peut être plus de 1 000 fois la taille du diamètre du soleil, les géantes rouges des étoiles ayant une masse comprise entre 10 et 50 masses solaires sont appelées "supergéantes rouges" (hypergéantes rouges dans le cas de celles qui proviennent d'une étoile de classe O). Les géantes rouges se dilatent et se refroidissent, devenant lumineuses et rouges et se trouvent donc dans la partie supérieure droite du diagramme. À mesure que l'amas vieillit, un plus grand nombre d'étoiles quitteront la séquence principale pour se transformer en géants rouges. Les astronomes affirment que l'âge de l'amas peut être déterminé par la couleur de l'étoile la plus brillante et la plus massive, qui

De nombreux anciens amas d'étoiles ont évolué de l'état de géantes rouges à celui de naines blanches. Les naines blanches sont très petites, environ de la taille de la Terre. Ils ne sont pas non plus très lumineux et il n'est donc pas possible de les voir sur cette image de boîte à bijoux.

Est-il possible d'estimer l'âge du Jewel Box en agglomérat ouvert (figure 10) en comparant le graphique 11 avec les graphiques des agglomérats d'âges différents, représentés dans les figures 12a, 12b et 12c ?

En connaissant le diagramme H-R et la relation entre la couleur (température de surface), la luminosité des étoiles et l'âge des étoiles, il est possible d'expliquer l'évolution des amas. La vie relative des étoiles O/B

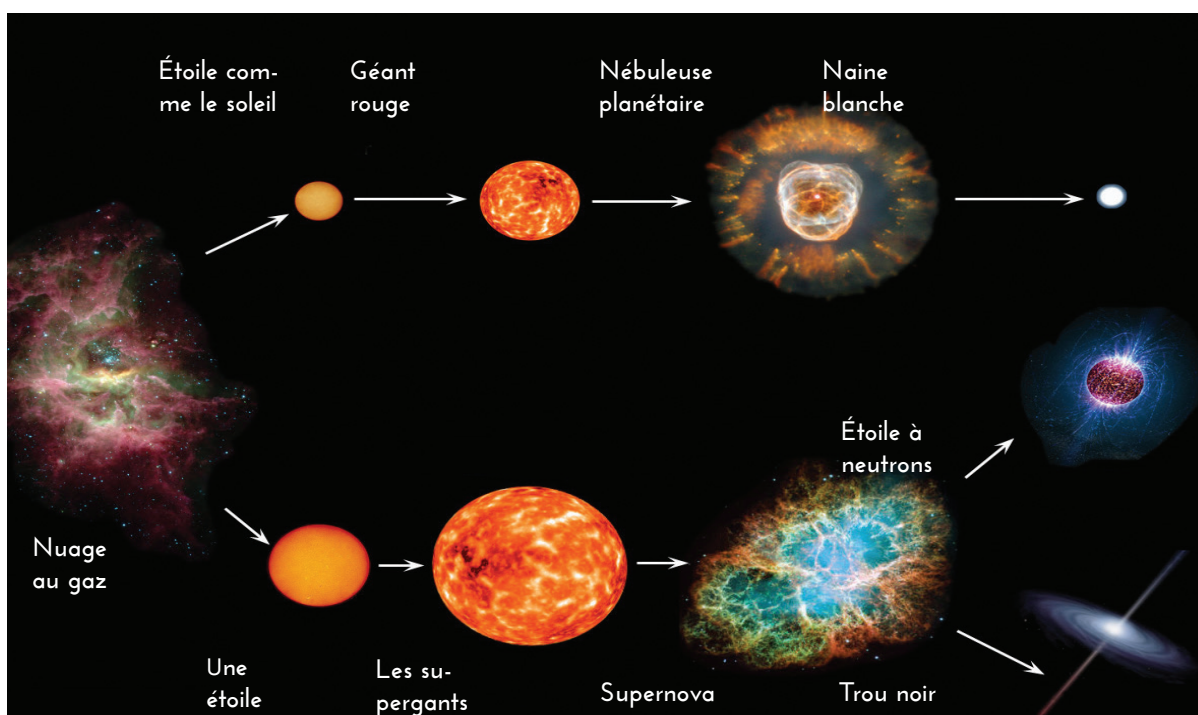


Fig 13 : Evolution des étoiles en fonction de leur mas-



Fig. 14a : Vestiges d'une supernova.

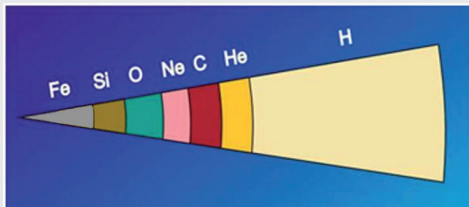


Fig. 14b : Structure en couches de l'intérieur d'une étoile avant qu'elle n'explode comme une supernova.

peut être comparée à celle des étoiles A/F/G et K/M. On peut observer que les étoiles de même masse évoluent de la même manière, même dans des amas différents. De cette façon, il est possible d'observer l'âge des différents groupes en utilisant le diagramme H-R. On peut donc affirmer que la figure 12a est un jeune amas (il y a des étoiles O et B dans la séquence principale et nous savons que ces étoiles évoluent rapidement en supergéantes rouges), et que la figure 12c correspond à un ancien amas (avec des étoiles K et M dans la séquence principale et de nombreuses étoiles géantes rouges).

On pourrait se demander : quelle serait la place du soleil dans le diagramme Hertzsprung-Russell ? Le Soleil est une étoile avec une température de surface de 5 870 K et donc jaune. Il correspond à la classe G2 (en abscisse). Il est dans la séquence principale, dans le qual o l'hydrogène est fondu en hélium en son centre. Cela le place dans la classe de lumière V, avec de nombreuses autres étoiles dans la séquence principale.

La mort des étoiles

La fin d'une étoile dépend de la masse de la nébuleuse initiale, comme on peut le voir sur la figure 13 :

À un certain moment de l'évolution des amas d'étoiles, les étoiles de plus grande masse disparaissent du diagramme de Hertzsprung-Russell. Alors que les moins massives se transformeront en naines blanches, les plus grandes donneront naissance à l'un des phénomènes les plus violents de l'univers : une supernova. Les vestiges de ces phénomènes n'ont pas d'émission thermique (pulsars et trous noirs) et ne sont donc pas visibles dans le diagramme de Hertzsprung-Russell.

Qu'est-ce qu'une supernova ?

C'est la mort d'une étoile très massive. La séquence

principale d'une étoile est caractérisée par la fusion de l'hydrogène pour produire de l'hélium, puis la production de carbone et d'éléments de plus en plus lourds. Le produit final est le fer. La fusion du fer n'est pas possible car cette réaction nécessite de l'énergie, au lieu d'en produire.

La fusion des différents éléments se poursuit jusqu'à l'épuisement des réactifs. Ces fusions se produisent à l'extérieur du noyau, de sorte qu'au bout d'un certain temps, l'étoile acquiert une structure en couches, appelée structure en oignon (figure 14b), avec des éléments plus lourds dans les couches mais proximas do nucléo.

Une étoile de 20 masses solaires a les phases suivantes:

- 10 millions d'années en brûlant de l'hydrogène dans son noyau (séquence principale);
- 1 million d'années à brûler de l'hélium;
- 300 ans de combustion du carbone;
- 200 jours de combustion d'oxygène;
- 2 jours de consommation de silicium : l'explosion de la supernova est imminente



Fig. 15 : On laisse tomber un ballon de basket et une balle de tennis en même temps.

Lorsque l'étoile a enfin un noyau de fer, plus aucune réaction nucléaire n'est possible. Sans la pression de radiation de la fusion pour équilibrer la gravité, l'effondrement de l'étoile est inévitable, sans possibilité d'autres allumages nucléaires. Lors de l'effondrement, les noyaux atomiques et les électrons se regroupent pour former des neutrons et la partie centrale du noyau devient une étoile à neutrons.

Les étoiles à neutrons sont si denses qu'une cuillère à café pèserait autant que tous les bâtiments d'une grande ville. Lorsque les neutrons sont compactés, il n'y a plus de contraction. Les particules tombent des couches extérieures de l'étoile à des vitesses de l'ordre du quart de la vitesse de la lumière, atteignent le noyau et sont soudainement arrêtées. Cela provoque un rebondissement, produisant une onde de choc qui est

l'un des processus les plus énergétiques connus dans l'univers (figure 14a) : une seule étoile qui explose peut briller plus qu'une galaxie entière composée de milliards d'étoiles.

Lors de ce rebondissement, les énergies sont si grandes que certains éléments plus lourds que le fer sont créés (comme le plomb, l'or, l'uranium, etc.). Ces éléments émergent violemment lors de l'explosion et sont éjectés avec toute la matière de l'étoile. No centro do material ejeté reste une étoile à neutrons tournant à grande vitesse ou, si l'étoile était assez massive, un trou noir.

Activité 5: Simulation d'une explosion de supernova

Lorsqu'une étoile explose comme une supernova, les atomes légers des couches extérieures tombent vers les atomes plus lourds de l'intérieur et finissent par se détacher dans le noyau central massif.

Un modèle simplifié pour le rebond des atomes lourds contre le noyau massif, et celui des atomes plus légers qui apparaissent par derrière, tombant des couches superficielles de ce gigantesque oignon (figure 14b), peut être facilement représenté, et de façon assez spectaculaire, avec un ballon de basket et une balle de tennis, les faisant tomber ensemble sur un sol dur (figure 15). Dans ce modèle, le sol représente le noyau solide de l'étoile à neutrons, le ballon de basket serait un atome lourd sortant du noyau et poussant l'atome léger par derrière, représenté par la balle de tennis.

Pour réaliser la maquette, placez le ballon de basket à hauteur des yeux et par-dessus la balle de tennis, aussi verticalement que possible. Lâchez les deux en même temps. Vous pouvez vous attendre à ce que la hauteur de rebond soit égale à la hauteur de départ, ou même inférieure, en raison du frottement et de l'énergie dissipée au sol. Cependant, le résultat est tout à fait différent.

Lorsque vous faites tomber les deux balles, elles atteignent le sol presque en même temps. La grosse balle rebondit élastiquement et revient avec presque la même vitesse qu'à son arrivée. À ce moment, elle entre en collision avec la petite balle de tennis, qui descend à la même vitesse que le ballon de basket monte et la petite sort à grande vitesse, atteignant un altura muito mais plus élevé que celui qui a été abandonné. Si cette expérience est répétée en utilisant un plus grand nombre de balles, ou des balles plus légères, les vitesses de rebond seront fantastiques.

Dans le modèle présenté, la petite boule peut dépasser



Fig. 16 : Un pulsar est une étoile à neutrons en rotation.

deux fois la hauteur de chute initiale des deux. En fait, il faut faire attention à ne rien casser, au cas où vous réaliseriez l'expérience à l'intérieur d'un bâtiment.

Cette expérience peut se dérouler dans une salle ou dans un autre lieu fermé, bien qu'il soit préférable de la faire en plein air. Elle peut se faire depuis une fenêtre haute, mais il est difficile pour les balles de tomber parfaitement à la verticale et elles peuvent rebondir avec une grande force dans des directions imprévisibles.

Dans certains magasins de jouets, ou dans les magasins des musées des sciences, on vend des jouets connus sous le nom d'"Astro Blaster", selon le même principe. Il se compose de quatre petites balles en caoutchouc, de tailles différentes, reliées par un axe. La plus petite balle se déclenche après que le système ait touché le sol.

Qu'est-ce qu'une étoile à neutrons ?

Une étoile à neutrons est ce qui reste d'une étoile très massive qui s'est effondrée et a lancé ses couches dans une explosion de supernova. Les étoiles à neutrons ne sont généralement pas plus grandes que quelques dizaines de kilomètres. Comme leur nom l'indique, ils consistent en un amas de neutrons empilés d'une densité incroyable : un seul dé à coudre de cette matière pèserait des millions de tonnes.

Une étoile à neutrons est formée si la supernova a entre 1,44 et 8 masses solaires.

Qu'est-ce qu'un pulsar ?

Un pulsar est une étoile à neutrons qui tourne à une vitesse extraordinaire (figure 16). Lorsqu'une étoile massive s'effondre, les couches extérieures tombent vers le noyau et vous commencez à tourner grâce à la conservation du moment angulaire. Elle est similaire à l'accélération de la vitesse de rotation d'un patineur



Fig. 17a: Assemblage

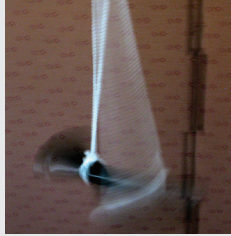


Fig. 17b: Faire tourner la lampe de poche

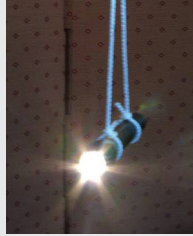


Fig. 17c: Faisceau lumineux périodique

lorsqu'il rassemble ses bras.

Le champ magnétique de l'étoile crée de fortes émissions électromagnétiques vers son axe. Mais comme l'axe du champ magnétique ne coïncide généralement pas avec l'axe de rotation (comme ce qui se passe sur Terre), cette émission tourne comme une gigantesque balise cosmique. Si le jet d'émission est dirigé vers la Terre, nous détectons des pulsations à un rythme très régulier.

En 1967, Bell et Hewish ont découvert le premier pulsar. Le signal d'impulsion est venu d'un point dans l'espace où rien n'a été observé dans la lumière visible. La répétition rapide de l'impulsion a été frappante - plusieurs fois par seconde avec une précision incroyable.

Au début, on pensait que les pulsars pouvaient être des signaux extraterrestres intelligents. Puis, des sources radio plus pulsantes ont été découvertes, y compris le centre de la nébuleuse de crabe. Les scientifiques savaient que cette nébuleuse était produite par une supernova et cela pouvait finalement expliquer l'origine des pulsars. Le pulsar PSR B1937 + 21 est l'un des pulsars les plus rapides connus avec plus de 600 fois par seconde. Il a environ 5 km de diamètre et s'il se mettait à tourner environ 10% plus rapidement, il serait brisé par la force centrifuge. Hewish a remporté le prix Nobel en 1974.

Un autre pulsar très intéressant est un système binaire appelé PSR 1913 + 16 dans la constellation de l'Aigle. Le mouvement orbital mutuel des étoiles dans un champ gravitationnel très intense produit de légers retards dans les émissions que nous recevons. Russell Hulse et Joseph Taylor ont étudié ce système et ont confirmé de nombreuses prédictions de la théorie de la relativité, y compris l'émission des ondes gravitationnelles. Ces deux Américains ont reçu le prix Nobel en 1993 pour leurs recherches.

Activité 6: Simulation d'un pulsar

Un pulsar est une étoile à neutrons qui est très massive et qui tourne rapidement. Elle émet un rayonnement,

mais la source n'est pas complètement alignée avec l'axe de rotation, de sorte que le faisceau de rayonnement émis se déplace comme un phare. Si ce faisceau est orienté vers la Terre, on observe une impulsion de rayonnement plusieurs fois par seconde. On peut simuler un pulsar avec une lampe de poche (figure 17a) attachée avec une corde au plafond. Si nous allumons et tournons la lampe (figure 17b), nous allons voir la lumière de façon intermittente chaque fois que la lampe de poche pointe dans notre direction (figure 17c).

Si vous inclinez la lampe de poche de telle sorte qu'elle ne soit pas horizontale, vous ne pourrez plus voir le fait eau de lumière à partir de la même position. Par conséquent, nous pouvons seulement observer l'émission d'un pulsar que si nous sommes bien alignés avec sa rotation.

Qu'est-ce qu'un trou noir?

Si nous jetons une pierre vers le haut, la gravité la ralentit jusqu'à ce qu'elle revienne au sol. Si nous lançons la pierre avec une vitesse initiale plus élevée, la pierre montera plus haut avant qu'elle ne redescende. Si la vitesse initiale est de 11 km / s, la vitesse d'échappement de la Terre, la pierre ne revient pas (en supposant qu'il n'y ait pas de frottement d'air).

Si la Terre s'effondrait tout en maintenant sa masse, la vitesse d'échappement à sa surface augmenterait parce que nous serions plus proches du centre de la Terre. Si elle s'effondrait à un rayon de 0,8 cm, la vitesse d'échappement deviendrait supérieure à la vitesse de la lumière. Comme rien ne peut dépasser la vitesse de la lumière, rien ne pourrait s'échapper de la surface, pas même la lumière. La Terre deviendra un trou noir de la taille d'un minuscule bout de marbre.

Théoriquement, il est possible que les trous noirs possèdent des masses très petites. En réalité, cependant, il n'existe qu'un seul mécanisme connu capable de concentrer la masse vers les densités nécessaires: l'effondrement gravitationnel. Pour que l'effondrement par la gravité ait lieu, une très grande quantité de masse est nécessaire. Nous avons appris que les étoiles à neutrons sont les restes d'étoiles de masse de 1,44 à environ 8 masses solaires. Cependant, si l'étoile originale est encore plus massive, la gravité est si forte que son intérieur peut continuer à s'effondrer jusqu'à ce qu'il devienne un trou noir

Par conséquent, ce type de trou noir aura une masse plusieurs fois plus grande que notre Soleil. Les densités des trous noirs sont très impressionnantes. Un minuscule morceau de marbre fait de cette matière dense,

pèserait autant que toute la Terre.

Même si nous ne pouvons pas les observer directement, nous connaissons plusieurs candidats pour les trous noirs dans l'univers grâce à l'émission de matériaux tournant à grande vitesse autour du trou noir. Par exemple, juste au centre de notre galaxie, nous ne voyons rien, mais nous pouvons détecter un anneau de gaz tourbillonnant autour du centre à une vitesse incroyable. La seule explication possible est qu'il y a une grande masse invisible au centre de cet anneau, pesant jusqu'à trois ou quatre millions de soleils. Cela ne peut être qu'un trou noir, avec un rayon Schwarzschild légèrement plus grand que notre Soleil. Ces types de trous noirs, situés dans les centres de nombreuses galaxies, s'appellent des trous noirs super massifs.

Activité 7: Simulation de la courbure de l'espace et d'un trou noir

Il est facile de simuler la courbure bidimensionnelle de l'espace créée par un trou noir en utilisant une feuille de fibres élastique appelée Lycra (figure 18) ou une grande pièce de gaze (tissu des pansements).

D'abord, étirer la feuille de fibres ou le treillis (lycra / gaze). Puis, faites rouler une petite balle le long de la feuille. Ceci représente un photon de lumière et sa trajectoire simule le chemin droit d'un rayon lumineux en l'absence de courbure. Cependant, si vous placez une balle lourde au centre de la feuille, puis vous faites rouler la balle plus son chemin suivra une courbe. Ceci simule le chemin d'un rayon lumineux dans un espace incurvé causé par la présence d'une masse gravitationnelle.

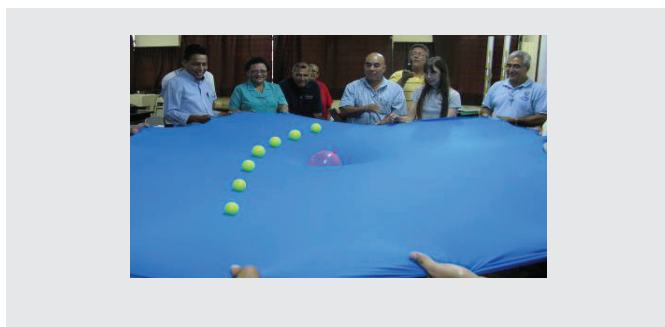


Fig. 18: La trajectoire de la balle de tennis n'est pas une ligne droite mais une courbe.

La courbure du trajet des rayons lumineux dépend de la proximité du faisceau lumineux avec le corps gravitant et de la masse de ce corps. L'angle de déviation est directement proportionnel à la masse et inversement proportionnel à la distance. Si on desserre la tension dans la feuille, cela simule un puits de gravité plus pro

fond, ce qui rend plus difficile pour la petite balle de partir, nous avons alors un modèle de trou noir.

Bibliographie

Broman, L., Estalella, R. Ros. R.M, *Experimentos en Astronomía*, Ed. Alhambra Longman, Madrid, 1993.

Dale, A.O., Carrol, B.W, "Modern Stellar Astrophysics", Addison-Wesley Publ. Comp., EUA, 1996.

Moreno, R, *Experimentos para todas las edades*, Ed. Rialp. Madrid, 2008.

Pasachoff, J.M, *Astronomy: From the Earth to the Universe*, 4th Edition, Saunders College Publishing, EUA, 1995.

Rybicki, G.B., Lightman, A.P, *Radiative Processes in Astrophysics*, John Wiley & Sons, EUA, 1979

Zeilik, M., Gregory, S.A., Smith, E.V.P, *Introductory Astronomy and Astrophysics*, 3rd Ed., Saunders College Publishing, EUA, 1992.

L'astronomie au-delà du visible

Beatriz García, Ricardo Moreno

Union Astronomique Internationale, Université Nationale de Technologie (Mendoza, Argentine), École Retamar (Madrid, Espagne).

Résumé

Les corps célestes émettent un rayonnement dans diverses longueurs d'onde du spectre électromagnétique, essentiellement invisible à l'œil humain, qui perçoit seulement une très petite partie du spectre de rayonnement.

Il existe de nombreuses façons de démontrer l'existence de ces rayonnements, au-delà du spectre visible, des méthodes qui utilisent des expériences simples. Ce matériel est une introduction pour voir au-delà de ce qui est perçu par un télescope, en utilisant des méthodes utilisées dans les écoles primaires et secondaires.

Objectifs

Ces activités sont proposées pour expliquer des phénomènes qui ne peuvent être observés avec un télescope amateur, tels que:

- Corps célestes émettant des énergies électromagnétiques qui ne peuvent être détectées par l'œil humain. Les astronomes sont intéressés par ces rayonnements parce que seul le rayonnement dans le spectre visible n'est pas suffisant pour créer une image de l'Univers aussi proche de la réalité que possible.
- Émissions émises dans les domaines de la radio, de l'infrarouge, des ultraviolets, des micro-ondes et des rayons X

Le spectre électromagnétique

Les ondes électromagnétiques couvrent une grande variété de fréquences d'onde et de longueurs d'onde et peuvent être classées par source de production. Par classification, ils ne sont pas complètement différenciés. La somme de toutes les ondes électromagnétiques est appelée spectre électromagnétique.

La figure 1 montre différentes régions du spectre électromagnétique. Aussi, les distances entre deux maxima d'onde (longueur d'onde λ) et quelques objets en fonction de leur taille sont indiquées: atomes, insectes, montagnes ... afin de faire une comparaison des longueurs d'onde. Dans la même figure, vous pouvez

voir le Soleil et Saturne photographiés dans des longueurs d'onde insaisissables pour l'œil humain. Les photos ont été faites en utilisant des filtres spéciaux sensibles à ces longueurs d'onde.

Dans l'Univers il y a des substances avec des températures beaucoup plus basses que les étoiles, par exemple des nuages interstellaires. Ces nuages n'émettent pas de rayonnement visible, mais peuvent être détectés dans de grandes longueurs d'onde: infrarouge, micro-ondes et ondes radio. En observant l'Univers dans toutes les régions du spectre électromagnétique, des "observations de longueur d'onde", on obtient une image beaucoup plus claire de la structure, de la température et de l'énergie, rendant les modèles cosmologiques plus réalistes.

Dans la figure 2, vous pouvez voir des images du centre de notre galaxie, des images prises par le télescope spatial Spitzer, Hubble (visible), et Chandra (rayons X). Dans chacune des trois images, vous pouvez voir des détails et des objets invisibles dans d'autres longueurs d'onde.

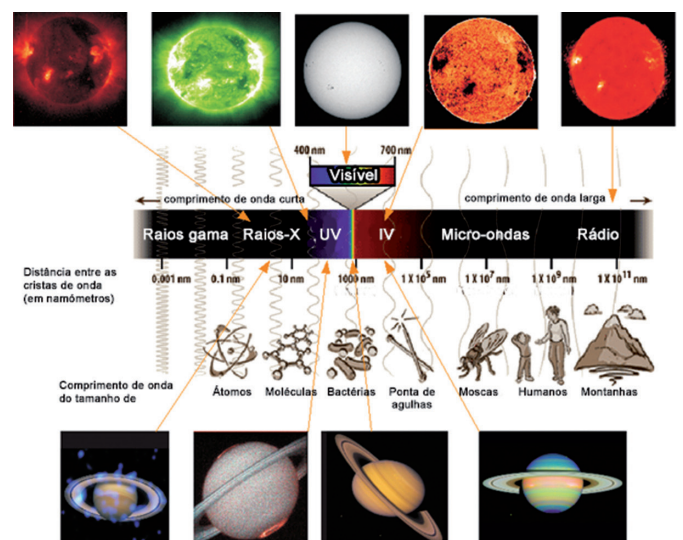


Fig. 1: Spectre électromagnétique, avec des objets de la taille de ces ondes. Le Soleil (ci-dessus) et Saturne (bas) observés à différentes longueurs d'onde (les couleurs sont simulées).

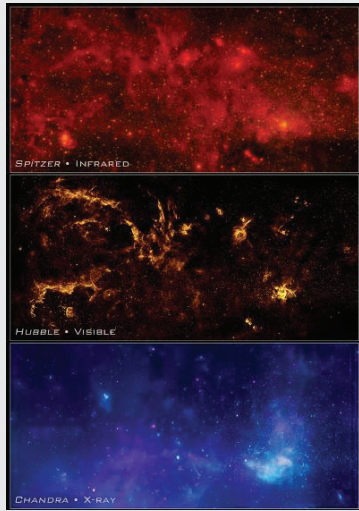


Fig. 2: Le centre de notre galaxie de la voie lactée imagée à différentes longueurs d'onde

Activité 2: Construction d'un spectromètre

La lumière blanche d'une ampoule à filament est composée de toutes les couleurs, tandis que la lumière d'une lampe à gaz n'a que certaines couleurs dans sa composition. En séparant les couleurs dont est composée la lumière, c'est le spectre de la lumière qui, dans le cas des gaz, ne se compose que d'une multitude de lignes colorées. Chaque type de gaz a son spectre représentant le "code à barres" des composants du gaz. En regardant un spectromètre de la lumière d'une galaxie lointaine, les lignes de l'hydrogène et d'autres gaz apparaissent déplacées au rouge.

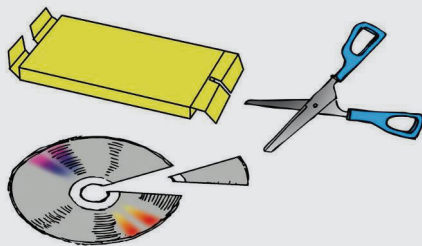


Fig. 3a: Matériel dont vous aurez besoin: DVD, ciseaux et boîte de papier.



Fig. 3b: Retrait de la couche métallique du CD, avec du ruban adhésif.

À l'aide d'une paire de ciseaux, coupez un morceau de CD ou de DVD (figure 10a) qui n'a pas d'étiquette. Si vous utilisez un DVD, séparez la couche supérieure de la partie inférieure du DVD (vous aurez peut-être besoin d'un ciseau) et vous disposerez ainsi du réseau de diffraction. Dans le cas d'un CD, il y a une seule couche de plastique, mais la couche de métal doit être soigneusement retirée (un couteau tranchant ou une lame de rasoir peut être utile).

Copiez les modèles de la figure 11, de préférence au format A3. Couper le contour (y compris les sections blanches et courbes) et faire un trou mince dans la partie graduée. Vous n'avez pas à couper toute la partie graduée. Assemblez la boîte avec le côté noir à l'intérieur, et collez les bords. Dans le trou fourni par la section incurvée, insérez le CD ou le DVD.

Regardez à travers le DVD et redressez la fente sur la boîte à une ampoule ou au néon (figure 4). Vous devriez remarquer les lignes d'émission de gaz dans l'ampoule. Si vous réussissez la première tentative, déplacez la fente lentement d'avant en arrière jusqu'à ce que les lignes apparaissent. L'unité pour l'échelle donnée est le na



Fig. 4: Regard sur une lampe fluorescente

nomètre (5 correspond à 500 nm). Plus la fente est étroite, plus la mesure de la longueur d'onde est précise

La boîte peut également être faite de carton, mais pour l'échelle de mesure, la forme en carton est coupée et l'échelle de papier est collée en place pour voir à travers elle.

En outre, les lumières des rues peuvent être observées (lumière orange-sodium et lumière blanche-mercure). Les plus petits élèves peuvent briser la lumière en obtenant un arc-en-ciel. Utilisez un tuyau d'arrosage avec le soleil à l'arrière (figure 6).

Qu'est-ce que le rayonnement dans l'infrarouge?

L'onde infrarouge du spectre électromagnétique a été découverte par William Herschel (découvreur d'Uranus) en 1800 à l'aide d'un prisme et d'un thermomètre. Herschel a obtenu un spectre de la lumière du Soleil qui a passée à travers un prisme optique et

puis il a utilisé quatre thermomètres: un dans la région bleue du spectre, l'un dans la région rouge du spectre (deux couleurs détectables à l'oeil nu) et le troisième placé sous le rouge. Le quatrième thermomètre pour mesurer la température ambiante. En notant la température enregistrée par le troisième thermomètre (situé à « sous » « infra » rouge - le rouge d'où le nom) elle a été

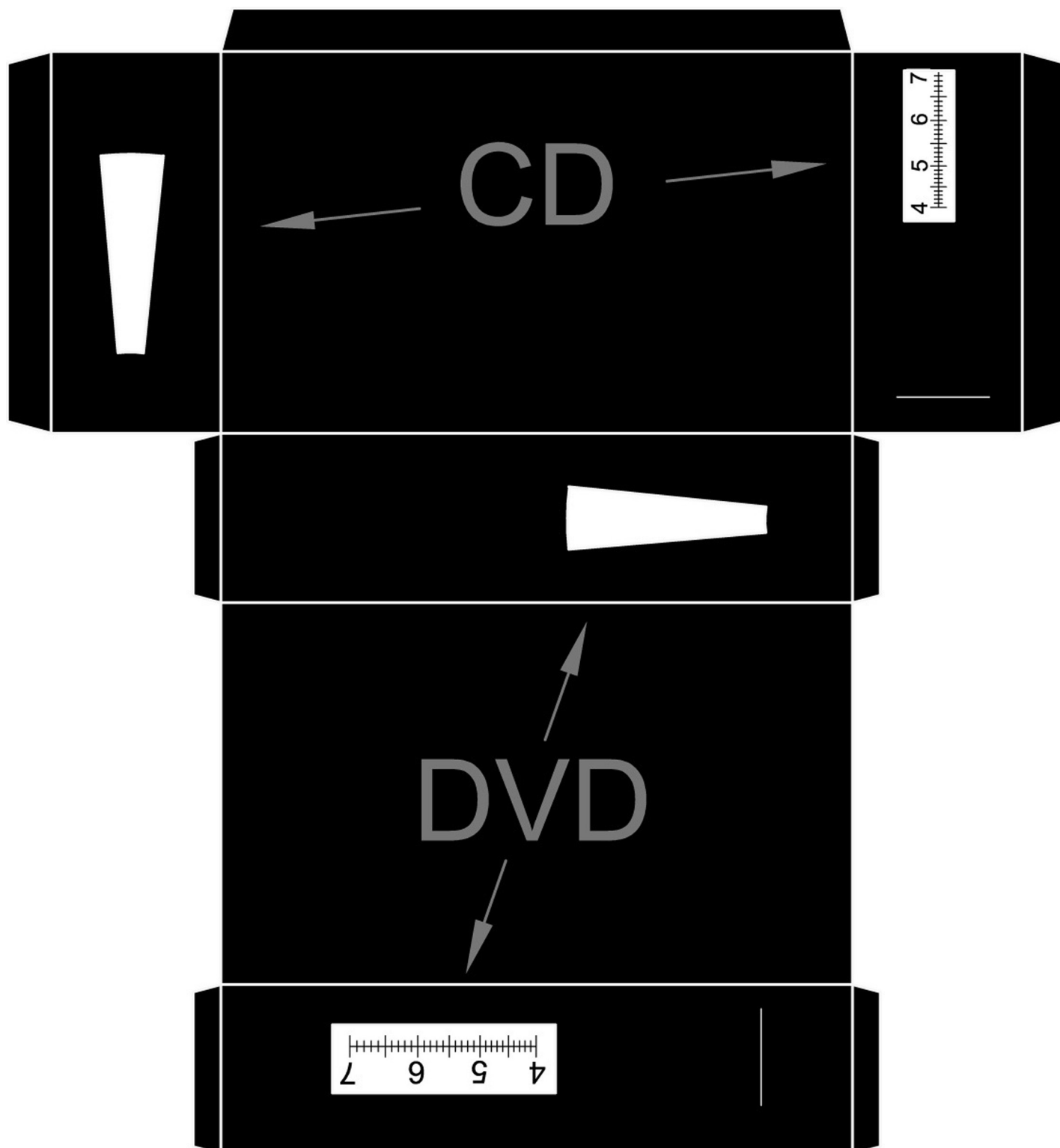


Fig. 5. Gabarit pour le spectromètre.



Fig. 6: Les élèves plus jeunes peuvent décomposer la lumière en arc-en-ciel

plus élevée que la température ambiante.

Herschel a fait d'autres expériences avec « ondes chaudes » (comme il les appelait) qui existe dans sous le spectre rouge, montrant qu'elles se reflètent, réfractées, absorbés et transmis tout comme la lumière visible. Ces "ondes chaudes" ont été désignées plus tard sous le nom de rayonnement infrarouge ou infrarouge. Ces résultats ont été suivis par d'autres, utilisés dans de nombreuses applications technologiques.

Les corps à basse température n'émettent pas dans le spectre visible, mais à des longueurs d'onde plus longues, de sorte que l'énergie libérée est plus petite. Par exemple, le corps de l'animal émette un rayonnement infrarouge, inaperçu à l'oeil nu, mais vue sous forme de chaleur dégagée par le corps. Tous les objets à différentes températures émettent dans l'infrarouge (figures 6 et 7). Des instruments spécifiques de vision nocturne nous permettent d'enregistrer ce rayonnement

Activité 3 L'expérience dans infrarouge de Herschel

Le but de cette activité est de reproduire l'expérience du Herschel en 1800, après quoi Sir William Herschel a découvert une autre forme de rayonnement en de-

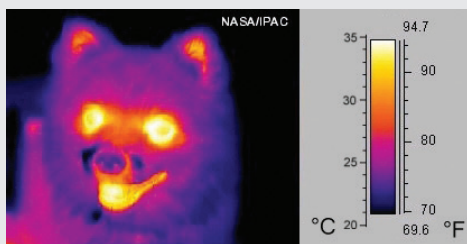


Fig. 7: Photo infrarouge. Nous distinguons les zones plus chaudes à plus froides

hors de la lumière visible. Les matériaux requis sont: prisme de verre, quatre thermomètres, marqueur noir permanent, ciseaux, ruban adhésif, une boîte en carton et une feuille blanche. L'ampoule du thermomètre doit être recouverte d'un ruban adhésif de couleur noire pour mieux absorber la chaleur.

L'expérience devrait être faite à l'extérieur dans une journée très ensoleillée. Si c'est du vent, l'expérience peut être réalisée à l'intérieur, à condition qu'il y ait une fenêtre à travers laquelle la lumière du Soleil entre directement. Placez une feuille blanche au fond de la boîte en carton. Le prisme est soigneusement placé sur le dessus de la boîte afin qu'il soit dans le Soleil. L'intérieur de la boîte doit être tout ou presque tout à l'ombre (figure 8 et 9 a), b), c)). Tourne le prisme prudemment jusqu'à ce qu'un large spectre se forme sur le fond de la boîte.

Après avoir fixé le prisme avec la bande adhésive dans la position appropriée, fixez les trois thermomètres de sorte que le bulbe des thermomètres soit sur une couleur du spectre: un dans la région bleue, un dans la région jaune et le troisième près de la région rouge visible. Les thermomètres doivent être fixés de manière à ce que l'échelle du thermomètre soit visible afin qu'ils ne bougent pas lorsque les données sont collectées. (figures 8 et 9 a), b), c))

La valeur de température se stabilisera après environ cinq minutes. Chaque minute, les valeurs de température seront enregistrées dans un tableau similaire à celui ci-dessous pour chacune des trois zones ainsi que pour l'environnement ambiant. Soyez prudent de ne pas déplacer les thermomètres ou de bloquer la lumière.

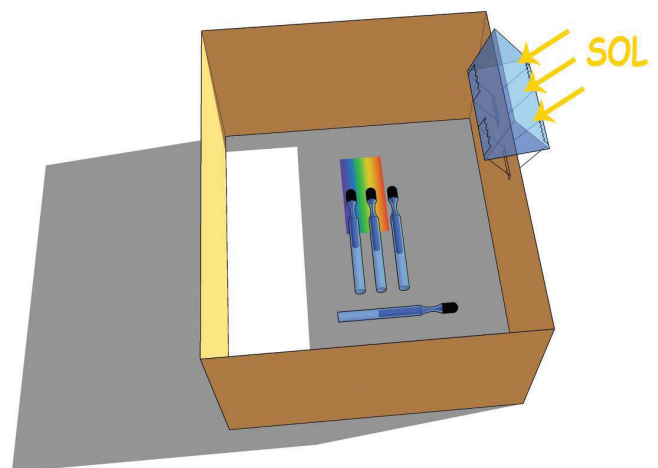


Fig. 8: Appareil Herschel. Les trois thermomètres dans le spectre marquent une température plus élevée que l'environnement

Le thermomètre situé dans la zone jaune (figure 9c) devrait indiquer une température plus élevée que celle de la zone bleue et celui près de la région rouge indique une température encore plus élevée. La conclusion logique est que le thermomètre près de la région rouge absorbe un type rayonnement solaire, invisible à l'œil.

Activité 4: Détection des ondes IR en utilisant des méthodes de détection modernes

Les dispositifs modernes de détection du rayonnement infrarouge émis par le corps humain sont extrêmement coûteux et ne sont accessibles à personne. La télécommande du téléviseur ou le four à micro-ondes ne sont que deux exemples d'outils disponibles pour quiconque utilise le rayonnement IR. Existe-t-il un moyen de rendre le rayonnement IR facilement observable?

Pour cela, vous avez besoin d'un détecteur sensible

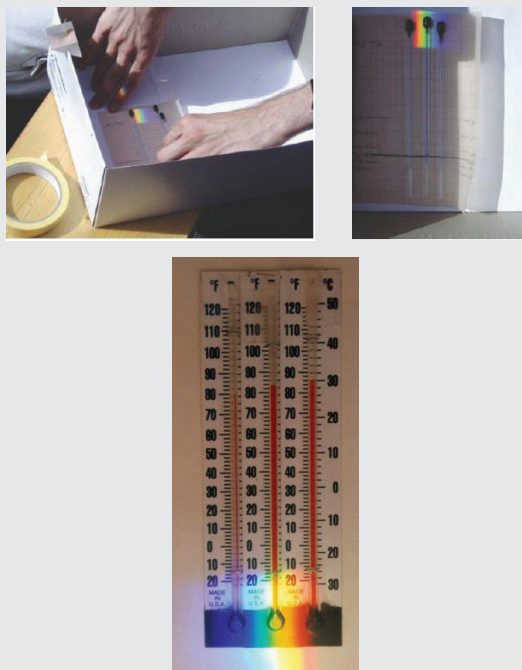


Fig.9a: Placer les trois thermomètres, avec l'ampoule noire, et le spectre dans la partie d'ombre Fig.9b: Thermomètres en bleu, en jaune et en rouge juste après. Fig.9c: Un exemple des mesures en 3 minutes

aux IR. Un de ces dispositifs est le CCD (Charged Coupled Device). Ce dispositif, utilisé principalement en astronomie peut capturer et collecter des photons à partir d'une source dans une période de temps donnée, de sorte que l'objet qui transmet / reflète la lumière devient visible. Le CCD est plus sensible dans le spectre rouge, dans certains cas même infrarouge. Tout appareil photo moderne est basé sur un CCD, ce qui vous permet de photographier dans de mauvaises conditions d'éclairage. L'appareil photo le plus pratique avec un appareil photo intégré, un dispositif CCD, est le téléphone mobile.

En regardant la télécommande du téléviseur à l'œil nu, il n'y a pas de différence entre la télécommande allumée et éteinte (figure 10a). Mais en prenant un appareil photo, en utilisant le téléphone portable, la télécommande activée (figure 10b) ... surprise! L'instrument utilisé pour transmettre des signaux à la télévision ou à d'autres équipements électroniques utilise la lumière infrarouge, une lumière qui est invisible à l'œil nu mais qui devient visible par l'appareil photo.

Activité 5. Détection du rayonnement infrarouge d'une ampoule

La plupart des corps célestes émettent dans de multiples longueurs d'onde. S'il y a de la poussière ou du gaz interposé entre le corps céleste et l'observateur, certaines longueurs d'onde seront bloquées. Par exemple, la poussière au centre de notre galaxie nous empêche de voir une forte lumière provenant des millions d'étoiles qui s'y concentrent. Si la poussière est transparente aux rayons infrarouges, elle peut être détectée depuis la Terre. La même chose se produit avec n'importe quel nuage de poussière dans notre galaxie (figure 11a et 11b).

Une ampoule à incandescence émet principalement le spectre visible, mais émet également des infrarouges. Le rayonnement infrarouge peut traverser des matériaux opaques au spectre visible.

Nous pouvons utiliser une lampe de poche et un tis-

	Term. 1 en bleu	Term. 2 en jaune	Term. 3 en IR	Term 4 en ombre
Après 1 minute				
Après 2 minute				
Après 3 minute				
Après 4 minute				
Après 5 minute				

Tableau 1: Tableau des données



Fig. 10a: Oeil nu activé à distance. Fig. 10b Télécommande activée par téléphone portable.

su en feutre pour bloquer la lumière visible. Dans une pièce sombre, la torche s'allume et est couverte de feutre. Si nécessaire, deux ou trois couches de feutre peuvent être utilisées; cependant, si trop de couches sont utilisées, le rayonnement infrarouge peut également être bloqué. En utilisant une caméra dans la pièce sombre, la lampe de poche peut être distinguée (figure 12a et 12b).

Activité 6: Constellations avec lumière infrarouge

Dans les magasins d'électronique ou en ligne, peuvent être achetés les LED infrarouges, similaires à ceux utilisés pour la télécommande du téléviseur. Elles ne coûtent pas cher (environ 0,2 euro). Elles fonctionnent avec des piles de 3 ou 9 V ou avec une alimentation



Fig. 11a : Nuage de poussière dans la zone visible.
Fig. 11b : Superposition de la vision infrarouge.

CC. Elles sont connectés en parallèle avec une résistance comprise entre 100 et 500 Ω .

Vous pouvez créer un circuit en utilisant ces LED sous la forme d'une constellation: Cassiopée (figures 13a et 13b), Orion ou la Croix du Sud par exemple. En utilisant une caméra, ces constellations infrarouges peuvent être vues

Activité 7. Constellations à l'aide de la télécommande

Une tâche beaucoup plus facile que la précédente est

de former une constellation en utilisant quelques télécommandes infrarouges. Si elles sont photographiées dans une pièce sombre, vous pouvez voir la constellation formée (figure 14a et 14b).

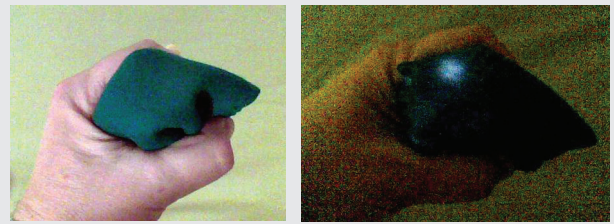


Fig. 12a et 12b: Le feutre bloque complètement la lumière visible mais pas l'infrarouge

L'énergie électromagnétique dans la zone radio

Le rayonnement électromagnétique avec des longueurs d'onde allant du mètre au kilomètre s'appelle le rayonnement radio (ondes radio). Les ondes radio sont utilisées à des fins commerciales (télécommunication) mais atteignent nous et l'espace, révélant ce que d'autres longueurs d'onde échouent (figure 15a, 15b et 15c).

Il y a beaucoup de sources radio dans l'univers: le centre de notre galaxie, des étoiles à neutrons ou même des planètes comme Jupiter.

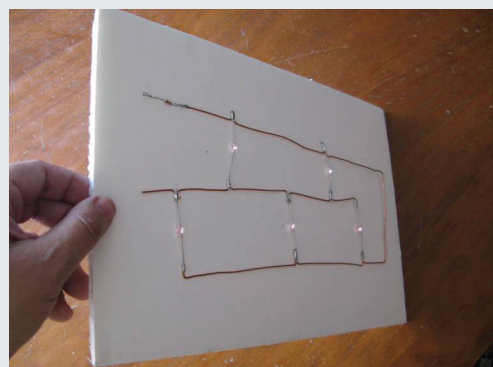
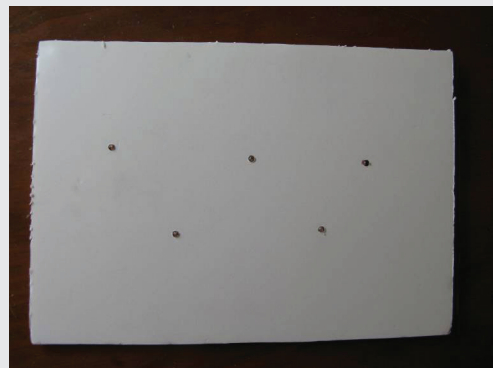


Fig. 13a et 13b: Cassiopée réalisée avec des leds infrarouges. Ils sont connectés en parallèle.

Activité 8: La production d'ondes radio

Lorsque vous ouvrez et fermez un circuit électrique, les ondes radio sont produites similaires à celles produites dans le commerce. Il est possible de les capturer avec une radio AM et de les transformer en son, ce qui est un autre type d'ondes. La puissance de ces émissions radio diminue lorsque le récepteur s'éloigne de la source. Les ondes radio peuvent traverser tous les obstacles, même à travers les murs.

Pour ce faire, nous prenons deux morceaux de câble d'environ 20 cm chacun. Retirez l'isolation aux deux extrémités de l'un des câbles. Pour l'autre câble, enlevez l'isolation à une extrémité, laissez environ 10 cm d'isolation, enlever le reste de l'isolation. À la fin sans isolation, le fil se rassemblera sous la forme d'une boule. L'autre extrémité se connecte à une batterie 9V. Utilisez un crayon pointu sur les deux extrémités. Le



Fig. 14a et 14b: Réalisation de la constellation de la Croix du Sud avec télécommandes

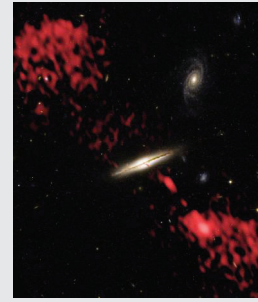


Fig. 15a: Cette galaxie émet des jets détectables uniquement à la radio (rouge artificiellement coloré).

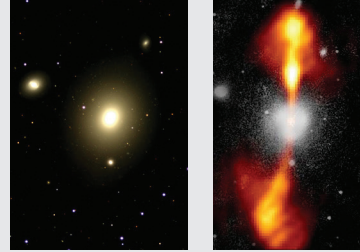


Fig. 15b: Photographie de la galaxie NGC 4261 dans le visible. Fig. 15 c: La même galaxie avec l'image radio superposée. Il y a quelques jets de matière artificiellement colorés en rouge

crayon avec graphite sera utilisé comme source de rayonnement radio. À une extrémité du crayon, connectez le premier morceau de fil, en le fixant avec de bande isolant. L'autre extrémité est connectée au fil connecté à la batterie (figure 17).

La radio ouverte dans la bande AM (pas FM). Avec la pointe libre du stylo, frappe la balle de fil. Changer la fréquence de la radio jusqu'à ce qu'il sonne sur la radio comment toucher la boule de fil. Il peut essayer de mettre différents obstacles entre l'émetteur et la radio, il peut même déplacer la radio vers une autre pièce pour vérifier si elle reçoit des ondes radio ou non.

Activité 9: Écouter la voix de Jupiter

Jupiter émet des ondes radio à différentes fréquences. Leur origine est encore incertaine, mais ils semblent être liés au champ magnétique de Jupiter ainsi qu'à l'interaction de la planète avec le satellite Io. La transmission est dans la bande de fréquences 18-22 MHz, avec un maximum à 21 MHz. Ces valeurs sont disponibles pour de nombreux récepteurs domestiques. Vous devez avoir une radio à ondes courtes (SW) pour recevoir des ondes radio à ces valeurs.

Les émissions de Jupiter ne sont pas continues. Jupiter a trois jets plus ou moins égaux (émissions) qui tournent avec la planète toutes les 10 heures. Ces jets (émissions) ne sont pas toujours actifs, il faut donc beaucoup de patience pour les capturer

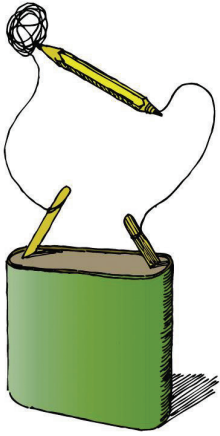


Fig. 16: Production d'ondes radio

Pour les recevoir, il faut une radio à ondes courtes, positionnée sur des fréquences comprises entre 18 et 22 MHz, où il n'y a pas de bruit de fond. Les sons capturés ressemblent au bruit des vagues de l'océan sur la plage (ou rafales de vent) capturé par une fréquence d'environ trois par seconde. La force du signal augmente jusqu'à un maximum qui peut prendre entre quelques secondes et quelques minutes, puis diminue progressivement. Par expérience, si vous écoutez pendant 20 minutes, il y a une chance de six pour entendre les ondes radio de Jupiter. Bien sûr, Jupiter doit être à l'horizon, mais peu importe s'il y a des nuages ou pas

Une antenne radio est adaptée pour capturer les ondes émises par Jupiter, mais captera les ondes radio provenant de toutes les directions. Pour améliorer la réception et s'assurer que le signal capturé provient de Jupiter, nous avons besoin d'une antenne unidirectionnelle. Cela peut être fait comme suit: prendre 165 cm de fil de cuivre et faire un cercle avec celui-ci sans le fermer. Le fil est mis sur quatre bâtons de 30 cm de long chacun. Couvrir un morceau de bois avec une forme carrée (60x60 cm) d'un côté avec du papier d'aluminium. Les quatre bâtons sur lesquels repose le fil de cuivre sont fixés à la pièce de bois. Nous y lions le cercle de cuivre tenu par les quatre bâtons.

Prenez un câble coaxial et divisez-le de sorte que le côté interne se connecte au fil de cuivre et le côté extérieur à la feuille d'aluminium. L'autre extrémité se connecte à la radio pour écouter les ondes radio reçues. Enfin, la nouvelle antenne se dirige vers Jupiter.

Lumière ultraviolette

Les photons du rayonnement ultraviolet ont beaucoup plus d'énergie que ces de la lumière visible. Par conséquent, en grandes quantités (à longue exposition), ils peuvent détruire les liaisons chimiques des molécules organiques, ce qui est mortel à la vie. En raison de ces

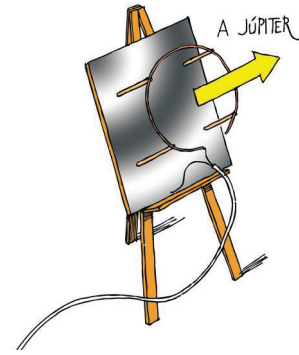
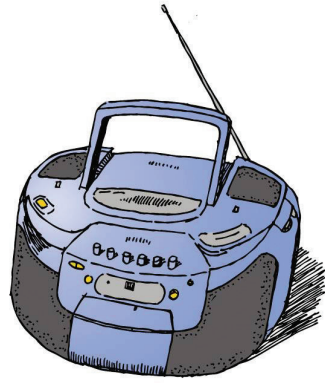


Fig. 17: Antenne pour écouter Jupiter.

propriétés, le rayonnement ultraviolet est utilisé pour stériliser les ustensiles chirurgicaux.

Le soleil émet des rayons ultraviolets, mais heureusement, l'atmosphère terrestre (en particulier la couche d'ozone) filtre la plus grande partie du rayonnement ultraviolet, arrivant chez nous seulement la quantité nécessaire pour maintenir la vie. En raison du rayonnement ultraviolet, la peau est bronzée lors de l'exposition au Soleil, mais une exposition trop longue peut provoquer un cancer de la peau. Pour les usines de photosynthèse, on utilise également le rayonnement ultraviolet. Cependant, si la couche d'ozone est plus mince, la Terre recevra trop de rayonnement UV et l'incidence des maladies liées au cancer augmentera considérablement.

Activité 10: Lumière noire (UV) A

Il y a des ampoules noires ultraviolettes, qui sont souvent utilisées pour faire pousser des plantes dans des serres ou des endroits légèrement éclairés. Le verre de ces ampoules est souvent presque noir, émettant une très petite quantité de lumière bleue visible. Certaines usines de textile utilisent des agents de blanchiment pour les matériaux blancs qui reflètent cette lumière dans un violet lumineux. C'est pourquoi ce type d'éclairage est utilisé dans les discothèques, où les tissus blancs deviennent brillants

Cette propriété est également utilisée pour fabriquer le papier de la plupart des billets de banque: des lignes fluorescentes peuvent être vues dans le rayonnement UV (figure 18). C'est pourquoi les billets de banque sont difficiles à simuler. Les détecteurs de billets de banque contrefaits sont basés sur le rayonnement ultraviolet (figure 19). De nombreux documents officiels ont également des signes visibles uniquement avec les UV.

Rayons X

Le rayonnement X est chargé avec encore plus d'énergie

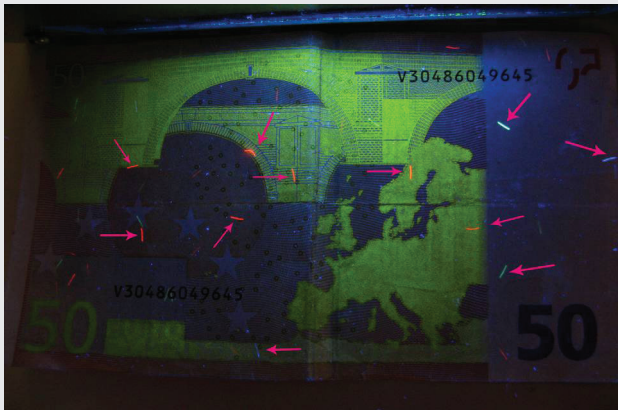


Fig. 18: Une note de 50 € illuminée par des rayons UV, montre de petites bandes fluorescentes marquées ici par



Fig. 19: Détecteur de faux billets, qui utilise la lumière ultraviolette

que les UV. Il est utilisé en médecine en radiologie (figure 20a).

Dans l'Univers, les rayonnements X sont spécifiques aux événements à très forte consommation / libération d'énergie: trous noirs, quasars, supernovae, etc. La mission du télescope spatial Chandra est de détecter et de surveiller de tels objets / événements (figure 20b)

Rayonnement gamma

À la fin du spectre, avec des longueurs d'onde plus courtes que le rayonnement X, il y a le rayonnement gamma. C'est le rayonnement le plus chargé d'énergie. Il existe différentes sources dans l'Univers (figure 21a). Des éruptions violentes émettant de grandes quantités de rayonnement gamma sont détectées assez fréquem-



Fig. 20a: Rayons X utilisés en médecine.



20b: Galaxy M81 avec le noyau photographié en rayons X, suggérant la présence d'un trou noir très massive

ment pendant plusieurs minutes ou plusieurs heures.

Ayant une faible longueur d'onde, la source de rayonnement est assez difficile à identifier avec précision. Des noyaux actifs galactiques, des pulsars et des supernovae ont été identifiés jusqu'à présent comme émetteurs de rayonnement gamma

Sur la Terre, le rayonnement gamma est émis par la plupart des éléments radioactifs. Comme le rayonne-

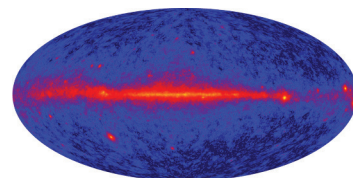
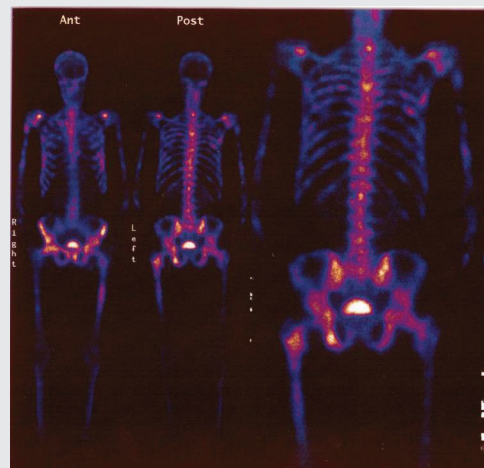


Fig. 21a: Carte de l'Univers vue par le «Télescope Spatial Gamma-Ray de Fermi».



21b: Scintigraphie osseuse avec gamma du corps humain galaxie

ment X, le rayonnement gamma est utilisé en imagerie médicale (figure 21b) ainsi que dans des thérapies pour des maladies telles que le cancer.

.....

Bibliographie

Mignone, C., Barnes, R., *More than meets the eye: how space telescopes see beyond the rainbow*, Science in the School, Eiro Forum, 2014

Moreno, R, *Experimentos para todas las edades*, Ed. Rialp. Madrid, 2008.

Sources Internet

Spitzer Telescope, Educacion, California Intitute of Technology.

<http://www.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/index.shtml>

http://www.scienceinschool.org/2014/issue29/EM_Astronomy

<https://www.khanacademy.org/science/cosmology-and-astronomy/universe-scale-topic/light-fundamental-forces/v/introduction-to-light>

Chandra X-ray Observatory:

<http://chandra.harvard.edu/about>

The Fermi Gamma-ray Space Telescope:

<http://fermi.gsfc.nasa.gov>

Expansion de l'Univers

Ricardo Moreno, Susana Deustua, Rosa M. Ros.

Union Astronomique Internationale, École Retamar (Madrid, Espagne), Space Telescope Science Institute, (Baltimore, États-Unis), Université Polytechnique de Catalogne (Barcelone, Espagne)

Résumé

Cet atelier regroupe plusieurs activités simples à faire dans lesquelles nous allons travailler avec les concepts clés de l'univers en expansion. Dans la première activité, nous construisons un spectroscopie pour observer les spectres de gaz. Au deuxième, au troisième et au quatrième, nous expérimentons qualitativement avec l'expansion d'une bande de caoutchouc, d'un ballon et d'une surface de points, respectivement. Dans la cinquième activité, nous travaillons quantitativement sur l'expansion d'une surface et nous calculons la constante Hubble dans ce cas. Dans la sixième activité, nous détectons le rayonnement du fond micro-ondes.

Objectifs

- Comprendre l'expansion de l'Univers.
- Comprendre qu'il n'y a pas de centre de l'Univers.
- Comprendre la loi de Hubble.
- Comprendre la signification de la matière noire et simuler la lentille gravitationnelle

L'origine de l'Univers

La théorie de l'origine de l'univers qui est la plus acceptée aujourd'hui est connue sous le nom de Big Bang, une énorme explosion qui a commencé une expansion de l'espace lui-même. Il n'y a pas de galaxies qui se déplacent dans l'espace, mais c'est l'espace entre elles qui se développe, traînant les galaxies. Pour cette raison, nous ne pouvons pas parler d'un centre de l'univers, car de la même façon il est impossible de parler d'un pays qui se trouve au centre de la surface terrestre.

La vitesse de récession d'une galaxie est proportionnelle à sa distance. La constante qui les relie est appelée constante de Hubble. La loi de Hubble relie linéairement la distance d'une galaxie à la vitesse avec laquelle elle s'éloigne.

La première vérification du Big Bang a été faite avec l'observation des décalages vers le rouge dans les spectres des galaxies, et la preuve finale de la théorie du Big Bang a été la détection du fond cosmique de micro-ondes.

Décalage vers le rouge

Si au laboratoire on regarde avec un spectroscopie la lumière provenant d'un gaz chaud, par ex. Hydrogène, on verra des raies colorées typiques de ce gaz à une longueur d'onde déterminée. Si nous faisons de même avec la lumière provenant d'une galaxie distante, nous verrons ces raies légèrement déplacées (figure 1). On l'appelle : "décalage vers le rouge" (redshift), car dans la plupart des galaxies, les raies se déplacent vers cette couleur.

Le décalage spectral de la lumière est due à la fuite de la galaxie loin de nous. Ce processus est semblable à ce qui se passe quand elle se déplace d'abord vers nous, puis loin de nous. Le bruit change plus le changement (décalage) est grand, plus la vitesse est grande.

En étudiant le spectre des galaxies de notre groupe local, nous constatons que le grand nuage de Magellan s'éloigne de nous à 13 km / s et que le petit recule à environ 30 km / s. Andromède se déplace environ 60 km / s vers nous, tandis que M 32 (l'un de ses satellites) recule à 21 km / s. En d'autres termes, les galaxies voisines ont des mouvements relatifs petits et irréguliers.

Mais si on regarde le groupe de la Vierge, à une distance moyenne de 50 millions d'années lumière, nous voyons que toutes s'éloignent de nous à des vitesses comprises entre 1000 et 2000 km / s. Et dans le superamas des

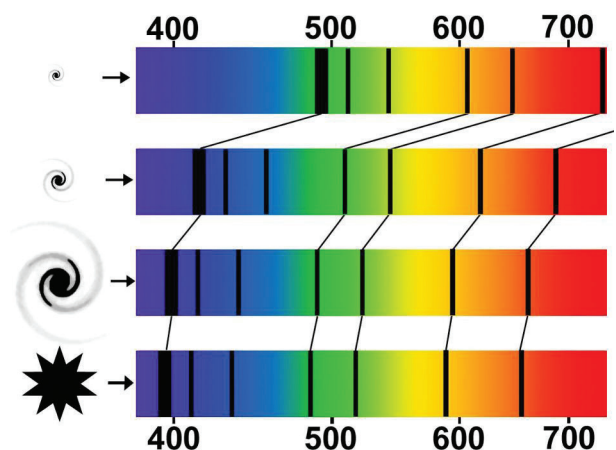


Fig.1: Plus la galaxie est éloignée, plus le spectre se décale vers le rouge, ce qui nous montre que la galaxie s'éloigne de nous plus rapidement.

cheveux de Berenice à 300 millions d'années lumières de nous, les taux de vitesse sont entre 7000 et 8500 km / s. Mais en regardant dans la direction opposée, nous constatons que M 74 recule de nous à 800 km / s et M 77 à 1130 km / s. Et si on regarde les galaxies de plus en plus éloignées, la vitesse de récession est encore plus grande: NGC 375 se déplace à 6200 km / s, NGC 562 à 10 500 km / s et NGC 326 à 14 500 km / s. Toutes les galaxies, sauf les très proches, s'éloignent de nous. Est-ce qu'elles sont en colère contre nous?

Activité 1: Effet Doppler

Selon l'effet Doppler, la longueur d'onde d'un son varie lorsque la source se déplace. Nous l'expérimentons au son de motos ou de voitures dans une course: le son est différent quand il s'approche et s'éloigne de nous. D'autres exemples familiers sont un camion de pompier qui passe près de nous, le sifflet d'un train en mouvement, etc.

Vous pouvez le reproduire en tournant sur un plan horizontal, une sonnerie, par exemple, un réveil. Nous le mettons dans un sac en tissu (figure 2a) et attachez-le avec une ficelle. Lorsque nous le tournons autour de nos têtes (figure 2b), nous pouvons l'entendre quand il s'approche du spectateur: l est raccourci et le son est plus élevé. Quand il s'éloigne de nous, le l est étiré et le son est plus bas. Celui qui se trouve au centre de la



Fig. 2a: Réveil, sac et corde.



Fig. 2b: Les spectateurs d'un côté remarquent les différences dans la sonnerie

rotation ne perçoit pas ces différences.

C'est l'effet Doppler dû au déplacement. Mais ce n'est pas celui que les galaxies ont avec l'expansion. Les galaxies ne se déplacent pas dans l'espace, c'est l'espace

entre elles qui enfle.

Activité 2: L'étirement des photons

O Universo, ao expandir-se, "estica" os fotões. Quanto mais tempo durar a viagem do fotão, maior é "alongamento" que este sofre.

Lorsqu'il s'élargit, l'Univers "étire" les photons. Plus la durée du voyage du photon est longue, plus il y a d'étirement. Vous pouvez fabriquer un modèle de

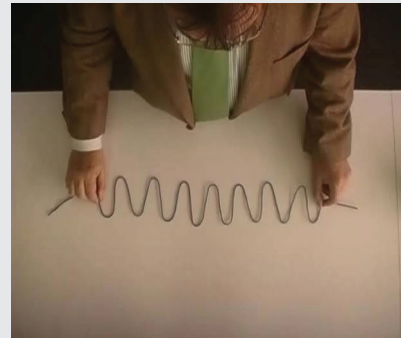


Fig. 3a: ondes faites avec un câble rigide

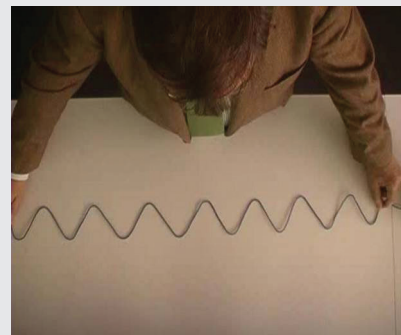


Fig. 3b: Les mêmes ondes affichent une plus longue longueur d'onde.

cet étirement avec un câble semi-rigide, utilisé dans l'installations électriques des maisons. Couper environ un mètre de câble et le plier à la main en faisant plusieurs cycles d'une sinusoïde, représentant diverses ondes (figure 3a). Prenez le câble avec les deux mains et étirez (figure 3b) et observez que la longueur d'onde augmente, comme cela se produit dans le rayonnement provenant d'une galaxie. Les parties plus éloignées de nous ont eu plus de temps pour se dilater et se déplacer plus loin dans le rouge (λ plus grand).

Loi de Hubble

C'est Edwin Hubble (figure 4) qui, en s'appuyant sur ces données, a établi en 1930 la loi qui porte son nom: plus la galaxie est distante de nous, plus elle est rapide. Cela indique que l'univers se développe dans toutes les directions, de sorte que tous les corps qui s'y trouvent reculent l'un de l'autre. Le mouvement d'éloignement que nous voyons pour toutes les galaxies ne signifie

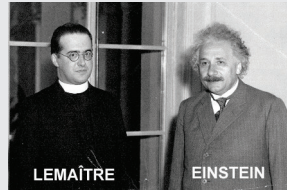
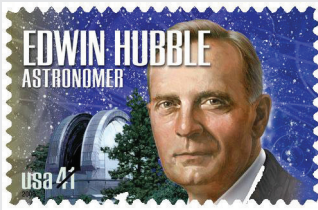


Fig.4: Edwin Hubble Fig. 5: George Lemaître et Albert Einstein

pas que nous sommes au milieu d'elles: un alien aurait la même impression de n'importe où dans l'univers, comme cela se produit dans une explosion de feux d'artifice: toutes les particules légères seront écartées par l'explosion de la poudre à canon.

Cependant, le modèle réel n'est pas une galaxie qui traverse l'espace, mais c'est l'espace entre celles-ci qui subit une expansion, entraînant les galaxies.

Si l'espace se développe dans toutes les directions, cela signifie que, en retournant dans le passé, la matière devrait être regroupée à un moment initial où tout a commencé. C'est ainsi que le prêtre et l'astronome belge George Lemaître (figure 5) a établi le modèle de l'Univers le plus largement accepté aujourd'hui: il y aurait eu une grande explosion originale, mais qui n'est pas terminée et nous concerne encore. Dans cette expansion, c'est l'espace lui-même qui se développe. Pour comprendre cela, imaginez un ballon en caoutchouc avec une série de points dessinés sur sa surface, représentant des galaxies (figure 6). Au fur et à mesure qu'il augmente, l'espace élastique entre les taches augmente.

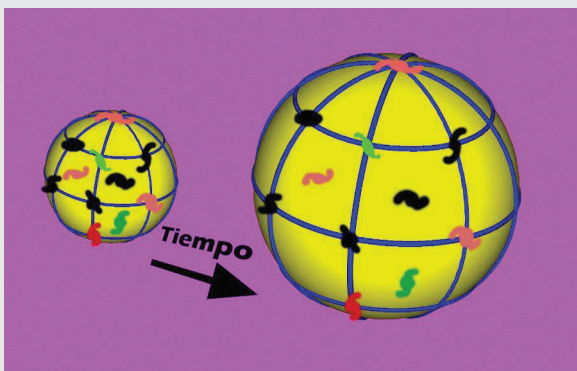


Fig. 6: Au fur et à mesure que le temps passe, l'espace s'élargit, et le matériel qui s'y trouve se sépare les uns des autres

De même, au fur et à mesure que le temps passe, l'espace se développera, et la matière contenue elle-même se séparera.

Par conséquent, la vitesse de récession d'une galaxie et sa distance nous semble être proportionnelle. La cons-

tante qui les relie est appelée constante Hubble. La loi de Hubble relie la distance d'une galaxie à la vitesse avec laquelle elle s'éloigne:

$$v=H \cdot d$$

On peut déterminer approximativement sa valeur en connaissant la vitesse et la distance de certaines galaxies. La vitesse à laquelle une galaxie s'éloigne est facile à mesurer avec précision par le décalage vers le rouge, mais la mesure de la distance, surtout dans le cas des galaxies plus éloignées, est plus difficile. Les scientifiques ne s'entendent pas sur la valeur de la constante de Hubble. En utilisant une méthode ou une autre, les valeurs qui en résultent se situent généralement entre 50 et 100 km / s par Megaparsec. La valeur actuellement acceptée est d'environ 70-100 km / s, ce qui indique que l'âge de l'Univers est de 13 700 millions d'années

Activité 3: L'univers en élastique

Edwin Hubble a découvert que toutes les galaxies s'éloignent. Plus elles sont éloignées, plus vite elles le font. La loi de Hubble stipule que la vitesse de récession d'une galaxie par rapport à nous est proportionnelle à sa distance. C'est une conséquence logique de l'univers en expansion. Et bien que toutes les galaxies s'éloignent de nous, cela ne signifie pas que nous sommes le centre de l'univers.

Avec un marqueur, faites une marque tous les centmètres sur une bande élastique. Chaque marque représente une galaxie (A, B, C, ...). Notre galaxie sera la première. Placez le ruban à côté de la règle (figure 7a), et permettez à notre galaxie de coïncider avec la mar-



Fig. 7a: bande en caoutchouc sans étirement



Fig. 7b: bande élastique étirée.

que de 0 cm. Les autres galaxies A, B, C, ... coïncident avec les marques 1, 2, 3, 4 ... cm.

Étirez la bande de caoutchouc (figure 7b) afin que notre galaxie reste à la marque de 0 cm et que la galaxie (A) suivante soit placée sur la marque de 2 cm. La distance de cette galaxie à la nôtre a doublé. Qu'est-il arrivé à la distance entre les autres galaxies B, C, D et la nôtre? Ont-elles aussi doublé?

Supposons que le temps consacré à l'étirement du caoutchouc était de 1 sec. Les taux de recul des autres galaxies sont-ils identiques, ou certains se déplacent plus vite que d'autres? Comment un habitant de la plus proche "galaxie" voit-il notre galaxie et les autres galaxies? Sont-elles toutes éloignées?

Activité 4: L'univers dans un ballon

Dans l'univers en expansion, il existe un espace entre les galaxies qui s'étend. Les galaxies elles-mêmes ne s'étendent pas, ni nos maisons. Ce qui est étroitement lié par la gravité n'augmente pas de taille.

Il y a une expérience simple qui peut démontrer cela. Il suffit d'utiliser un ballon et de le gonfler un peu au début. Ensuite, collez quelques morceaux de coton sur la surface avec du ruban adhésif (les pièces de monnaie fonctionnent également). Ensuite, gonflez le ballon jusqu'à ce qu'il soit plein. Les morceaux de coton seront séparés l'un de l'autre (figures 8a et 8b). Certains semblent aller plus loin que d'autres, mais aucun ne se rapproche. C'est un modèle très simple de l'univers en



Fig. 8a: Des morceaux de coton collés à un ballon légèrement gonflé



Fig. 8b: les morceaux de coton s'éloignent lorsque le ballon est plus gonflé

expansion.

Activité 5: Calcul de la constante de Hubble

La loi de Hubble dit que la vitesse v d'une galaxie est proportionnelle à sa distance de nous:

$$v = H \cdot d.$$

La constante H est appelée constante de Hubble, et vous pouvez la calculer en utilisant les distances et les vitesses de certaines galaxies. De la formule ci-dessus:

$$H = v/d$$

Le schéma de la figure 9 montre l'espace, représenté par une grille bleue de lignes pointillées, avec nous au centre et plusieurs galaxies bleues à une certaine distance de nous. Après un certain temps, environ 10 secondes, l'espace s'est développé : la grille (en lignes solides) et les galaxies sont alors représentées en rouge.

Remplissez le tableau 1 sous le dessin. Dans chaque rangée, mettez les données de chaque galaxie. Par exemple, les coordonnées sont calculées avec les carrés bleus (lignes pointillées) ou rouges (lignes pleines) comme galaxie A ou A' respectivement, et la distance d est obtenue en mesurant la longueur en centimètres avec une règle, en commençant au centre de Notre galaxie. Les données de la colonne Δd doivent être obtenues en soustrayant la distance de A' et A.

Dans la dernière colonne, nous devons utiliser la distance avant l'expansion (p. Ex. A, non A') dans le dénominateur:

- Les coordonnées de chaque galaxie ne varient pas avec l'expansion (les galaxies ne se déplacent pas dans l'espace).
- La valeur de H est assez constante indépendamment

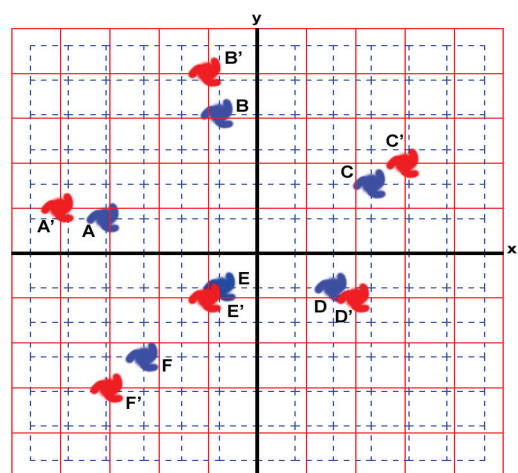


Fig. 9: La grille des lignes continues (rouges) est identique à celle des lignes pointillées (bleues) mais élargie. Les galaxies sont attachées aux grilles.

Galaxia	Coordenadas x,y	d =distancia al origen	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A	(-4, 1)				
A'	(-4, 1)				
B	(-1, 4)				
B'	(-1, 4)				
C	(3, 2)				
C'	(3, 2)				
D	(2, -1)				
D'	(2, -1)				
E	(-1, -1)				
E'	(-1, -1)				
F	(-3, -3)				
F'	(-3, -3)				

Tableau 1: avec les coordonnées écrites comme exemple

Galaxia	Coordenadas x,y	d =distancia al origen	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A					
A'					
B					
B'					
C					
C'					
D					
D'					
E					
E'					
F					
F'					

Tableau 2: à compléter avec les données de la figure 9.

des galaxies.

Le Big Bang

À l'heure actuelle, la théorie de l'origine de l'univers comme une énorme explosion est largement acceptée dans la communauté scientifique, bien qu'il y ait ceux qui doutent et estiment qu'il reste encore des détails inexpliqués. En 1994, le magazine américain Sky & Telescope a émis un concours pour renommer cette théorie. 12 000 soumissions ont été reçues, mais aucune n'a pu supplanter celle qui existait déjà: la théorie du Big Bang. Le nom avait été choisi comme une plaisanterie un peu dénigrante par l'astronome Fred Hoyle, qui, avec un certain à-priori anti-religieux, pensait que ce nom évoquait beaucoup trop l'idée d'un Créateur.

Avec l'observation d'un univers en expansion, on montre qu'en remontant le temps il y avait un instant où l'explosion s'est produite, donnant lieu à l'espace et au temps tel que nous le connaissons maintenant. Nous pouvons nous demander comment cela s'est produit et pourquoi cela s'est produit. La science n'a pas de réponses parce que celle-ci ne fonctionne qu'avec ce qui existe déjà. La science peut essayer d'expliquer comment les choses ont fonctionné lors du Big Bang, mais pas pourquoi la matière existe. Ce genre de question s'adresse aux philosophes, qui étudient la méta-physique (au-delà de la physique).

Certaines tentatives pour expliquer la cause en recourant à certains concepts physiques tels que les fluctuations quantiques du vide confondent le vide et le rien: le vide quantique existe, il a de l'espace et de l'énergie. Le concept de rien, c'est-à-dire l'absence de toute existence, y compris l'espace, n'est pas scientifique, c'est métaphysique. Dans le rien, rien ne peut exister et fluctuer. D'autres théories parlent de multi-univers mais, par définition, cela est impossible à vérifier (si nous pouvions observer d'autres univers, ils feront partie du nôtre, car notre univers est l'ensemble de la matière qui est à notre portée de quelque manière que ce soit). Pour cette raison, toutes ces théories ne sont pas vraiment scientifiques.

Mais revenons à la science. À l'instant initial, toute la matière et toute l'énergie étaient infiniment petites et denses. Le Big Bang a été l'explosion de l'espace au début des temps, et à partir de ce moment, la question est devenue opérationnelle, avec des lois qui ont été écrites, et qui ont conduit l'univers à l'état actuel. Voltemos à ciència.

Activité 6: il n'y a pas de centre d'expansion

Sur la page suivante figure un dessin (figure 10) avec de nombreux points qui simulent des galaxies à un

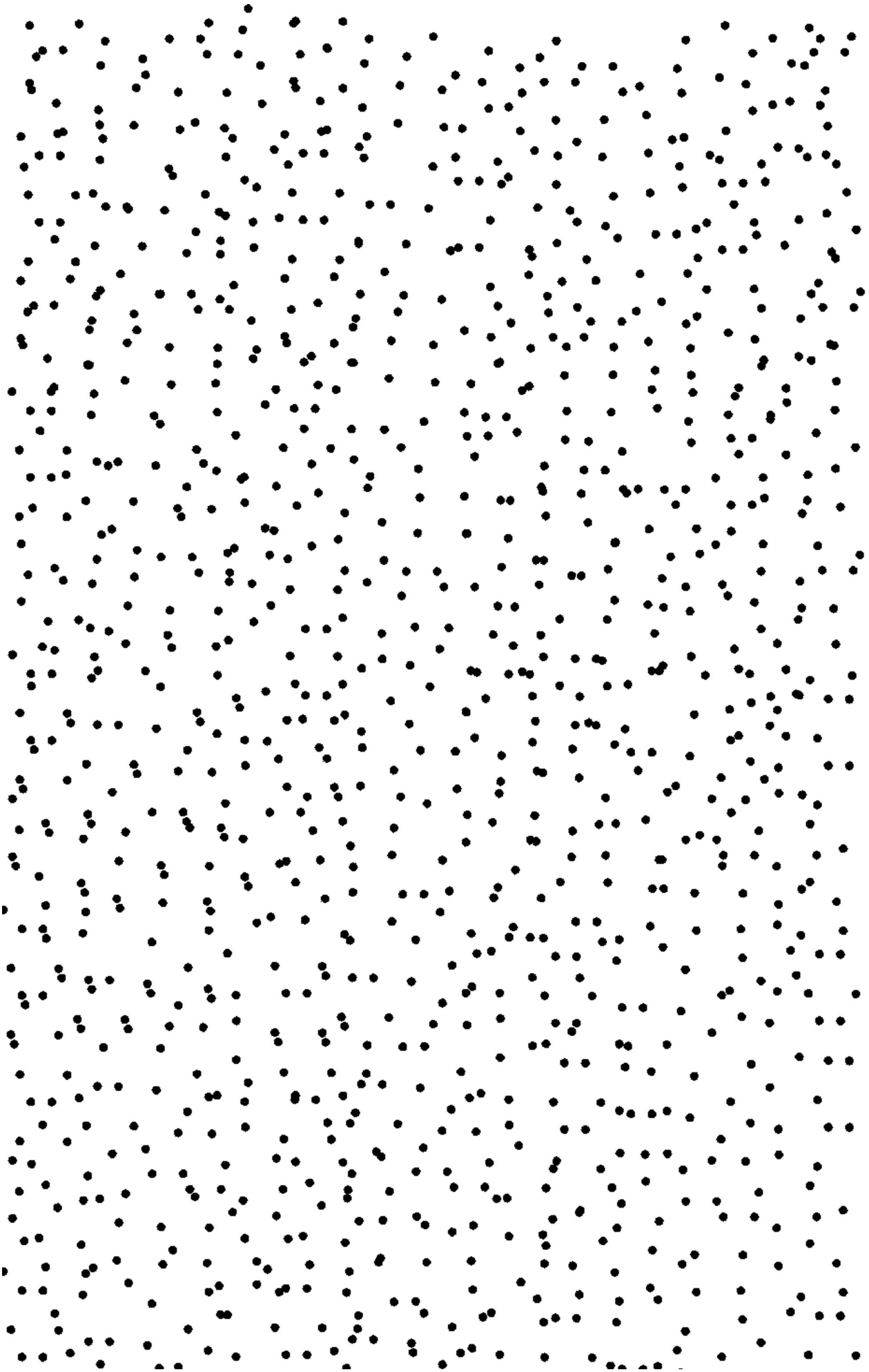


Fig. 10: photocopiez cette page sur un transparent, puis agrandissez une autre à 105%

moment donné. Créez d'abord une copie sur du papier transparent, puis une autre sur un papier transparent différent, légèrement agrandi (par exemple, 105%).

Si on superpose les deux images avec un rétroprojecteur (figure 11a), nous obtenons une image qui représente l'expansion de l'espace au fil du temps: associez les images en un point, et vous pouvez très bien observer le déplacement de tous les points radiaux. Plus vous êtes loin du point de coïncidence, plus il semble que les points s'éloignent plus vite.

Mais si la correspondance est choisie à un autre point (figure 11b), c'est la même chose que ce que l'on observe. De notre galaxie, nous voyons que toutes les galaxies s'éloignent de nous, mais cela est vrai quelque soit où se situe l'observateur. Nous pensons que nous sommes au centre de l'univers, mais nous ne le sommes pas, en tant qu'observateur dans une autre galaxie il verrait la même chose et cela semblerait être au centre. Il n'y a vraiment aucun centre.

L'évolution de l'univers

Pour avoir une idée de l'histoire ultérieure de l'univers,

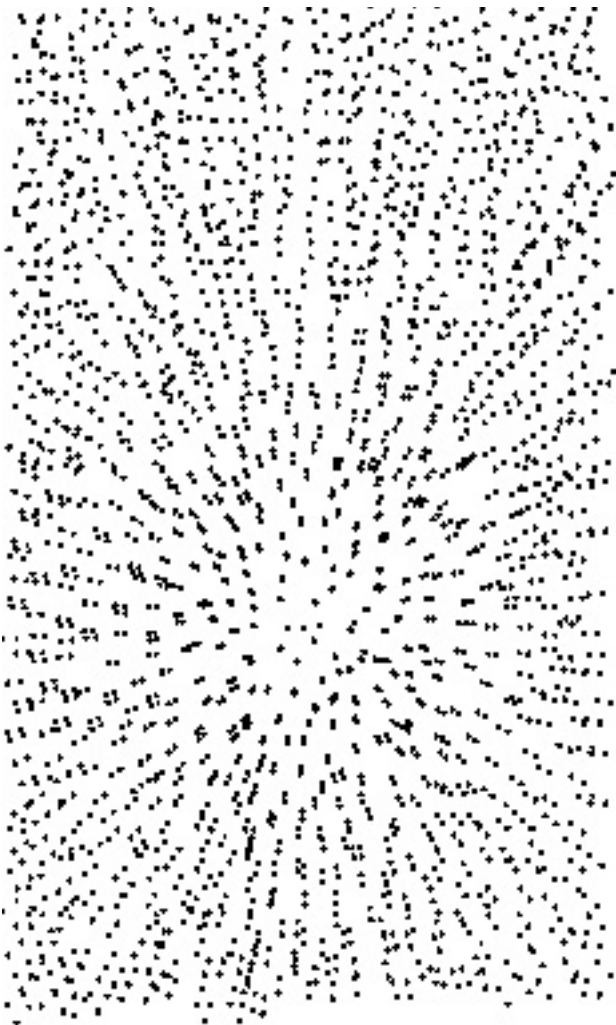


Fig. 11a: Superposition de deux diapositives, l'une augmentée de 105%.

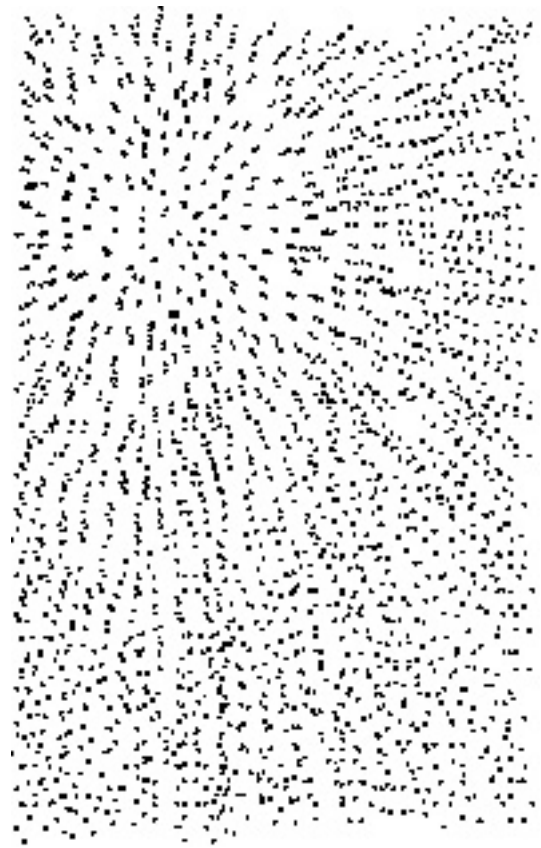


Fig. 11b: Pour un observateur dans un autre point, il semble que tout s'éloigne de lui: il n'y a pas de centre de l'univers

supposons que tout le temps depuis le Big Bang est comprimé en un an du 1er janvier au 31 décembre (voir la figure 12).

En avril, notre Voie lactée a été formée. En août, le soleil s'est formé, et la Terre était sphérique vers la fin du mois. Mais ce n'est qu'en octobre que l'oxygène est apparu dans notre atmosphère. Bien que des cellules vivantes très simples apparaissent sur Terre immédiatement, les cellules nucléées apparaissent le 2 décembre et le 12 décembre, les premiers organismes multicellulaires sont présents. Le 19, le premier poisson apparaît, tout comme les plantes, les insectes et les amphibiens, du 21 au 22. Le 25, les dinosaures apparaissent, jusqu'au 28 du mois. Le 30, les mammifères vivent sur Terre, mais ce n'est que le 31 décembre, à 23 heures, c'est l'homme qui apparaît. À 11h57, l'homme de Néanderthal a disparu, et la peinture des grottes d'Altamira a eu lieu à la dernière minute. Cinq secondes avant minuit, Jésus-Christ est né. Le siècle dernier correspond au deux derniers dixièmes de seconde.

Radiation du fond cosmique micro-ondes

Au début, à des températures très élevées, les quatre forces que nous connaissons maintenant étaient uni-

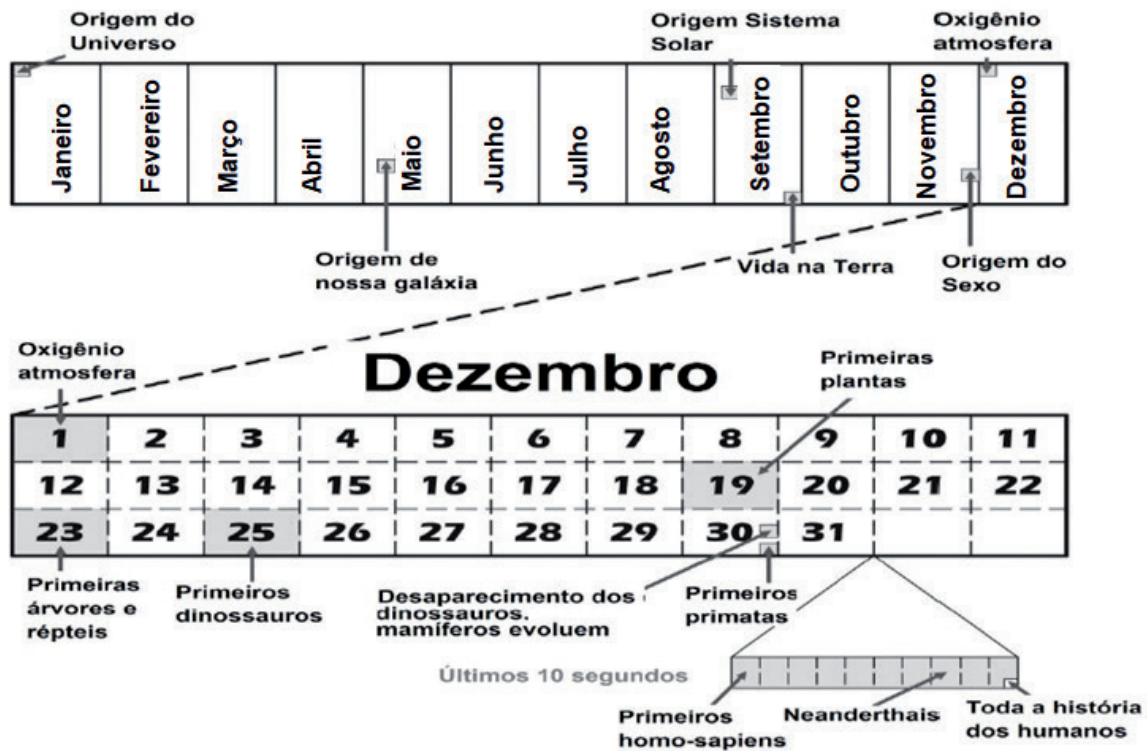


Fig.12: Le calendrier cosmique. L'histoire de l'Univers a été compressée à un an. Toute l'histoire enregistrée (civilisation humaine) se produit au cours des 21 dernières secondes.

raient être la cause du problème, mais ils n'ont pas pu éliminer ce bruit de fond.

Ils ont conclu qu'il venait d'un émetteur, qui avait une température de 2,7 Kelvin - la température actuelle de l'univers - et n'était pas dans un endroit particulier.

C'était l'univers lui-même qui émettait ce rayonnement de fond cosmologique de Dicke. Dans Tout le monde

Ce rayonnement de fond a d'abord été détecté en 1964 par Penzias et Wilson aux États-Unis. Ils essaient d'éliminer tout le bruit dans leur radiotélescope lorsqu'ils ont capté une émission de longueur d'onde de 7,35 cm qui s'est révélée être toujours présente, quel que soit l'endroit où l'énorme antenne pointait. Ils ont passé en revue toute l'installation et ont même pensé que certains oiseaux qui nichaient dans l'antenne pou-

raient être la cause du problème, mais ils n'ont pas pu éliminer ce bruit de fond.

Ils ont conclu qu'il venait d'un émetteur, qui avait une température de 2,7 Kelvin - la température actuelle de l'univers - et n'était pas dans un endroit particulier.

C'était l'univers lui-même qui émettait ce rayonnement de fond cosmologique de Dicke. Dans Tout le monde



Fig. 13: Au fur et à mesure que l'espace s'élargit, les photons se développent en longueur d'onde. C'est le rayonnement du fond micro-ondes.

peut le détecter avec un téléviseur analogique sur un canal gratuit: environ un point sur dix que vous voyez à l'écran provient de ce rayonnement de fond. Ces émissions sont dans le domaine des micro-ondes, semblables aux fours domestiques, mais avec très peu

d'énergie: il ne pourrait chauffer la nourriture que de 2,7 K. Bien que ce rayonnement soit remarquablement uniforme, G. Smoot, R. Mather et ses collègues ont pu voir de très légères variations dans les mesures effec

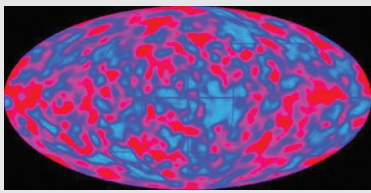


Fig. 14a: Image COBE

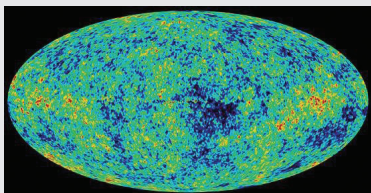


Fig. 14b: Image do WMAP.

tuées par le satellite COBE (figure 14a), à l'ordre du millionième d'un degré. Simultanément, ces fluctuations ont été détectées à partir du sol dans l'expérience de Tenerife à l'Institut d'Astrophysique des Îles Canaries. Et en 2001, la NASA a lancé le télescope WMAP pour étudier le rayonnement de fond avec beaucoup plus de résolution (figure 14b).

ABien que petites, ces variations sont les empreintes de morceaux de matière à partir desquels les galaxies ont commencé à se former. Nous ne savons pas ce qui a causé ces fluctuations de densité. Ce que nous pouvons dire, c'est que les «rides» se sont produites dans cette zone, et la condensation a commencé à se produire dans les proto-galaxies seulement quelques centaines de millions d'années après le Big Bang. Presque simultanément, les premières étoiles se sont formées dans ces premières galaxies.

Activité 7: Détection du rayonnement de fond cosmique micro-ondes

Environ 300 000 ans après le Big Bang, les photons ont été séparés de la matière et ont commencé à voyager librement dans l'univers. Lorsque l'espace s'est développé, ces photons ont augmenté leur longueur d'onde. Maintenant, nous estimons qu'ils ont une longueur d'onde d'environ 2 mm, ce qui correspond à la zone des micro-ondes, et est équivalent à celui émis par un corps noir qui sont à 2,7 degrés Kelvin. Penzias et Wilson, en 1964 ont d'abord détecté le rayonnement de fond cosmique de micro-ondes, un rayonnement relique qui vient très uniformément de toutes les di-



Fig 15: Certains des points d'un écran de télévision analogique sans connexion provient du fond micro-ondes.

rections. Le satellite COBE (figure 14a) et plus tard le WMAP (figure 14b) ont effectué une mesure très précise de ce rayonnement dans toutes les directions, détectant de minuscules variations d'une région à l'autre, correspondant à ce qui était alors des grappes de galaxie.

Nous pouvons également détecter ce rayonnement de fond avec un téléviseur simple (figure 15). Pour ce faire, régler le téléviseur sur un canal vide analogique. L'image est composée d'une multitude de points en constante évolution. Environ 10%, c'est-à-dire qu'un sur dix provient du rayonnement de fond de l'univers. provenientes da radiação do Universo.

Pourquoi la nuit est sombre?

C'était le titre d'un article intéressant que l'allemand

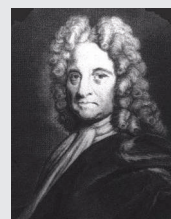


Fig. 16a: Johannes Kepler, Fig. 16b: Edmund Halley



Fig. 16c: Heinrich Olbers y Fig. 16d: Edgar Allan Poe

1 Dans "Eureka", un essai scientifique publié en février 1848, il donne l'explication suivante du "vide" sombre parmi les étoiles observées : "Nous pouvons comprendre le vide que nos télescopes trouvent, dans d'innombrables directions, en supposant que la distance entre l'arrière-plan invisible est si immense qu'aucun rayon de lumière provenant de là ne nous a encore atteint.

Heinrich Olbers ait publié en 1823. Auparavant, en 1610, Kepler considéré ce fait comme une preuve que l'univers ne pouvait pas être infini. Edmund Halley, un siècle plus tard, a remarqué des zones particulièrement lumineuses dans le ciel et a suggéré que le ciel n'est pas uniformément brillant durant la nuit car, même si l'univers est infini, les étoiles ne sont pas uniformément réparties. L'écrivain Edgar Allan Poe (1809-49), a aussi écrit sur le sujet. Cependant, le problème est rentré dans l'histoire comme étant le paradoxe d'Olbers. La réponse pourrait sembler être banale, mais certainement pas après avoir lu l'article d'Olbers.

Le raisonnement d'Olbers conduit en effet à la conclusion paradoxale que le ciel nocturne devrait être aussi brillant que le jour le plus lumineux. Voyons le raisonnement.

Le raisonnement d'Olbers reposait sur les principes suivants:

- 1.- L'Univers est infini en distance.
- 2.- Les étoiles sont réparties de manière plus ou moins uniforme dans tout l'univers.
- 3.- Toutes les étoiles ont une luminosité moyenne similaire à travers l'univers.

Regardez l'univers à partir de la Terre. Supposons une première coquille sphérique d'étoiles dans le ciel à une distance R_1 . Le nombre d'étoiles qu'il contient sera N_1 . Supposons une seconde enveloppe sphérique à une distance supérieure à R_2 . Chacune de ses étoiles éclairera la Terre beaucoup moins, mais la couche est plus grande et contient plus d'étoiles. Selon le principe selon lequel l'intensité de la lumière diminue proportionnellement à $1 / R^2$ et diminue proportionnellement à la surface de la couche. On en déduit que le

nombre d'étoiles augmente comme R^2 . La conclusion est que la deuxième couche illumine la Terre autant que la première. Et selon le principe n° 1, il existe une infinité de couche, donc la conclusion est que le ciel devrait apparaître brillant la nuit. Observemos o Universo a partir da Terra. Suponhamos

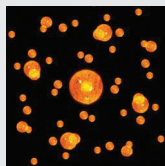
Une autre façon de le dire: si nous observons le ciel nocturne, où il y a d'innombrables étoiles, notre œil devrait toujours voir la surface d'une étoile, et donc un endroit lumineux. Cela est vrai pour n'importe quel endroit du ciel qui devrait apparaître totalement brillant.

Évidemment, ce n'est pas vrai. Ce paradoxe d'Olbers a causé beaucoup de controverse et n'a pas pu être résolu correctement avant le début du XXe siècle avec la théorie du Big Bang. En effet, avec l'expansion de l'univers, la lumière des étoiles éloignées est à un plus grand décalage vers le rouge, et ce, de façon d'autant plus importante que les étoiles sont loin. Cela implique un affaiblissement de l'intensité du rayonnement

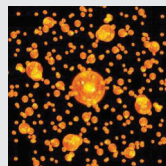
Nous savons aussi que plus l'étoile est éloignée, plus il y a longtemps, que la lumière a été émise, nous la voyons dans un état antérieur. Les étoiles les plus éloignées ont été formées peu de temps après le Big Bang, mais nous ne pouvons pas en observer plus parce qu'il n'y a pas de couches infinies d'étoiles - le principe n° 1 est également faux.

Lentilles gravitationnelles

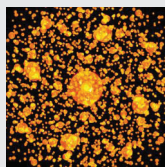
La lumière suit toujours le chemin le plus court possible entre deux points. Mais si une masse est présente, l'espace est courbé et le chemin le plus court possible est une courbe comme on le voit sur la figure 18a. Cette idée n'est pas difficile pour les étudiants. On peut facilement le montrer sur un globe terrestre (figure 18c).



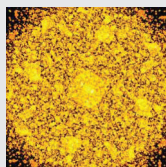
La lumière provenant des étoiles voisines



Mais il y a aussi d'autres étoiles qui nous envoient leur lumière



Plus loin, plus d'étoiles



Nous devons atteindre la lumière d'une étoile

Fig. 17: par wikimedia commons



Fig. 18a et 18b: si l'espace est courbé, le chemin le plus court entre deux points est une courbe.



Fig. 18c: Le chemin le plus court au-dessus de la surface terrestre n'est pas une ligne droite

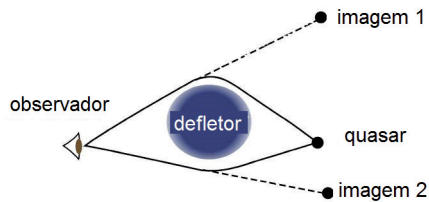


Fig. 19a: L'observateur voit deux images, car il semble que la lumière provienne de deux endroits différents.

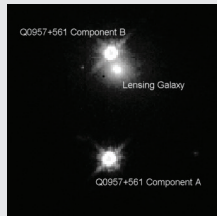


Fig. 19b: image de l'image double quasar Q0957 + 561. Le déflecteur est la galaxie proche du composant B

De toute évidence, ils peuvent comprendre que, à la surface de la Terre, la distance entre deux points suit toujours une courbe

En général, nous pouvons imaginer une lentille gravitationnelle comme une lentille ordinaire, mais dans laquelle la déviation de la lumière est produite par une grande masse qui se trouve dans le chemin de la lumière, appelée déflecteur (figure 19a). Les lentilles gravitationnelles produisent une courbure dans les faisceaux de lumière qui sont émis par des objets astronomiques. Si ces objets sont des sources ponctuelles (étoiles ou quasars), ils apparaissent à un endroit différent d'où ils se trouvent réellement, ou parfois même des images multiples de l'objet sont produites (figure 19b). Si les

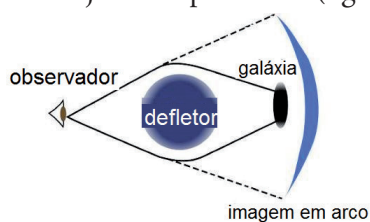


Fig. 20a: Si le corps dévié est un objet étendu, les images obtenues sont un ensemble d'arcs lumineux ou une sonnerie complète



Fig. 20b: Arcs lumineux géants formés par le groupe de galaxies Abell 2218



Fig. 20c: Anneau complet d'une galaxie derrière le déflecteur.

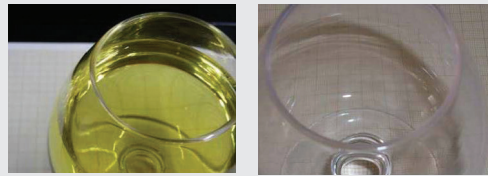


Fig. 21a et 21b: on ne peut voir la distorsion du papier graphique que si le verre est plein

objets émettant sont étendus (par exemple, galaxies), les images apparaissent déformées en arcs lumineux (figures 20a, 20b et 20c).

Activité 8: Simulation de lentille gravitationnelle avec un verre de vinaigre

Nous pouvons simuler une lentille gravitationnelle à l'aide d'un verre de vinaigre. Cette expérience vous permet de "montrer" comment la matière peut introduire des distorsions dans les images observées. Mainte-

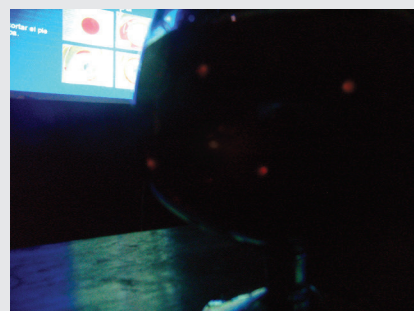


Fig. 22a: Le faisceau de la lampe de poutre est déformé comme un arc entre deux points rouges lumineux, la fig. 22b: comme un rectangle amorphe, et la fig. 22c: la croix d'Einstein

nant, simulons l'anneau d'Einstein ou plusieurs images. Prenez une lampe de poche, placez-la de l'autre côté d'un verre plein de vinaigre ou de jus de raisin et observez le rayon de lumière qui la traverse. Il est facile de voir que cette simulation conduit à la «distorsion de l'espace» observée. Placez simplement le verre sur

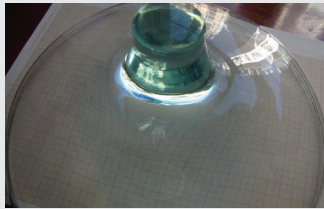


Fig. 23: Déformation de la grille

du papier millimétré et regardez le vinaigre (ou le jus de raisin). On voit la distorsion des lignes de grille (figures 21a et 21b).

Voyons maintenant comment simuler l'anneau d'Einstein ou la multiplicité des images. Il suffit de prendre une lampe de poche, de la placer de l'autre côté du verre de vin rouge et de voir passer le rayon de lumière.

En regardant le rayon de lumière, nous le déplaçons de droite à gauche et de haut en bas. Nous notons que la

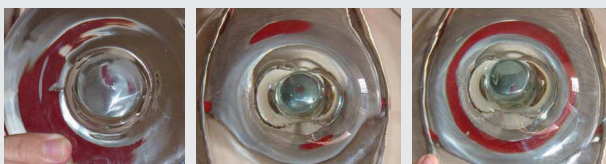


Fig. 24a, 24b et 24c: le pied en verre peut simuler diverses formes réalisées par des lentilles gravitationnelles: des segments d'arc, des images de points et des anneaux d'Einstein.

lumière n'est pas un point: le vinaigre produit des images à plusieurs reprises et, dans certains cas, des arcs. Ceci est une conséquence du verre qui agit comme un objectif qui déforme la trajectoire de la lumière. En particulier, nous pouvons parfois voir une figure amorphe, ou un point rouge vif, quatre points rouges ou un arc rouge entre les points (figures 22a, 22b et 22c).

Nous pouvons également simuler la lentille gravitationnelle à travers le pied en verre du verre à vinaigre. Si on place le pied du verre sur un papier millimétré et on le regarde, on peut voir la déformation de la grille (figure 23).

Déplacer le pied du verre lentement de droite à gauche au-dessus d'un objet (par exemple, un cercle rouge d'environ 3 cm), nous pouvons reproduire les formes

observées à travers les lentilles gravitationnelles (figures 24a, 24b et 24c).

Movendo lentamente a base da taça da direita para a esquerda sobre um objeto, por exemplo, um círculo vermelho de uns 3 cm, reproduziremos os diferentes objetos reais observados nas lentes gravitacionais (figuras 24a, 24b e 24c).

Bibliographie

Moreno, R. *Experimentos para todas las edades*, Ed. Rialp, Madrid, 2008.

Moreno, R. *Taller de Astrofísica*, Cuadernos ApEA, Antares, Barcelona, 2007.

Moreno, R. *Historia Breve del Universo*, Ed. Rialp, Madrid, 1998.

Moreno, A, Moreno, R. *Taller de Astronomía*, Ediciones AKAL, Madrid, 1996.

Riaza, E, Moreno, R. *Historia del comienzo: George Lemaitre, padre del Big Bang*, Ediciones Encuentro, Madrid, 2010.

Ros, R.M, "Experiments and exercises involving gravitational lenses", *Proceedings 1st ESO-EAAE Astronomy Summer School*, Barcelona, 2007.

Ros, R.M, *Gravitational lenses in th classroom*, Physics Education, 43, 5, 506, 514, Oxford, 2008

Sources Internet

<http://www.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/index.shtml>

<http://www.dsi.uni-stuttgart.de>

<http://georgeslemaitre.blogspot.com/>

Planètes et exoplanètes

Rosa M. Ros, Hans Deeg

Union Astronomique Internationale, Université Polytechnique de Catalogne (Barcelone, Espagne), Institut d'Astrophysique des Canaries et Université de La Laguna (Canaries, Espagne)

Résumé

Cet atelier fournit une série d'activités pour comparer les nombreuses propriétés observées sur les planètes dans notre Système Solaire (taille, distances, vitesses orbitales et vitesses de libération). Chaque section fournit diverses données planétaires en utilisant des démonstrations ou des calculs qui permettent de comparer les propriétés des planètes et d'expliquer aux étudiants la signification de chaque donnée.

Une activité de synthèse permet d'explorer et de comparer quelques propriétés de systèmes planétaires extrasolaires (extérieur à notre Système Solaire). Actuellement, plusieurs méthodes directes et indirectes sont utilisées pour trouver des exoplanètes. Il a été détecté presque 2000 planètes et environ 500 systèmes avec des planètes multiples. On montre un exemple d'une planète directement observée, dans la figure 1.



Fig. 1: la première planète observée par la méthode directe, 2M1207b, en 16 mars 2003. Sa masse est de 4 fois celle de Jupiter et elle est distante de son étoile naine brune de 46 ua. En 2006, un disque de poussière a été trouvé autour de l'étoile, et cela prouve que le processus de formation de cette planète est le même que celui observé autour des étoiles plus massive. (Photo : ESO).

Objetifs

- - Comprendre la signification de chaque donnée du système solaire observable sur le tableau
- Déduire les rayons orbitaux et les périodes orbitales des satellites galiléens de la planète Jupiter en utilisant une série de photos d'observations.
- - Calculer la masse de Jupiter à partir de la troisième loi de Kepler.
- - Comprendre les principales caractéristiques des systèmes planétaires extrasolaires en les comparant avec celles du système orbital de Jupiter et de ses satellites galiléens.

Le système solaire

En créant les modèles réduits du Système Solaire, les étudiants peuvent comparer les différents paramètres planétaires. Pour cela, nous utiliserons les données du tableau 1.

Planètes	Diamètre (km)	Distance au soleil (km)
Soleil	1 392 000	
Mercury	4 878	$57,9 \times 10^6$
Venus	12 180	$108,3 \times 10^6$
Terre	12 756	$149,7 \times 10^6$
Mars	6 760	$228,1 \times 10^6$
Jupiter	142 800	$778,7 \times 10^6$
Saturne	120 000	$1.430,1 \times 10^6$
Uranus	50 000	$2.876,5 \times 10^6$
Neptune	45 000	$4.506,6 \times 10^6$

Tableau 1: Les données des corps du système solaire.

Le but principal du modèle est d'en faire des données compréhensibles. Les distances exprimées en millions de kilomètres ne sont pas facilement appréhendables. Cependant, en les transformant en distances et tailles mesurables, les étudiants peuvent les comprendre plus facilement.

Modèle du système solaire

Modèle des diamètres

Utiliser un grand papier et couper un cercle de diamètre 139 cm qui représente le soleil, en prenant comme échelle 1cm représente 10000 km. Faire des planètes avec du papier dessin, sur lesquelles on dessine leurs caractéristiques morphologiques. En plaçant les planètes près du disque solaire, les étudiants peuvent saisir les différentes mesures planétaires.

Avec la même échelle (1 cm --- 10000km), utilisez les diamètres planétaires suivants : Soleil 139 cm, Mercury 0.5 cm, Venus 1.2 cm, Terre 1.3 cm, Mars 0.7 cm, Jupiter 14.3 cm, Saturne 12.0 cm, Uranus 5.0 cm et Neptune 4.9 cm.

Suggestion : Il est aussi possible de faire le modèle précédent en dessinant les planètes sur un pull, en gardant



Fig. 2a et 2b: exemples de pull dessiné avec les différentes planètes

la même échelle, et une fraction du Soleil.

Modèle des distances

En comparant les distances entre les planètes et le Soleil nous pouvons produire un autre modèle qu'il est facile d'installer dans n'importe quel lieu scolaire. D'abord, couper des bandes de carton de 10cm de large, et les relier pour obtenir une longue bande de plusieurs mètres (figure 3).

Ensuite, placer les modèles de planètes sur cette bande en respectant l'échelle 1cm pour 10000000 km (qui



Fig. 3: Maquette de distancias

est différente de celle choisie pour les diamètres). A rappeler aux étudiants qu'il ne faut pas utiliser la même échelle pour les deux mesures car avec l'échelle 1cm pour 10000000 km les planètes seraient mille fois plus petites. Les distances mesurées sont : Mercure 6cm, Vénus 11cm, la Terre 15cm, mars 23cm, Jupiter 78cm, Saturne 143cm, Uranus 288cm et Neptune 450cm.

Suggestion: une variation amusante de ce modèle est d'utiliser un rouleau de papier toilette. Par exemple, vous pouvez prendre comme échelle une partie de papier pour tous les 20 millions de km.

Modèle des diamètres et des distances

Le défi suivant est de combiner les deux activités et de faire un modèle tout en tenant compte des deux mesures : les distances et les diamètres. En fait, il n'est pas facile de définir une échelle qui nous permet de

représenter les planètes avec des objets qui ne sont pas trop petits à des distances qui ne sont pas trop grandes, auquel cas les tailles et les distances ne sont pas facilement assimilées et le modèle n'est pas très utile pour des étudiants. Suggestion: cela peut être une bonne idée d'utiliser la cour d'école pour faire le modèle et on représente les planètes par des boules de différents diamètres.

Un autre exemple de modèle : on représente le Soleil par un ballon de basket-ball de diamètre de 25 cm. Mercure est représenté par une tête d'épingle de diamètre 1 mm et est placé à une distance de 10 m. la planète Vénus est placée à une distance de 19 m et est représentée par une tête d'épingle de 2 mm, tandis que la Terre qui est représentée par la même taille que Vénus, est située à une distance de 27 m du Soleil. La planète Mars est représentée par une tête d'épingle de 1 mm et est placée à une distance de 41 m, à l'extrémité de la cour. Les autres planètes sont représentées à l'extérieur de l'école mais pas assez loin afin que les étudiants se



Fig. 4: le soleil et les planètes du modèle de diamètres et de distances

familiarisent à ces distances

La planète Jupiter est représentée par une balle de ping-pong de diamètre de 2.5 cm et est placée à une distance de 140 m. une autre balle de ping-pong de diamètre de 2 cm représentant Saturne est placée à une distance de 250 m. Finalement Uranus et Neptune sont représentées par des boules de 1 cm et sont situées respectivement à 300 m et 400 m du Soleil.

Il est à noter que ce modèle de système solaire ne peut pas être représenté dans n'importe quelle école et si on réduit les dimensions, on ne pourra pas modéliser les planètes. On pourra choisir une autre échelle pour faire un autre modèle du système solaire.

Modèle sur une carte de la ville

L'idée est simple : on va se servir d'une carte de la ville

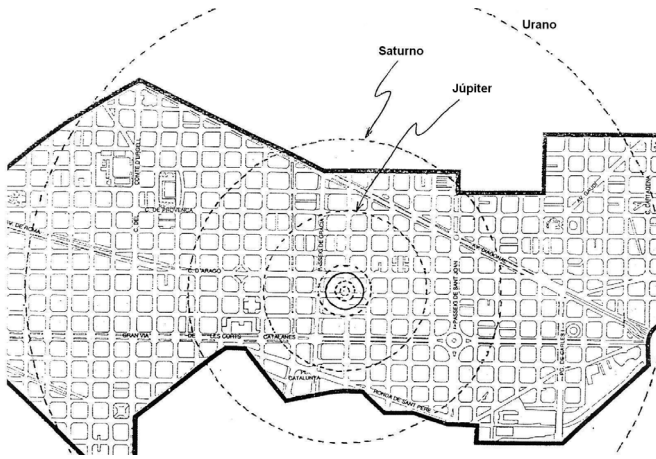


Fig. 5: carte de "Ensache de Barcelona" avec quelques planètes

pour placer les différentes planètes. A titre d'exemple : Le Soleil sera placé à l'entrée de l'école et nous pouvons représenter les planètes par des fruits et des légumes que nous placerons sur les rues de la carte de Barcelone. Vous pouvez refaire cette activité sur la carte de votre pays. En utilisant la carte de fig. 5, Mercure serait un grain de caviar, Vénus et la Terre seront deux ou trois pois, Mars serait un grain de poivre, Jupiter serait une orange, Saturne serait une mandarine et finalement Uranus et Neptune seront une paire de noix. Pour le Soleil, puisqu'il n'y a aucun légume assez



Fig. 6a et 6b: photos de la ville de Metz

grand, les étudiants devraient imaginer une sphère aurait grossièrement la taille d'un lave-vaisselle. L'instructeur peut faire la même activité en utilisant leur propre ville. Dans la ville de Metz (France), il y a un système solaire implanté dans ses rues et squares (carrés) et chaque planète est accompagnée d'un panneau de renseignements.

Modèle d'année-lumière

En astronomie, on utilise l'année lumière comme une unité de mesure de distance, qui peut souvent être confondue à une mesure de temps. Ce concept peut être illustré en utilisant un modèle du Système Solaire. La vitesse de la lumière est $c = 300\,000\text{ km/s}$, la distance parcourue par la lumière pendant une seconde est de $300\,000\text{ km}$. Par exemple, un voyage de la Lune à

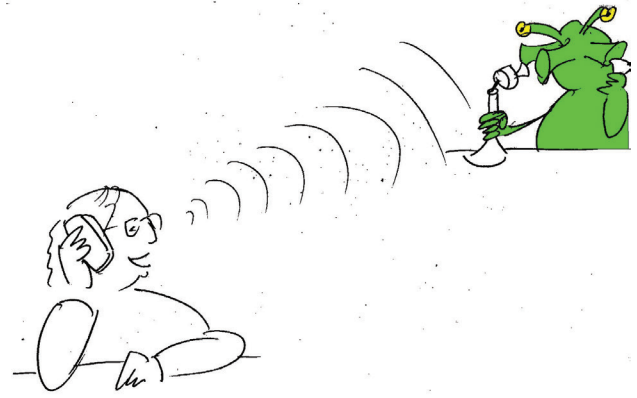


Fig. 7: autre exemple

la Terre, qui sont séparées d'une distance de $384\,000\text{ km}$, avec la vitesse de la lumière, $(384\,000\text{ km}/300\,000\text{ km/s} = 1.3\text{ secondes})$, dure 1.3 secondes.

En utilisant ces unités, nous chargerons les étudiants de calculer le temps nécessaire pour que la lumière du soleil parvienne à chacune des planètes du Système Solaire. (Pour l'instructeur, voici les temps nécessaires : le temps nécessaire pour que la lumière du soleil atteigne Mercure est de 3.3 minutes, Vénus est de 6.0 minutes, la Terre est de 8.3 minutes, Mars est de 12.7 minutes, Jupiter est de 43.2 minutes, Saturne est de 1.32 heures, Uranus est de 2.66 heures et Neptune est de 4.16 heures. Vous pouvez demander aux étudiants d'imaginer à quoi une conférence vidéo entre le Soleil et n'importe quelle planète ressemblerait. La plus proche étoile est Alpha Centaure qui est à une distance de 4.37 année lumière ou $4.13 \times 10^{13}\text{ km}$. Dans "le modèle de la cour scolaire", avec une échelle 1 cm pour $56\,000\text{ km}$, l'étoile serait à une distance de 7375 km !

Modèle de taille apparente du disque solaire de chaque planète

À partir de la Terre, le Soleil sous-tend un angle a (figure 8). Pour une valeur très petite de a , on a $\tan a \approx a$ avec a en radians..

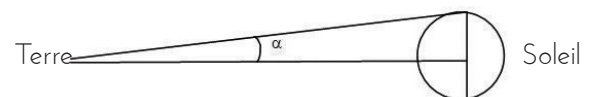


Fig. 8: vue de la Terre, le Soleil sous-tend un angle a .

Connaissant le diamètre du Soleil ($1.4 \times 10^6\text{ km}$) et la distance séparant le Soleil et la Terre, on en déduit en radians:

$$a = \text{tga} = \frac{0,7 \times 10^6}{150 \times 10^6} = 0,0045 \text{ radians}$$

En degrés:

$$\frac{0,0045 \times 180}{\rho} = 0,255^\circ$$

Vu de la terre, le soleil a un diamètre de demi-degré ($2 \times 0.255=0.51^\circ$), c'est le diamètre apparent du Soleil. En répétant le même calcul pour les autres planètes, on obtient les diamètres apparents du Soleil vus de chaque planète et qui sont représentés dans le figure 9

Planètes	$2 \tan a$	$2 a (^\circ)$	$2 a (^\circ)$ aprox
Mercuré	0,024	1,383	1,4
Vénus	0,0129	0,743	0,7
Mars	0,006	0,352	0,4
Júpiter	0,0018	0,1031	0,1
Saturne	0,000979	0,057	0,06
Uranus	0,00048	0,02786	0,03
Neptune	0,0003	0,0178	0,02

Tableau 2: la taille apparente du disque solaire à partir de chaque planète

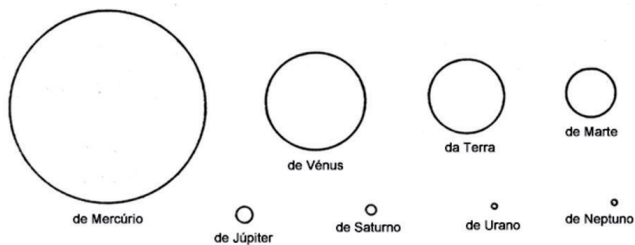


Fig. 9: le Soleil vu à partir des planètes suivantes: Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter Saturne, Uranus et Neptune

Modèle de densité

L'objectif de ce modèle est de trouver des échantillons de matière qui ont une densité semblable à celle de chacun des corps du système solaire, pour pouvoir "le sentir dans nos mains."

A partir da tabela 3, das densidades dos planetas, é simples comparar com as densidades de diversos minerais (em todas as escolas costuma haver uma coleção de materiais) ou nalguns casos usar amostras de outros materiais fáceis de encontrar, como o vidro, cerâmica, Avec les tableaux 3 et 4, on peut comparer les densités

	Densité (g/cm ³)
Soleil	1.41
Mercuré	5.41
Vénus	5.25
Terre	5.52
Lune	3.33
Mars	3.9
Jupiter	1.33
Saturne	0.71
Uranus	1.3
Neptune	1.7

Tableau 3: densité des corps du système solaire



Fig. 10: Modèle de densité

Minéraux	Densité	Autres matières	Densité
Plâtre	2.3	Glycérine	1.3
Feldspath	2.6	Liège	0.24
Sulfure	1.1-2.2	Aluminium	2.7
Sel	2	Fer	7.86
Quartz	2.65	Ciment	2.7 - 3.1
Borax	1.7	Verre	2.4 - 2.8
Blende	4	Étain	7.3
Pyrite	5.2	Argile	1.8 - 2.5
Erythrocytes	5.4	Bakélite	1.25
Calcite	2.7	Chêne	0.90
Galène	7.5	Pin	0.55

Tableau 4: Exemples des densités de quelques matières

planétaires avec celles des divers minéraux ou avec celles des échantillons d'autres matières qui sont faciles à trouver tels : le verre, la céramique, le bois, des plastiques, etc.

Il est très facile de calculer la densité d'un objet ne figurant pas dans le tableau 4. Prenez simplement une partie de cet objet, pesez-la pour trouver sa masse m et la mettre dans un verre d'eau pour mesurer son volume, V . La densité d sera :

$$d = \frac{m}{V}$$

Les étudiants devraient remarquer que Saturne "flotterait" sur l'eau, parce que sa densité est inférieure à celle de l'eau qui est égale à 1.

Modèle d'aplatissement des planètes

Pour visualiser l'aplatissement des planètes gazeuses qui est dû à la force centrifuge produite par leur rotation, nous construirons un modèle simple.

Comme indiqué sur la figure 11, avec un bâton et quelques bandes cartonnées, nous pouvons construire ce modèle simple qui reproduit l'aplatissement des planètes du Système Solaires en le faisant tourner.

1-Coupez des bandelettes en carton de longueur 35 cm et de largeur 1 cm.

2-Attachez ces bandelettes à un bâton cylindrique de longueur 50 cm. Attachez bien les parties supérieures au bâton pour qu'elles ne puissent pas se déplacer, mais laissez les parties inférieures se déplacer librement le long du bâton.

3-Faire tourner rapidement le bâton avec les deux mains, dans une direction et ensuite dans l'autre. Vous verrez comment la force centrifuge déforme les bandes



Fig. 11: Modèle de simulation de l'aplatissement des planètes

cartonnées (figure11) de la même façon qu'elle agit sur les planètes.

Modèle de périodes orbitales planétaires

Les planètes orbitent autour du Soleil avec des vitesses et des périodes orbitales différentes (tableau 5). Connaissant la période et la distance moyenne de la planète au Soleil, on peut déterminer sa vitesse orbitale moyenne. Voir exemple de la Terre, mais vous pouvez répéter le même raisonnement pour une autre planète.

$$\frac{L}{T} = \frac{2 \pi R}{T}$$

La Terre parcourt autour du Soleil une orbite de longueur $\epsilon L = 2 \pi R$, comme $v = L / T = 2 \pi R / T$



Fig. 12a, 12b et 12c: la simulation du mouvement circulaire des planètes.

Planètes	Période orbitale (jours)	Distance au Soleil (km)	Vitesse orbitale (km/s)	Vitesse orbitale (km/h)
Mercuré	87.97	57.9 10 ⁶	47.90	172440
Vénus	224.70	108.3 10 ⁶	35.02	126072
Terre	365.26	149.7 10 ⁶	29.78	107208
Mars	686.97	228.1 10 ⁶	24.08	86688
Jupiter	4331.57	778.7 10 ⁶	13.07	47052
Saturne	10759.22	1 430.1 10 ⁶	9.69	34884
Uranus	30.799.10	2 876.5 10 ⁶	6.81	24876
Neptune	60190.00	4 506.6 10 ⁶	5.43	19558

Tableau 5: les mesures orbitales des planètes du système solaire

et connaissant la période de sa révolution 365 jours donc $v=20582.750\text{km/j}$ ou $v=107.740\text{ km/h}$ ou $v=29.9\text{ km/s}$. La distance Terre Soleil est de $R = 150\ 106\text{ km}$. Nous soulignons que le Soleil tourne aussi autour du centre galactique avec une vitesse de 220 km / s , ou $800,000(800\ 000)\text{ km / h}$.

La planète la plus rapide et la plus proche du Soleil est Mercure, et la planète la plus lente et la plus éloignée du Soleil est Neptune. Les Romains avaient déjà remarqué que Mercure était la plus rapide de toutes et donc elle a été identifiée comme la messagère des dieux et a été représentée par des pieds ailés. Une période orbitale ou une année sur Mercure dure seulement 88 jours. Même à l'œil nu, vous pouvez observer que Jupiter et Saturne se déplacent beaucoup plus lentement, à travers les constellations du zodiaque, que Vénus et Mars.

Il y a aussi une autre façon simple pour éprouver la relation entre la distance et la période orbitale.

Nous commençons en liant un lourd objet, comme une noix, à une corde. En tenant le bout de la corde et on tourne en mouvement circulaire au-dessus de nos têtes. Nous pouvons alors voir que si la corde était longue, l'objet prend plus de temps pour faire une orbite complète. Au contraire, si nous prenons une corde plus courte, il prend moins de temps.

Nous pouvons alors développer un modèle de système solaire avec des noix et des cordes dont les longueurs sont proportionnelles aux rayons des orbites planétaires (supposées circulaires). Cependant, au lieu de couper des morceaux séparés pour chaque planète, prenez une corde d'une longueur d'environ 20 cm. Ensuite, mesurez la distance correcte du lourd objet et faites un nœud à ce point. Alors, la corde peut être tenue à l'emplacement du nœud en faisant tourner le lourd

Planète	R équatorial (km)	Densité g/cm ³	g gravité superficielle (m*s ⁻²)
Lune	1738	3.3	1,62
Mercure	2439	10	3,70
Venus	6052	5.3	8,87
Terre	6378	5.5	9,81
Mars	3397	3.9	3,71
Jupiter	71492	1.3	24,8
Saturne	60268	0.7	8,96
Uranus	25559	1.2	8,69
Neptune	25269	1.7	11,00

Tableau 6: rayon, densité et la gravité de chaque planète du système solaire

objet.

Application : tenez une des cordes à l'emplacement du nœud et la faites tourner au-dessus de vos têtes avec une vitesse minimale de façon à la garder en orbite. Vous verrez que l'objet a besoin de moins de temps pour faire une révolution complète quand le rayon est plus petit.

Modèle de la gravité superficielle

La formule de la force de gravitation

$$F = G \cdot \frac{Mm}{d^2}$$

nous permet de calculer la gravité superficielle g qui agit sur la surface d'une planète de masse M . Considérant une masse $m = 1\text{kg}$ sur la surface de la planète et $d = R$, avec R le rayon de la planète, nous obtenons la

$$G = \frac{GM}{R^2}$$

où g , s la gravité superficielle, tem o valor de $6,67 \times 10^{-11}\text{ m}^3\text{ kg}^{-1}\text{ s}^{-2}$. Si on remplace la masse de planète par,

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$$

où ρ est la densité de la planète et R son rayon, nous trouvons:

$$g = \frac{4}{3} \pi G \rho R$$

En remplaçant ces deux dernières variables ρ et R par les valeurs inscrites dans le tableau 6 (en convertissant le rayon en mètre et la densité en kg/m^3 , avec $1000\text{ kg/m}^3 = 1\text{ g/cm}^3$), nous pouvons calculer la valeur de la gravité superficielle g pour toutes les planètes.

$$g_{\text{mercure}} = \frac{4}{3} \pi \times G \times 2439 \times 10^3 \text{m} \times 5400 \text{kg m}^{-3} = 3.7 \text{ m s}^{-2}$$

Planète	g gravités superficielles (m*s ⁻²)	g gravités superficielles (relative à la Terre)
Lune	1,62	0,16
Mercure	3,70	0,37
Venus	8,87	0,86
Terre	9,80	1,00
Mars	3,71	0,38
Jupiter	23,12	2,36
Saturne	8,96	0,91
Urane	8,69	0,88
Neptune	11,00	1,12

Tableau 7: la gravité absolue et relative des planètes du système solaire

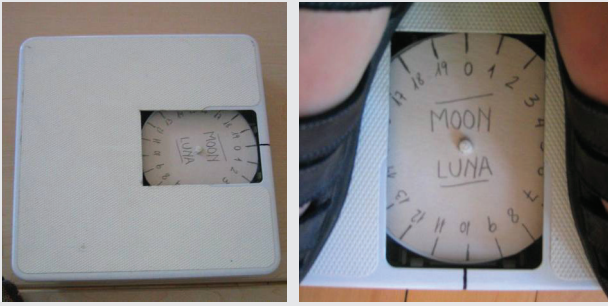


Fig. 13a et 14b: pèse-personne avec disque remplacé



Fig. 14: modèle de pèse-personne dans le système solaire

$$g_{\text{vénu}} = \frac{4}{3} \pi \times G \times 6052 \times 10^3 \text{ m} \times 5300 \text{ kg m}^{-3} = 8.9 \text{ m s}^{-2}$$

De même nous pouvons calculer g pour le reste des planètes. Dans le tableau 7, la gravité de chaque planète est calculée par rapport à celle de la Terre et indiquée par la lettre g .

Modèle de pèse-personne

Le but de ce modèle est de développer un ensemble de 9 pèse-personnes (8 planètes et la Lune) qui permettent aux étudiants de se peser sur chacune des planètes et sur la Lune.

Puisque le processus est le même pour chaque planète, nous décrivons seulement un d'entre eux. L'idée, essentiellement, est d'ouvrir un pèse-personne et remplacer le disque de poids avec un autre calibré pour une planète particulière.

1. D'abord, nous ouvrons le pèse-personne. Dans la plupart des balances, il y a deux ressorts qui sécurisent la base. Rappelez-vous que nous devons le remettre quand nous refermerons le pèse-personne (figures 13a et 13b).

2. Une fois ouvert, le disque de poids devrait être enlevé et remplacé, ou dessiné avec les poids planétaires appropriés.

3. Dans le tableau suivant, nous avons la gravité superficielle de la Lune et des planètes du Système Solaire et leur gravité relative à la Terre. Ces valeurs sont celles



Fig. 15 a: simulation des cratères. Fig. 15 b: les cratères

que nous utiliserons pour convertir les unités de poids "terrestre" aux unités proportionnelles de poids sur d'autres planètes.

4. Finalement, nous refermons le pèse-personne et nous pouvons maintenant nous peser sur une des planètes. peso "terrestres" da balança para converter nos valores correspondentes a outro planeta (apenas é necessário fazer uma proporção, ou regra de três).

Modèle de cratères

La plupart des cratères dans le système solaire ne sont pas volcaniques, mais sont le résultat de bombardement des météorites sur les surfaces de planètes et des satellites.

Planète	R Rayon équatorial. (km)	g Réduction de la gravité en surface
Mercur	2.439	0,378
Venus	6.052	0,894
Terre	6.378	1,000
Mars	3.397	0,379
Jupiter	71.492	2,540
Saturne	60.268	1,070
Uranus	25.559	0,800
Neptune	25.269	1,200

Tableau 8 : Rayons et gravités de surface des corps du système solaire.

1. D'abord, couvrez le sol par des journaux, pour qu'il ne se salisse pas.
2. Mettre une couche de 2 à 3 cm de farine dans un plateau à l'aide d'un tamis pour que la surface soit très lisse.
3. Mettre une couche de quelques millimètres de cacao en poudre au-dessus de la farine à l'aide d'une passoire ou tamis (figure 15a).
4. D'une hauteur d'environ 2 mètres, laissez tomber un projectile : une cuillère de service de cacao en poudre. La chute laisse des marques semblables à celles des cratères d'impact (figure 15b).
5. Vous pouvez refaire l'expérience en variant la hauteur, le type, la forme, la masse des projectiles. Dans certains cas, vous pouvez même obtenir un cratère avec un sommet central

Modèle de la vitesse de libération

Si la vitesse de lancement d'une fusée n'est pas assez grande, la force de gravitation de la planète l'oblige à retomber sur la surface. Si la vitesse de lancement est assez grande, la fusée s'échappe du champ de gravitation de la planète. Calculons la vitesse à laquelle une fusée peut s'échapper, c'est-à-dire la vitesse minimale de lancement ou la vitesse de libération. Pour un mouvement uniformément accéléré :

Considerando as fórmulas do movimento uniformemente acelerado, onde e é o espaço percorrido e a a aceleração,

$$e = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t$$

$$v = a t + v_0$$

Avec a l'accélération et e la distance parcourue. Si nous remplaçons l'accélération par g et nous considérons que la vitesse initiale v_0 est nulle, nous constatons que sur la surface de la planète $R = \frac{1}{2} g t^2$, et, $v = g t$. Après élimination de la variable de temps, nous trouvons :

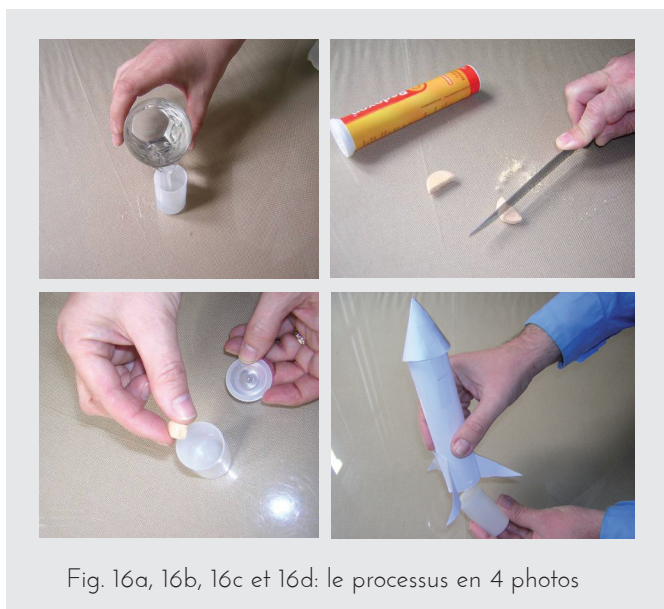


Fig. 16a, 16b, 16c et 16d: le processus en 4 photos

$$v = \sqrt{2 g R}$$

Nous remplaçons les valeurs g et R par les valeurs indiquées dans le tableau 6 et ce pour calculer la vitesse de libération de chaque planète. À titre d'exemple, nous calculons les vitesses de libération de quelques planètes. Pour la Terre:

$$v_{Terra} = \sqrt{2 g R} = \sqrt{2 \times 9,81 \text{ m s}^{-2} \times 6\,378 \times 10^3 \text{ m}} = 11\,186 \text{ m/s} \approx 11,2 \text{ km/s}$$

De même, pour la plus petite planète, Mercure:

$$v_{Mercúrio} = \sqrt{2 \times 3,78 \text{ m s}^{-2} \times 2\,439 \times 10^3 \text{ m}} = 4\,294 \text{ m/s} \approx 4,3 \text{ km/s}$$

Et pour la plus grande planète, Jupiter :

$$v_{Jupiter} = \sqrt{2 \times 23,1 \text{ m s}^{-2} \times 71\,492 \times 10^3 \text{ m}} = 57\,471 \text{ m/s} \approx 57,5 \text{ km/s}$$

Il est clair qu'il est plus facile de lancer une fusée de Mercure que de la Terre, mais il est le plus difficile de lancer une fusée sur Jupiter, où la vitesse de libération est environ 60 km/s.

Les vitesses de libération des différentes planètes du



Fig. 17 : Plusieurs fusées.

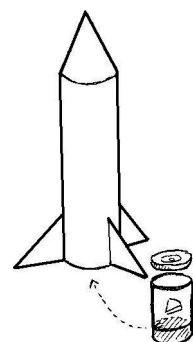


Fig. 18: Esquema simplificado

Système solaire sont les suivantes: Mercure 4.3 km/s, Vénus 10.3 km/s, Terre 11.2 km/s, Mars 5.0 km/s, Jupiter 59.5 km/s, Saturne 35.6 km/s, Uranus 21.2 km/s, Neptune 23.6 km/s.

Modèle d'une fusée avec un comprimé effervescent

On construit une fusée qui peut être lancée sans risque dans la salle de classe. Pour cela on propose une fusée qui utilise une aspirine ou un comprimé effervescent comme propulseur. Nous commençons par découper le modèle de fusée selon les lignes continues ensuite

nous collons les lignes pointillées comme dans la photo. Nous utiliserons une capsule en plastique, comme celle utilisée pour stocker des pilules ou la nourriture des poissons, en s'assurant que la capsule peut aller à l'intérieur du cylindre de la fusée. Ensuite, nous mettons les trois triangles comme des supports pour la fusée. Et finalement, nous ajoutons le cône sur le sommet du cylindre (figures 16a, 16b, 16c, 16d, 17, 18, 19a, 19b, 19c). Évidemment nous pouvons répéter plusieurs fois l'expérience (il reste $\frac{3}{4}$ de comprimé d'aspirine, amusez-vous en lançant des fusées!). C'est aussi possible d'utiliser du bicarbonate et du vinaigre.

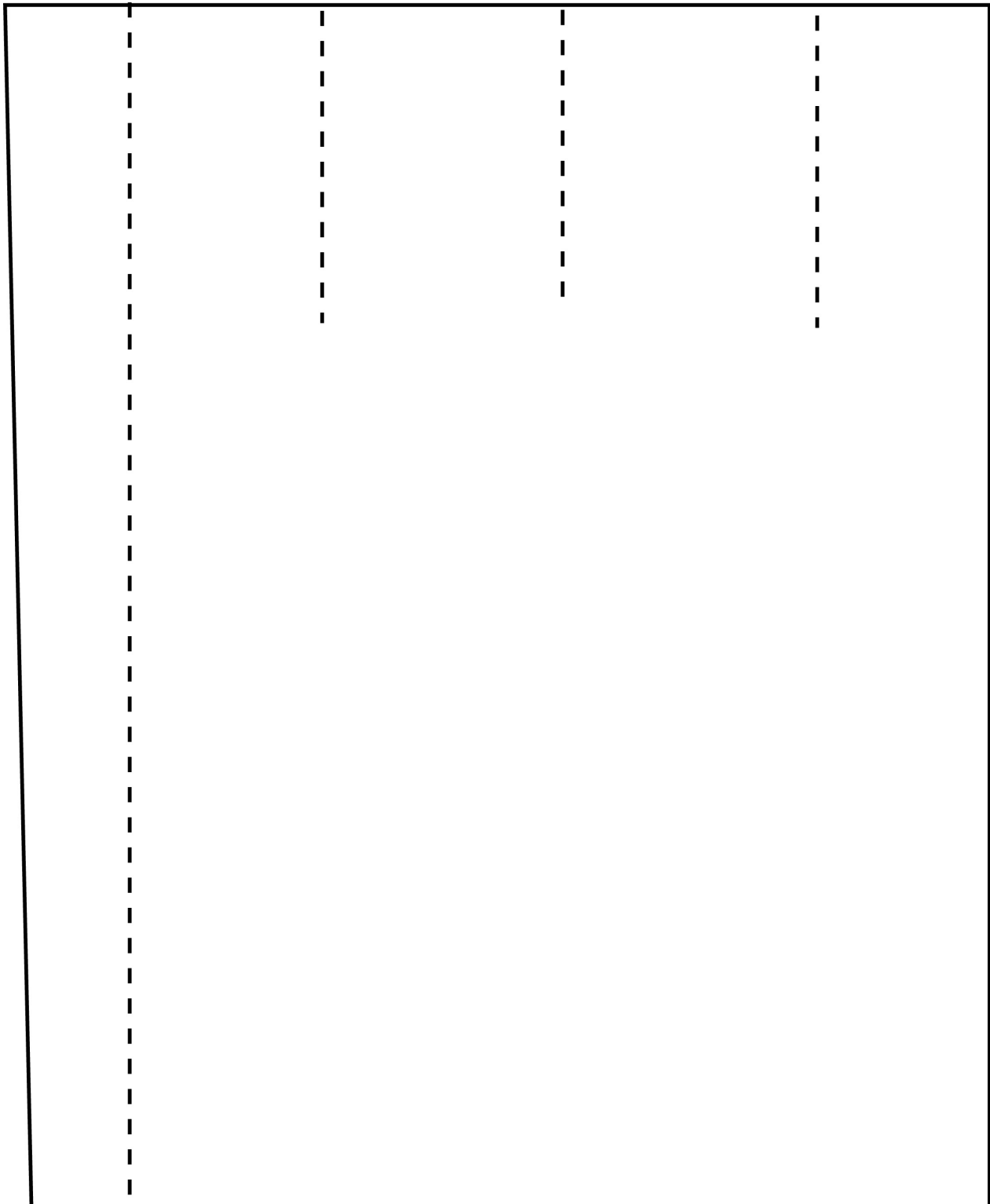


Fig. 19a : Corps de la fusée. Les nageoires doivent être collées dans la zone pointillée.

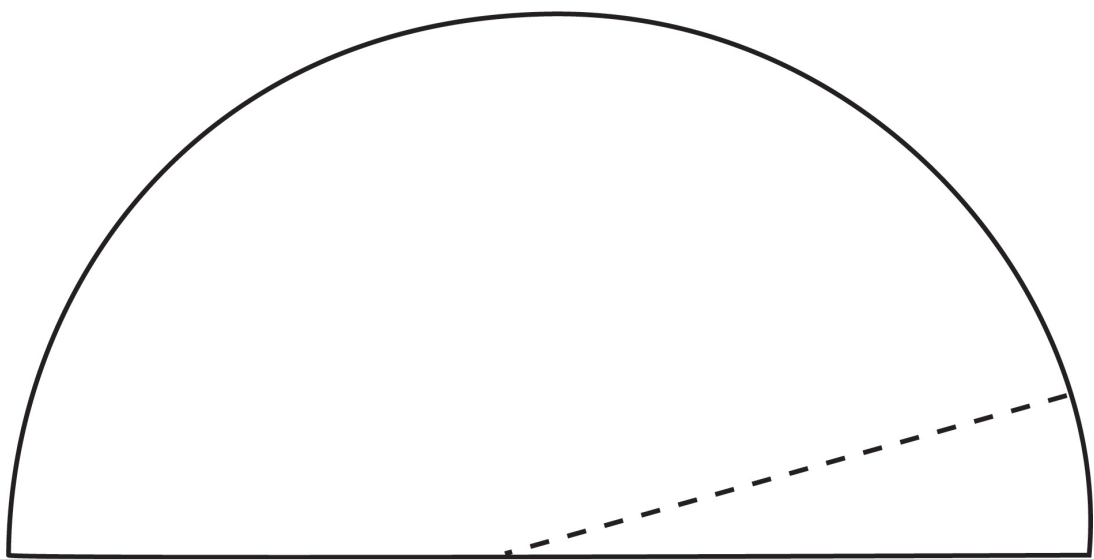
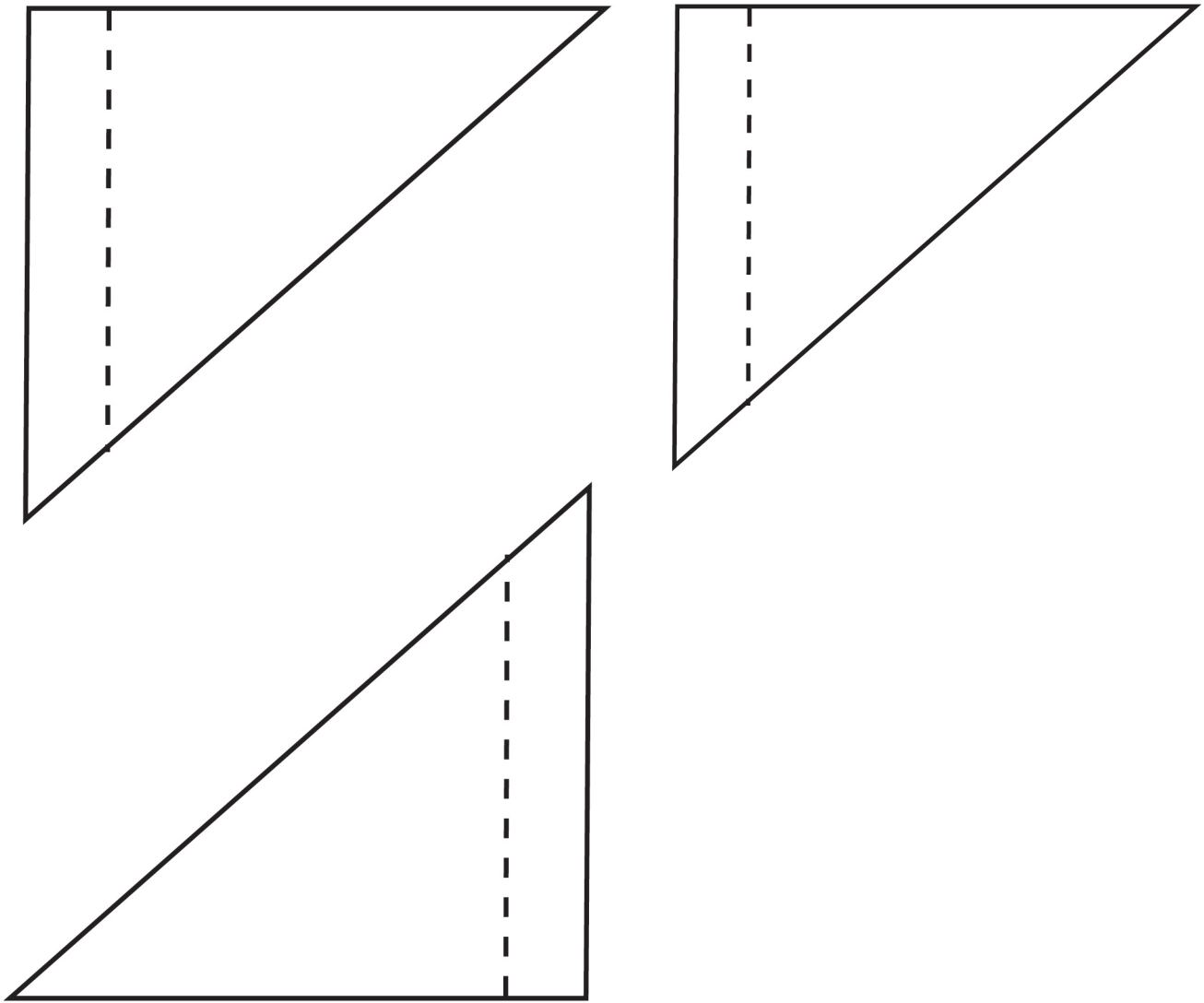


Fig. 19b: Modèle pour les trois ailes. Fig.19c: Partie cunéiforme dans la zone supérieure de la fusée.

Les modèles des systèmes des exoplanètes

La distance à Alpha Centaure, l'étoile la plus proche, est énorme comparée à la distance des planètes dans notre Système Solaire. En fait, Alpha Centaure est environ 10000 fois plus loin que Neptune, notre planète la plus éloignée. Ces grandes distances rendaient impossible la détection des exoplanètes jusqu'à ce que des techniques d'observation sophistiquées aient été développées, vers la fin du dernier siècle.

Introduction aux exoplanètes

Actuellement, deux méthodes sont dominantes dans la découverte d'exoplanètes. Toutes les deux sont des méthodes indirectes car la détection du système planétaire est déduite de l'observation de l'étoile centrale du système.

La méthode de la Vitesse Radiale (RV) a été la première méthode qui a permis de découvrir une exoplanète autour d'une étoile normale, avec la découverte de 51 Pégase b en 1995. Avec cette méthode, l'oscillation de l'étoile centrale en raison de son mouvement autour du

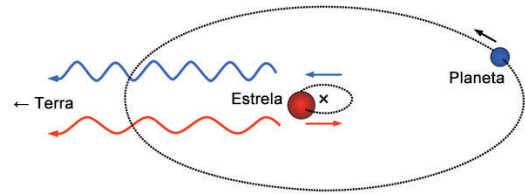


Fig. 20a: la méthode de la vitesse radiale

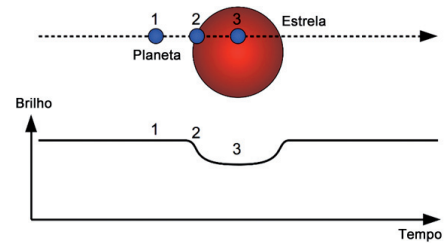


Fig. 20b: la méthode de transit

barycentre de planète d'étoile est mesurée. Ce mouvement de l'étoile centrale induit à des changements de la lumière de l'étoile soit un déplacement vers le rouge ou soit vers le bleu (l'image 20a), en raison de l'effet doppler. Avec cette méthode, nous pouvons déterminer la masse de la planète relativement à celle de

Nom de la planète	Distance orbitale en UA	Période orbitale en jours	La masse en masse Jupiter	L'année de la découverte	Rayon
Ups And b	0,059	4,617	0,69	1996	0,9 R_{Jup} , 62 000 km*
Ups And c	0,83	241,52	1,98	1999	1,2 R_{Jup} , 88 000 km*
Ups And d	2,51	1274,6	3,95	1999	1,5 R_{Jup} , 110 000 km*
Gl 581 e	0,03	3,149	0,006	2009	1,2 R_{T} , 8 000 km*
Gl 581 b	0,04	5,368	0,049	2005	2,5 R_{T} , 16 000 km*
Gl 581 c	0,07	12,929	0,016	2007	1,7 R_{T} , 11 000 km*
Kepler-62 b	0,0553	5,714932	<0,03	2013	1,3 R_{T} , 8 400 km*
Kepler-62 c	0,0929	12,4417	<0,013	2013	0,5 R_{T} , 3 400 km*
Kepler-62 d	0,12	18,16406	<0,044	2013	1,9 R_{T} , 12 000 km*
Kepler-62 e	0,427	122,3874	<0,113	2013	1,6 R_{T} , 10 000 km*

Tableau 8 : planètes des trois systèmes extrasolaires. Données des *Planètes Extrasolaires* du Catalog2 (sauf la dernière colonne). * Ces planètes supposées gazeuses ne transitent pas et leur diamètre a été calculé en supposant que la densité de la planète est égale à celle de Jupiter (1330 kg / m³). Pour les planètes considérées comme terrestres, le diamètre a été calculé en utilisant la densité de la Terre (5520 kg / m³).

Nom de la planète	Distance orbitale en UA	Période orbitale en jours	La masse en masse Jupiter	Rayon (km)
Mercurie	0,3871	0,2409	0,0002	2 439
Venus	0,7233	0,6152	0,0026	6 052
Terre	1,0000	1,0000	0,0032	6 378
Mars	1,5237	1,8809	0,0003	3 397
Jupiter	5,2026	11,8631	1	71 492
Saturne	9,5549	29,4714	0,2994	60 268
Uranus	19,2185	84,04	0,0456	25 559
Neptune	30,1104	164,80	0,0541	25 269

Tableau 9: planètes du système solaire

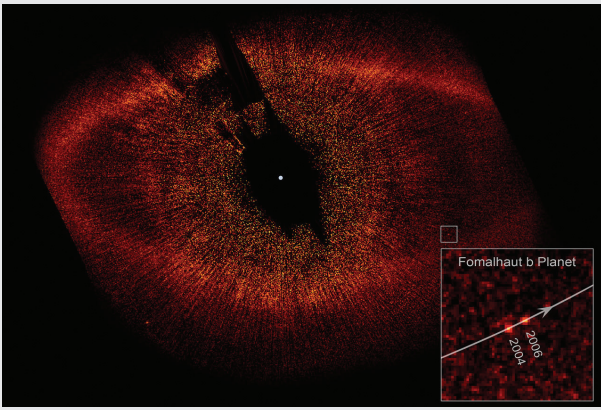


Fig. 21: Planète Fomalhaut b située dans un disque de débris, dans une image de Fomalhaut prise par le Télescope de Hubble (Photo: NASA).

l'étoile centrale. Cependant, en pratique, nous ne connaissons pas l'orientation de la plupart des systèmes planétaires détectés avec la méthode RV et les masses des planètes calculées pourraient être plus petites que les masses réelles. L'autre méthode importante, appelée 'la méthode de Transit' est basée sur l'observation de la variation de la luminosité de l'étoile quand une de ses planètes passe devant elle, ainsi occultant une petite partie de son disque stellaire (l'image 20b). Avec la méthode de transit, la taille d'une planète R_p , relativement à la taille de son étoile centrale R_* , peut être mesurée approximativement à partir de :

$$R_p / R_* = \sqrt{dF / F}$$

Avec dF/F la variation du flux de la lumière durant le transit de la planète ($dF/F = 0.01$ si la lumière de l'étoile diminue de 1%)

La NASA (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>) a réalisé un catalogue d'objets planétaires découverts à l'extérieur de notre propre Système Solaire. En 2016, il y avait plus que 3000 planètes confirmées. Ces planètes sont appelées des exoplanètes (abrégié des planètes extrasolaires). La nomenclature d'exoplanètes est simple. Une lettre est placée après le nom de l'étoile, on commence par la lettre "b" pour la nomenclature de la première planète trouvée dans le système (par exemple 51 Pegasi b). On marque les planètes suivantes détectées dans le système par les lettres suivantes de l'alphabet comme, c, d, e, f, etc (51 Pegasi c, d 51 Pegasi 51, Pegasi 51, Pegasi e ou f).

La plupart des planètes connues ont des masses comparables avec celle de Jupiter, qui est la plus grande planète dans notre Système Solaire. C'est pourquoi nous indiquons souvent les masses et les tailles des planètes extrasolaires par les unités de Masses de Jupiter M_{Jup} ($1,9 \times 10^{27}$ kg), et des Rayons de Jupiter

R_{Jup} (71 492 km). Il y a peu de planètes (environ 20) qui ont des masses comparables à celle de la Terre. Il y a cependant plusieurs planètes (environ 600, ou 20 % de toutes celles connues) qui ont des tailles comparables à celle de la Terre, jusqu'à un rayon supérieur à 1.5 R_T (Rayon de La Terre). On envisage que ces planètes soient les plus nombreuses, mais les techniques actuelles de détection permettent principalement la détection d'objets plus massifs ou plus grands.

Dans cette section, nous considérons quelques exemples de systèmes planétaires extrasolaires qui ont plus de trois planètes connues. Tableau 8 donne les planètes qui tournent autour des étoiles: Ups Andromeda, Gliese 581 et Kepler-62. On a découvert le système de planète d'Ups Andromeda et Gliese 581 avec la méthode de vitesse radiale et à partir des masses des planètes nous pouvons connaître les masses minimales des planètes, mais pas leurs tailles. Pour Gliese 581, la planète 'd' a été supprimée car sa découverte a été rétractée, cette erreur a été probablement causée par un faux signal parasitant les données. On a découvert les planètes du système Kepler-62 par la méthode de transits. De ce fait, on connaît leurs tailles. En ce qui concerne les masses, nous connaissons que seulement la masse maximale de l'étoile hôte. Ces planètes sont trop petites pour être détectables avec la méthode de la vitesse radiale. Il y a cependant beaucoup de planètes qui ont été détectées par les deux méthodes et nous connaissons leurs masses ainsi que leurs tailles.

Beaucoup d'exoplanètes sont très proches de l'étoile centrale, comme indiqué dans le tableau, avec des orbites beaucoup plus proches que celle de Mercure. D'autres ont des planètes plus éloignées (HD 8799 a un système de trois planètes qui sont aussi éloignées que la distance Neptune et le Soleil). Une méthode pour assimiler ces données est de construire les modèles réduits du système planétaire choisi. Ceci nous permet de facilement les comparer l'un par rapport à l'autre et avec notre Système Solaire. Aujourd'hui, nous savons qu'il y a des exoplanètes autour des différents types d'étoiles. En 1992, les radioastronomes ont annoncé la découverte des planètes autour du pulsar PSR 1257+12. La première détection d'une exoplanète autour d'une étoile de type solaire 'normale', 51 Pegasi, a été annoncée en 1995 et depuis d'autres exoplanètes ont été détectées en orbite autour de : l'étoile naine rouge (Gliese 876 en 1998), l'étoile géante (Iota Draconis en 2001), l'étoile naine brune (2M1207 en 2004), l'étoile de type «A » (Fomalhaut en 2008). Une planète parmi d'autres se désintègre autour d'une étoile naine blanche (WD1145-1017).

La détermination du diamètre des exoplanètes

Il y a des planètes qui ont été détectées autour d'Ups And par la méthode de vitesses radiales, et dont on ne savait pas la taille. Ici nous allons estimer les diamètres d'un couple d'exoplanètes du tableau 8.

En connaissant la densité des exoplanètes, on peut déterminer leur diamètre. Pour nos calculs, nous considérons que les planètes gazeuses ont la densité de Jupiter et que les exoplanètes terrestres ont la même densité que la planète Terre. Par définition, on donne la densité d'un objet de masse m : $\rho = m/V$. La masse m de l'exoplanète apparaît dans le tableau 8 et le volume V peut être obtenu en considérant que la planète est une sphère donc $V = 4 \pi R^3/3$ si nous remplaçons cette formule dans la précédente, nous obtenons le rayon de l'exoplanète :

$$R = \sqrt[3]{\frac{3m}{4 \pi \rho}}$$

Nous suggérons de calculer le diamètre de Gliese 581c (l'exoplanète terrestre) sa densité est $\rho = 5520 \text{ kg/m}^3$ celle de la Terre. Répétez alors le calcul pour une exoplanète non-terrestre comme le premier système planétaire multiple que l'on a découvert autour d'une étoile de la séquence principale, Upsilon Andromede. Ce système est composé de trois planètes semblables au Jupiter : Ups planètes b, c et d. Calculez leurs diamètres en prenant $\rho = 1330 \text{ kg/m}^3$ (la densité de Jupiter) et comparer les résultats avec ceux du tableau 8.

En utilisant ces résultats et la distance orbitale prise du tableau 8, nous pouvons produire un modèle dans la section suivante.

Détermination de la masse de l'étoile centrale

En utilisant les valeurs du tableau 8 et la troisième loi de Kepler, nous pouvons déterminer la masse de l'étoile centrale M . La troisième loi de Kepler nous dit que pour une planète ayant une période P et une orbite de rayon a , $a^3/P^2 = \text{constante}$. Nous pouvons montrer que cette constante est égale à la masse de l'étoile centrale, exprimée en masse solaire. Si nous considérons que le mouvement d'exoplanètes autour de l'étoile est circulaire et décrit un cercle de rayon a , nous pouvons écrire

$$m \cdot \frac{v^2}{a} = \frac{G M m}{a^2}$$

Pour un mouvement circulaire, la vitesse v est $v = 2 \pi a / P$. La période, P , d'un mouvement circulaire, est $P = 2 \pi a / v$. Alors, quand nous remplaçons par l'expression

de v nous aurons:

$$P^2 = \frac{4 \pi^2 a^3}{G M}$$

Et, pour chaque exoplanète, en utilisant la troisième loi de Kepler

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G M}{4 \pi^2}$$

Écrivant la relation précédente pour le mouvement de la Terre autour du Soleil, en prenant $P=1$ année et $a=1$ AU, nous déduisons l'équation suivante

$$1 = \frac{G M}{4 \pi^2}$$

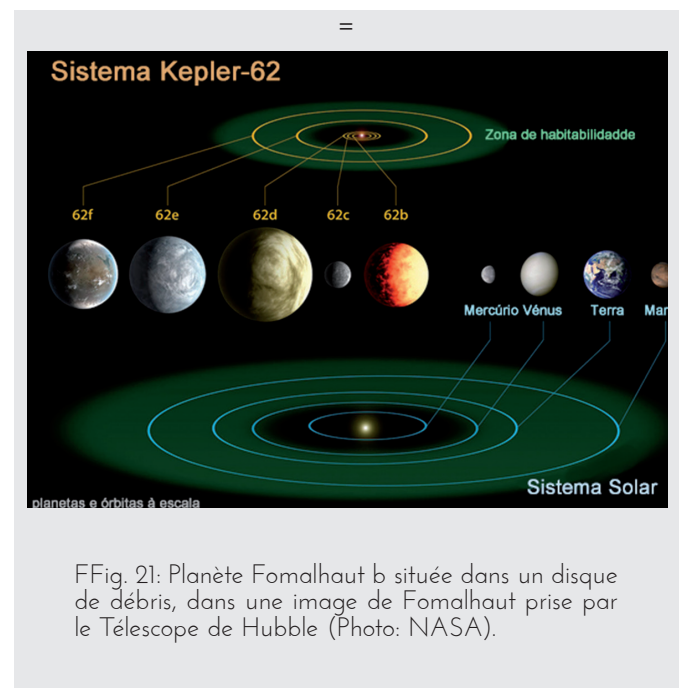
En divisant les deux dernières égalités et prenant la masse du soleil comme unité, nous obtenons

$$\frac{a^3}{P^2} = M$$

na est le rayon de l'orbite (en UA), P est la période de révolution (en années) et M est la masse de l'étoile centrale (en Masse Solaire). Cette relation nous permet de déterminer la masse de l'étoile centrale en unité de masse solaire. Par exemple, calculez la masse des étoiles Ups And et Gl 581 en masse solaire (le résultat devrait être égal respectivement à 1.03 et 0.03 masses solaires).

Modèle réduit d'un système exoplanétaire

D'abord, nous choisissons l'échelle du modèle. Pour les distances, l'échelle appropriée est : 1 UA correspond à 1 m. Dans ce cas, toutes les exoplanètes peuvent se contenir à l'intérieur d'une salle de classe typique, aussi



FFig. 21: Planète Fomalhaut b située dans un disque de débris, dans une image de Fomalhaut prise par le Télescope de Hubble (Photo: NASA).

bien que les cinq premières planètes de notre Système Solaire. Si l'activité est portée à l'extérieur (par exemple dans la cour d'école), nous pouvons construire un modèle complet. Une échelle différente doit être utilisée pour les tailles des planètes, par exemple : 10,000 km correspond à 0.5 cm. Dans ce cas, la plus grande planète Jupiter sera 7 cm de diamètre et la taille de la plus petite planète Mercure sera 0.2 cm. Maintenant nous pouvons construire le Système Solaire, ou n'importe lequel des systèmes en utilisant les valeurs de la distance orbitale des Tableaux 8 et 9 et les diamètres précédemment calculés. Pour les étoiles centrales, nous pouvons calculer leurs tailles à partir de la relation masse-rayon stellaire, avec R et le M en unités solaires,

$$R \sim 1,06 M^{0,945}$$

Et en utilisant ainsi la masse calculée dans l'exercice précédent.

Depuis des années, nous avons appris que la configuration d'un système planétaire varie d'un système à un autre. La partie intérieure du Système Solaire est peuplée par les planètes petites et rocheuses. La première planète gazeuse et géante, Jupiter, se situe à une distance de 5.2UA du Soleil. Cependant, plusieurs exoplanètes orbitent autour de leur étoile à des distances beaucoup plus petites que le rayon de l'orbite de la plus proche planète de notre propre Système Solaire. Cela signifie qu'elles sont très chaudes. Une autre différence est que la plupart de ces exoplanètes sont des géantes planètes gazeuses.

Ces différences sont supposées résulter principalement d'un biais d'observation. La méthode de la vitesse radiale favorise la détection des planètes massives et relativement proches de leur étoile. Alors que la méthode de transit est plus susceptible de détecter les planètes les plus proches de leur étoile centrale. Mais, nous pouvons supposer que la plupart des exoplanètes ont de grandes orbites. Il semble plausible que dans la plupart des systèmes exoplanétaires, il y a une ou deux planètes géantes avec des orbites semblables à celles de Jupiter et Saturne. Nous nous attendons, ainsi, qu'une grande fraction d'étoiles ait des planètes semblables à la Terre et sur des orbites semblables à celle de la Terre. Leur détection est cependant très difficile et pour cela, on en connaît très peu.

Habitabilité des exoplanètes

La zone habitable est la région autour d'une étoile où une planète a une pression atmosphérique suffisante pour maintenir l'eau liquide sur sa surface. Ceci est

une définition conservatrice et restreinte à la vie terrestre. Quelques scientifiques ont suggéré d'inclure des zones équivalentes autour des étoiles où d'autres solvants composés, comme l'ammoniac et le méthane pourraient exister en forme liquide stable.

Les calculs rapides indiquent que la zone habitable du système solaire, où l'eau liquide peut exister (c'est-à-dire où la température s'étend de 0 ° À 100 ° C), s'étend de 0.7 à ~2 UA. Le bord intérieur de cette zone est près de l'orbite de Vénus et le bord extérieur est près de l'orbite de Mars (la zone verte dans la figure 22). Cependant, il existe plusieurs autres estimations pour la zone habitable du Système Solaire (voir Wikipédia sur la Zone Habitable). Une récente estimation, donnée par Kopparapu en 2013, place le bord intérieur de cette zone à une distance de 0.99 UA, juste à l'intérieur de l'orbite de la Terre. Alors que dans cette zone, seulement la Terre est habitée, Vénus est trop chaude en raison de l'effet de serre, tandis que Mars n'a pas d'eau sur sa surface et Il pourrait avoir une certaine vie microbienne très basique. Connaissant l'énergie dégagée d'une étoile et la zone habitable de notre Système Solaire, nous pouvons facilement déterminer la zone habitable d'autres systèmes de planète. On donne une liste de planètes potentiellement habitables dans <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>.

La zone habitable est la région autour d'une étoile où une planète a une pression atmosphérique suffisante pour maintenir l'eau liquide sur sa surface. Ceci est une définition conservatrice et restreinte à la vie terrestre. Quelques scientifiques ont suggéré d'inclure des zones équivalentes autour des étoiles où d'autres solvants composés, comme l'ammoniac et le méthane pourraient exister en forme liquide stable.

De meilleurs exemples d'exoplanètes de types telluriques et se situant dans la zone habitable de leur étoile, sont les planètes Kepler 62 e et Kepler 62 f. Leurs rayons qui sont respectivement 1.61 et 1.41 rayon de la Terre, les classent dans la même catégorie que celle des planètes telluriques. D'autre part, leurs positions dans le système Kepler-62, dans la zone habitable, leur permet d'avoir de l'eau liquide sur leurs surfaces qui peut même les recouvrir complètement. Sur Kepler-62e, la planète qui se trouve à l'intérieur de la zone habitable, possède une couche de nuages réfléchissante ce qui réduit la radiation qui chauffe la surface. D'autre part, sur Kepler-62f, qui se situe à l'extérieur de la zone habitable, comme la planète Mars dans notre Système Solaire, des quantités significatives de dioxyde de carbone seraient nécessaires pour réchauffer suffisamment sa surface et pour y avoir de l'eau liquide. Considérant

les tailles de Mars et Kepler-62f , on peut se demander laquelle de ces planètes va, le plus probablement, héberger la vie et pourquoi ?

Il y a toujours beaucoup de questions sans réponses sur les propriétés et les caractéristiques des exoplanètes. Plusieurs missions spatiales actuelles et futures, comme Kepler de la NASA, les missions européennes TESS et CHEOPS et les missions PLATON dont le lancement est envisagé pour 2024, sont prévues pour répondre à ces questions.

.....

Bibliographie

Berthomieu, F., Ros, R.M., Viñuales, E., “Satellites of Jupiter observed by Galileo and Roemer in the 17th century”, *Proceedings of 10th EAAE International Summer School*, Barcelona, 2006.

Gaitsch, R., “Searching for Extrasolar Planets”, *Proceedings of 10th EAAE International Summer School*, Barcelona 2006.

Ros, R.M., “A simple rocket model”, *Proceedings of 8th EAAE International Summer School*, 249, 250, Barcelona, 2004.

Ros, R.M., “Measuring the Moon’s Mountains”, *Proceedings of 7th EAAE International Summer School*, 137, 156, Barcelona, 2003.

Vilks I., “Models of extra-solar planetary systems”, *Proceedings of 10th EAAE International Summer School*, Barcelona 2006.

Astrobiologie

Rosa M. Ros, Beatriz García, Alex Costa, Florian Seitz, Ana Villaescusa, Madelaine Rojas.

International Astronomical Union, Technical University of Catalonia, Spain, ITeDA and National Technological University, Argentina, Escola Secundária de Faro, Portugal, Heidelberg Astronomy House, Germany, Diverciencia in Algeciras, Spain, SENACYT, Panama.

Résumé

Cet atelier est essentiellement divisé en deux parties. Les éléments chimiques nécessaires à la vie, une étude simple du tableau périodique correspondant aux objectifs de ce travail et quelques concepts d'astrobiologie sont introduits.

Objectifs

- Comprendre d'où ou comment les différents éléments du tableau périodique proviennent
- Comprendre les principales caractéristiques des systèmes planétaires extra-solaires.
- Comprendre les conditions d'habitabilité nécessaires au développement de la vie
- Étudier les lignes directrices minimales de la vie en dehors de la Terre.

Formation des systèmes planétaires

Lorsqu'une étoile se forme à partir d'un nuage de gaz et de poussière, les restes du nuage autour de l'étoile continuent à former les planètes. De la même manière que nous pouvons connaître la composition de l'étoile en étudiant son spectre, la spectroscopie est utilisée pour déterminer l'atmosphère des exoplanètes.

Chaque élément chimique et chaque molécule a un spectre spécifique et unique. Dans certains systèmes, une planète passera devant son étoile. La lumière de l'étoile passera à travers l'atmosphère de la planète et l'absorption se produira. En observant les spectres lumineux des étoiles des systèmes exoplanétaires, on peut découvrir la composition chimique des atmosphères des planètes (figures 1 et 2).

Mais regardons un exemple de formation d'un système planétaire en utilisant une méthode d'implication des participants dans un modèle actif.

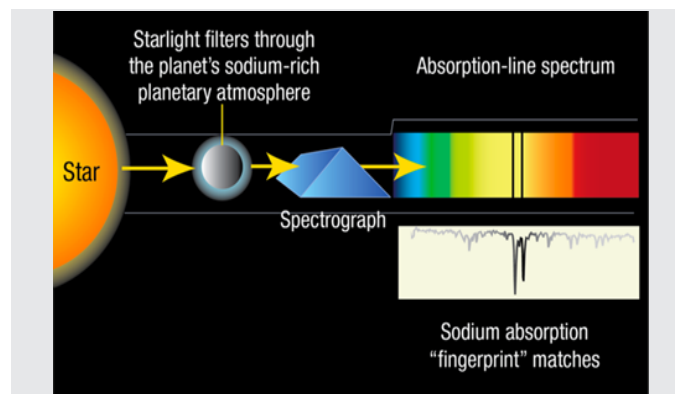


Fig. 1 : Spectroscopie appliquée à l'étude de l'atmosphère de la planète HD 209458b, avec la détection du sodium dans son atmosphère. Source Wikipedia / A. Feild (STScI) Caltech.

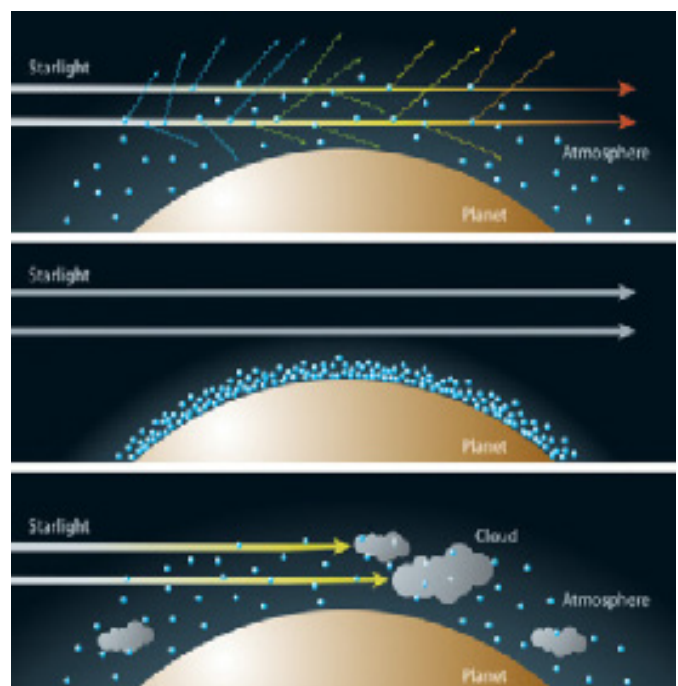


Fig 2 : Comment savoir s'il y a de l'eau ou même des molécules organiques dans l'atmosphère d'une planète ? Chaque élément chimique, chaque molécule, a un spectre spécifique et unique. En comparant les spectres de lumière des étoiles des systèmes exoplanétaires, nous pouvons découvrir exoplanète, si la lumière traverse finalement l'atmosphère correspondante.

Simulation de lentille gravitationnelle avec un verre de vinaigre

Le thème de cette activité est d'expliquer la formation du système solaire ou de tout autre système planétaire selon l'hypothèse nébulaire d'Emmanuel Kant (1755).

L'action consiste à diviser la classe en deux groupes facilement identifiables à l'œil nu, par exemple: le groupe des filles et le groupe des garçons (D'autres critères peuvent être pris en compte, mais celui-ci est généralement le plus simple). Chaque groupe a un rôle, les filles peuvent représenter le gaz et les garçons la poussière (ou inversement). S'il y a une différence substantielle dans le nombre de participants d'un groupe et de l'autre, il est recommandé que le groupe représentant le gaz soit celui qui contient le plus grand nombre de participants, car dans un système planétaire en formation, la masse du gaz est 100 fois supérieure à celle de la poussière.

Lorsque les participants écoutent l'histoire, ils font une action dynamique de ce qu'ils entendent, par exemple:

Texte de l'histoire:	Action des Participants:
Il était une fois un nuage de beaucoup de gaz et un peu moins de poussière.	Tous sont mélangés dans un nuage. Il y a plus de participants représentant le gaz. Dans le nuage, tous les participants se tiennent la main au hasard, formant ainsi un réseau.
Il était une fois un nuage de beaucoup de gaz et un peu moins de poussière.	Ils commencent à se séparer. Les participants représentant le gaz s'accablent au centre et ceux représentant la poussière se tiennent la main autour du centre.
Puis ce gaz a commencé à s'accablent au centre du nuage et autour de lui la poussière.	Ils se mettent à tourner, à bouger, à s'écraser, à vibrer, à sauter. Certains se mettent à tirer à la suite de tant de mouvements et d'autres « se sauvent », attrapent, embrassent ces particules par identification (gaz avec gaz et poussière avec poussière).
Il y avait beaucoup de mouvement, les particules de gaz attireraient le gaz et les particules de poussière attireraient la poussière.	Ceux qui sont au centre (gaz) s'accablent et autour d'eux les participants qui représentent la poussière dans une sorte de cercle se prennent par la main. Précision : tout le gaz n'est pas au centre, il y a du gaz éloigné en dehors du cercle.

Au centre, un noyau dense et opaque s'est formé, entouré d'un disque de poussière et de gaz.	Ceux qui sont au centre (gaz) s'accablent et autour d'eux les participants qui représentent la poussière dans une sorte de cercle se prennent par la main. Précision : tout le gaz n'est pas au centre, il y a du gaz éloigné en dehors du cercle.
Ce noyau est celui qui donnerait finalement naissance au Soleil ou à l'étoile mère d'un système extrasolaire.	Le Soleil ou l'étoile mère se met à briller, de sorte que ses rayons doivent être dirigés vers l'extérieur dans toutes les directions. Clarification: Au moment où le soleil ou l'étoile mère commence à briller, le gaz "libre" commence à s'éloigner.
Certaines petites planètes ont été formées par l'union de grains de poussière de plus en plus gros, puis de roches et ainsi de suite jusqu'à la formation de planètes terrestres.	Les participants représentant la poussière qui forme les planètes terrestres commencent à se regrouper. Clarification: toute la poussière ne reste pas sur les planètes terrestres, il doit y avoir un peu de poussière dans les régions les plus éloignées.
Les planètes géantes se sont formées loin de la chaleur du Soleil ou de l'étoile centrale où le gaz pouvait se rassembler sans entrave.	Le reste, les planètes géantes, commencent à se rassembler : beaucoup de gaz et un peu de poussière. Clarification: La baisse de température due à la plus grande distance du Soleil ou de l'étoile mère est la cause des principales différences entre les planètes rocheuses intérieures et les géantes extérieures.

Tableau 1 : L'histoire pour expliquer la formation d'un système planétaire.



Fig. 3: Tous sont mélangés dans un nuage. Il y a plus de participants représentant le gaz. Dans le nuage, tous les participants se tiennent la main de manière aléatoire, comme dans un réseau.



Fig. 4 : Les participants commencent à se séparer. Ceux qui représentaient le gaz se rassemblent au centre et ceux qui représentaient la poussière se tiennent la main à l'extérieur.



Fig. 5 : Les participants représentant la poussière qui forme les planètes terrestres commencent à se regrouper.



Fig. 6 : Le reste des participants commence à se rassembler pour former les planètes géantes : beaucoup de gaz et un peu de poussière.

Aspects chimiques de l'évolution stellaire

Ce tableau périodique nous permet de nous rendre compte que les éléments dont nous sommes faits ont été créés dans l'évolution des étoiles.

Dans le tableau périodique (figure 7), les différents éléments sont classés comme suit:

- 1) Éléments créés dans les premières minutes après le Big Bang. Au départ, l'Univers était essentiellement composé de l'atome le plus simple : l'atome d'hydrogène. Peu de temps après, cela a donné naissance à des éléments légèrement plus élaborés comme l'hélium, le lithium et le béryllium.
- 2) Les éléments qui sont formés dans les noyaux des étoiles par nucléosynthèse sont déjà un peu plus lourds, comme le Bore, le Carbone, l'Azote, l'Oxygène, le Fluor, le Néon, le Sodium, le Magnésium, l'Aluminium, le Silicium, le Phosphore, le Soufre, le Chlore, l'Argon, le Potassium, le Calcium, le Scandium, le Titane, le Vanadium, le Chrome, le Manganèse et le Fer.
- 3) Les éléments les plus lourds formés lors des grandes explosions de supernova constituent le reste du tableau. Certains d'entre eux sont instables mais peuvent être produits en laboratoire.
- 4) Les éléments synthétiques produits par l'homme en laboratoire et qui ne se trouvent pas dans la nature.

Classification des éléments du tableau périodique

Vous trouverez ci-dessous une liste d'objets qui devront être classés selon les trois niveaux dans trois paniers :

1. Éléments produits dans les premières minutes après le Big Bang (Panier bleu)
2. Éléments formés dans les étoiles (Panier jaune)
3. Éléments qui apparaissent dans les explosions de supernova (Panier rouge)

Il est nécessaire de placer dans un des trois paniers (bleu, jaune et rose) chaque objet de la liste suivante, selon sa constitution (tableau 2).

Les enfants des étoiles

Les éléments chimiques qui sont considérés comme essentiels à la vie présentent les caractéristiques suivantes:

- Une insuffisance de l'élément provoque des déficiences fonctionnelles (réversibles lorsqu'il est à nouveau dans les concentrations appropriées). When the organism lacks this element it does not grow or complete its life cycle.
- Cet élément influence directement l'organisme et est impliqué dans ses processus métaboliques.
- L'effet de cet élément ne peut être remplacé par aucun autre élément.

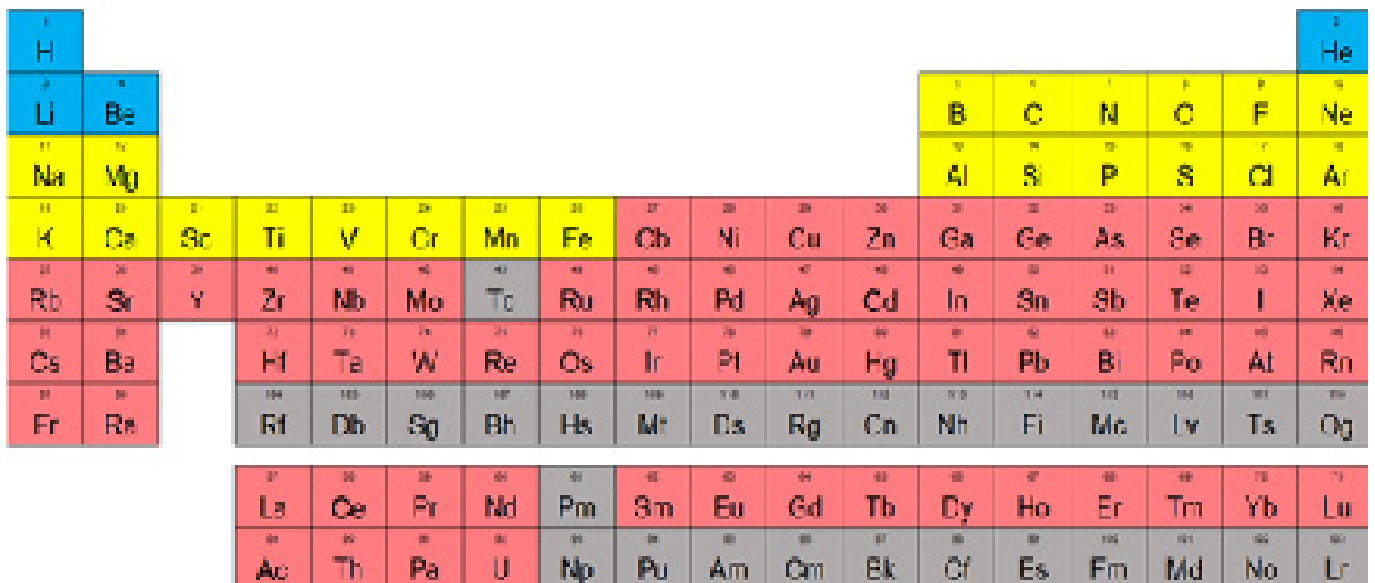


Fig. 7 : Le tableau périodique du point de vue de l'évolution stellaire. En bleu, les éléments produits dans les premières minutes après le Big Bang. En jaune, les éléments produits à l'intérieur des étoiles. En rose, les éléments qui sont apparus dans les explosions de supernova. En gris, des éléments fabriqués par l'homme dans le laboratoire.

Anneau: Gold Au	Mèche recouverte de: Titanium Ti	Du gaz dans le ballon d'un enfant: Helium He	Les lavettes: Nickel Ni
Batterie de portable Lithium Li	Les bougies d'allumage des voitures : Platinum Pt	Fil de cuivre électrique : Copper Cu	Solution d'iode: Iodine I
Boîte d'allumettes: Phosphorus P	Vieille casserole de cuisine: Aluminum Al	Mine de crayon noire: Graphite C	Le soufre pour l'agriculture: Sulfur S
Canette de boisson gazeuse: Aluminum Al	Montre-bracelet: Titanium Ti	Médaille : Silver Ag	Pipe: Lead Pb
Taille-crayon en zinc: Zinc Zn	Vieux clou rouillé:	Thermomètre: Gallium Ga	Boîte d'allumettes : Phosphorus P

Tableau 2 : Objets à classer

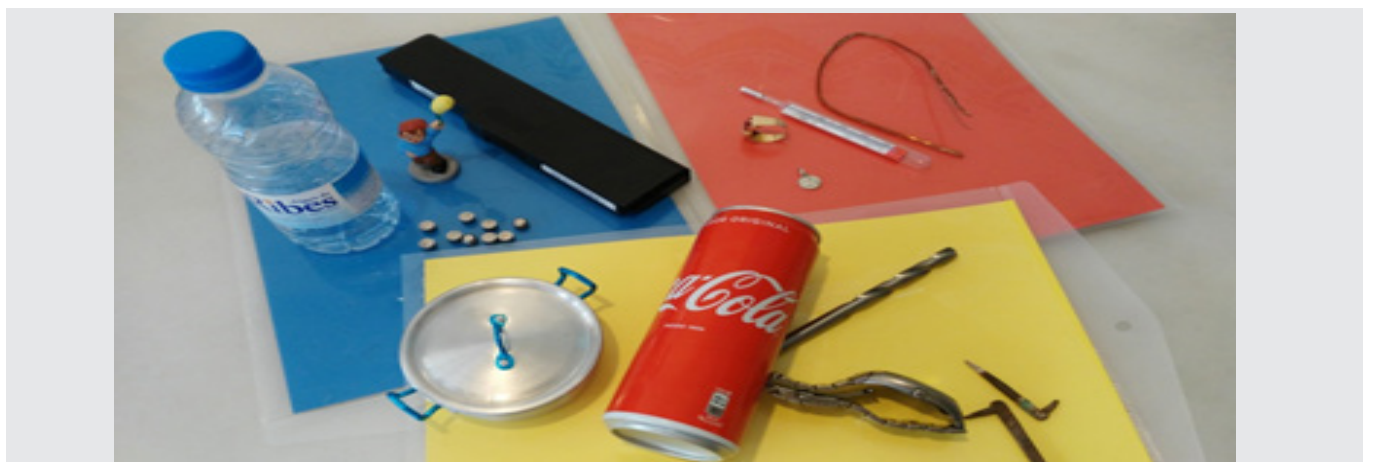


Fig. 8 : Classification correcte. Dans la zone bleue : téléphone portable ou pile bouton : Lithium, Bouteille d'eau H₂O : Hydrogène, Gaz à l'intérieur d'un ballon d'enfant : Hélium. Dans la zone jaune : téléphone portable ou pilbouton : Lithium, Bouteille d'eau H₂O : Hydrogène, Gaz à l'intérieur d'un ballon d'enfant: Boîte de boisson gazeuse : Aluminium Al, Bouteille d'eau H₂O : Oxygène O. Mèche de perceuse recouverte de: Titane Ti, Vieille casserole: clou rouillé : Fer Fe, Mine de crayon noire : Graphite C, Soufre dans l'agriculture : Soufre, S, Boîte d'allumettes : Phosphore, P. Dans la zone rouge : Fil de cuivre électrique : Cuivre Cu, Bougies d'allumage : Platine Pt, Bague : Or Au, Médaille : Argent Ag, Thermomètre : Gallium Ga, Taille-crayon : Zinc Zn, Nettoyant pour casseroles : Nickel Ni, Solution d'iode : Iode, I, Anciennes canalisations d'eau, Plomb, Pb.

Ci-dessous la liste des bio-éléments présents chez l'homme classés en fonction de leur abondance.

- Éléments abondants: oxygène, carbone, hydrogène, azote, calcium, phosphore, potassium, soufre, sodium, chlore, fer et magnésium.
- Oligo-éléments: fluor, zinc, cuivre, silicium, vanadium, manganèse, iode, nickel, molybdène, chrome et cobalt.

Tous les êtres vivants n'ont pas les mêmes proportions d'éléments essentiels. La figure 9 met en évidence les éléments essentiels ainsi que certains qui pourraient être reconnus comme tels: le lithium, le cadmium, l'arsenic et l'étain.

En comparant le tableau périodique de la figure 7 avec celui de la figure 9, on constate que tous les éléments majeurs (sauf l'hydrogène) ont été produits dans les étoiles. Sans les éléments plus lourds créés par l'évolution stellaire, nous ne pourrions pas exister.

Pour ce qui est des éléments qui appear seulement as traces, il y en a qui se sont formés dans l'étoile et d'autres dans une explosion de supernovae. Cependant, la majorité provient des réactions de la synthèse des noyaux dans les noyaux des étoiles: Nous sommes les enfants des étoiles ! Nous sommes faits de poussière d'étoiles!

Bien que ce ne soit pas l'objectif principal de cet atelier, ce serait un bon exercice de réaliser un tableau périodique attribuant un objet quotidien à chaque élément et/ou une expérience impliquant cet élément. Cela devrait permettre aux élèves de mieux comprendre le tableau périodique.

Le Soleil n'est pas une étoile de première génération

Les étoiles de la première génération sont essentiellement constituées d'hydrogène et d'hélium provenant du Big Bang (et d'un peu d'hélium qu'elles ont elles-mêmes généré). Les étoiles qui comprennent des éléments plus lourds se sont formées à partir d'un nuage initial qui contenait les restes d'explosions de supernovae. Les explosions de supernovae ont créé les éléments plus lourds par fusion. Par exemple, le spectre solaire présente un ensemble distinct de raies spectrales du sodium qui suggère qu'en raison de sa faible masse et de son état d'évolution, il ne peut pas être une étoile de première génération. Le sodium ne peut pas avoir été généré par le soleil. De plus, dans les planètes du système solaire, une multitude d'éléments qui surviennent après l'explosion d'une supernova sont détectés. C'est une théorie raisonnable que le Soleil s'est formé à partir d'un nuage initial des restes d'au moins deux explosions de supernova. Par conséquent, le Soleil peut être considéré comme une étoile de troisième génération.

Regardons quelques exemples de spectres présentés ci-dessous: le spectre d'une étoile de première génération où seules les lignes des éléments primitifs peuvent être vues (figure 10). Le spectre solaire avec les raies de sodium déjà mentionnées est clairement visible (figure 12).

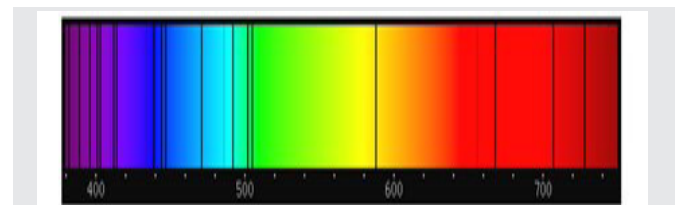


Fig. 10: Spectre d'étoiles de première génération (impression d'artiste). Ces étoiles sont principalement des dizaines ou des centaines de fois plus massives que le Soleil. Ils ont vécu vite, sont morts jeunes et n'ont pas survécu à ce jour. Il n'y aurait que des raies spectrales d'hydrogène, d'hélium et un peu de lithium.

Abundant elements			Trace elements			Essential elements											
H								He									
Li	Be					B	C	N	O	F	Ne						
Na	Mg					Al	Si	P	S	Cl	Ar						
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															

Fig. 9: Periodic table of elements essential for life

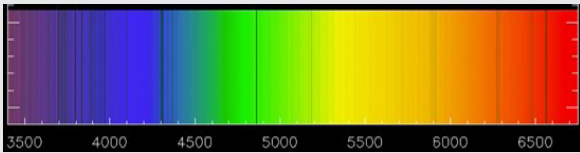


Fig. 11: Spectre du SMSS J031300.36-670839.3, une étoile de deuxième génération qui ne montre que des raies d'hydrogène et de carbone.

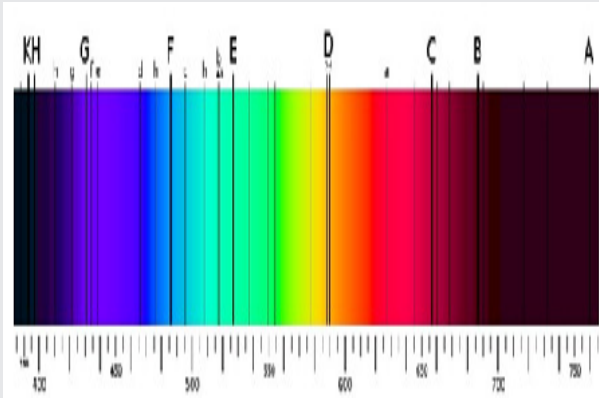


Fig. 12: Spectre du soleil. Avec de nombreuses raies spectrales de divers éléments et parmi eux, le sodium (marqué en caractères gras).

Zone d'habitabilité

Quand on parle de vie, on suppose généralement qu'il s'agit de formes de vie à base de carbone et on définit ainsi un critère central d'habitabilité, qui est la présence d'eau liquide.

présence d'eau liquide. La région autour d'une étoile dans laquelle le flux de rayonnement à la surface de toute planète rocheuse (ou satellite) permettrait la pré

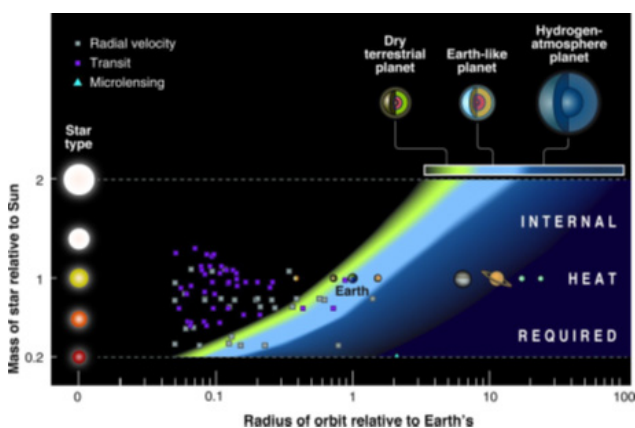


Fig 13 : Zone d'habitabilité déterminée par l'étoile hôte.

ence d'eau à l'état liquide est appelée zone d'habitabilité stellaire. Elle se produit généralement sur des corps (ou à la surface de corps ayant une masse) d'une masse

comprise entre 0,5 et 10 Mt et une pression atmosphérique supérieure à 6,1 mbar, ce qui correspond au point triple de l'eau à une température de 273,16 K (lorsque l'eau coexiste sous forme de glace, de liquide et de vapeur).

La zone d'habitabilité dépend de la masse de l'étoile. Si la masse d'une étoile augmente, sa température et sa luminosité augmentent et, par conséquent, la zone d'habitabilité est de plus en plus éloignée.

Le fait qu'une planète se trouve dans la zone d'habitabilité n'implique pas qu'il doit y avoir de la vie. Par exemple, dans notre système solaire, la zone d'habitabilité comprend les planètes Terre et Mars, mais des deux, la seule dans laquelle la vie est connue est sur Terre. La zone d'habitabilité pour le système solaire est comprise entre 0,84 UA et 1,67 UA. Vénus se situe à 0,7 UA avec un effet de serre non contrôlé et Mars se situe à 1,5 UA sans eau de surface, mais il pourrait bien y avoir de l'eau souterraine gelée.

Outre l'existence d'eaux de surface liquides, il existe d'autres conditions pour l'habitabilité d'une planète. Voyons en détail les plus importantes:

- Une **distance orbitale** de la planète qui la place dans la zone habitable est une condition nécessaire mais non suffisante pour qu'une planète soit hospitalière à la vie. Exemple: Vénus et Mars.

- Un facteur qui influence de manière décisive l'habitabilité est **la masse de la planète. Celle-ci doit être suffisamment importante** pour que sa gravité puisse retenir l'atmosphère. C'est la principale raison pour laquelle Mars n'est pas habitable actuellement, car elle a perdu la majeure partie de son atmosphère et toute l'eau de surface qu'elle avait dans son premier milliard d'années.

En tout état de cause, il peut arriver que, bien que les planètes ne soient pas dans la zone d'habitabilité, les facteurs nécessaires à l'existence d'un certain type de vie puissent exister, soit sur les planètes elles-mêmes, soit sur certaines de leurs lunes. Ce pourrait être le cas pour certaines lunes de Jupiter ou de Saturne.

Astrobiologie préliminaire: Le processus de formation de l'atmosphère terrestre

La connaissance de la photosynthèse est essentielle pour comprendre les relations entre les êtres vivants et l'atmosphère, et pour comprendre l'équilibre de la vie

La connaissance de la photosynthèse est essentielle pour comprendre les relations entre les êtres vivants et l'atmosphère, et pour comprendre l'équilibre de la vie sur Terre, étant donné l'impact profond qu'elle a sur l'atmosphère et le climat de la Terre.

La photosynthèse est un processus physico-chimique par lequel les plantes, les algues et certaines bactéries photosynthétiques utilisent l'énergie de la lumière du soleil pour synthétiser des composés organiques. C'est un processus fondamental pour la vie sur Terre et il

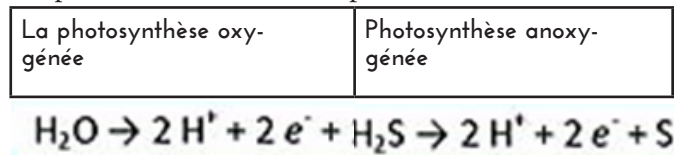


Fig. 14: Photosynthèse oxygénée et anoxygénée.

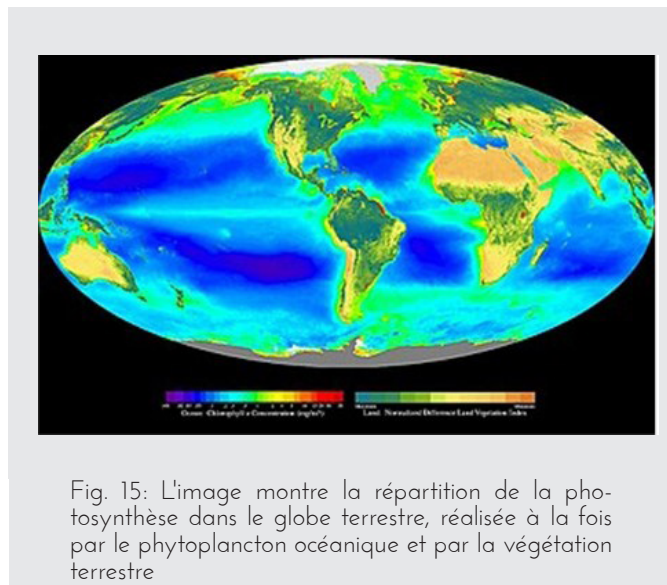


Fig. 15: L'image montre la répartition de la photosynthèse dans le globe terrestre, réalisée à la fois par le phytoplancton océanique et par la végétation terrestre

a un impact profond sur l'atmosphère et le climat de la Terre: chaque année, les organismes dotés d'une capacité de photosynthèse convertissent plus de 10 % du dioxyde de carbone atmosphérique en hydrates de carbone. Cela signifie que l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone atmosphérique générée par l'activité humaine a un grand impact sur la photosynthèse. Du point de vue de l'évolution, l'apparition de la photosynthèse oxygénée (celle qui produit l'oxygène) a été une véritable révolution pour la vie sur Terre: elle a modifié l'atmosphère terrestre en l'enrichissant, ce qui a permis l'émergence d'organismes qui utilisent l'oxygène pour vivre.

Les choses n'ont pas toujours été ce que nous connaissons aujourd'hui; l'évolution de la Terre, l'évolution de l'atmosphère primitive, l'évolution des métabolismes primitifs, constituent un cadre d'événements qui conduit à des bactéries phototrophes qui utilisent la lumière comme source d'énergie mais libèrent du soufre (appelé photosynthèse anoxygénée car elle ne libère

pas d'oxygène). Plus tard, la photosynthèse oxygénée apparaît sur Terre. Elle libère de l'oxygène dans l'atmosphère, augmentant sa concentration et permettant la grande explosion de vie que nous connaissons aujourd'hui. On peut dire que l'atmosphère primitive de notre planète contenait à peine des traces d'oxygène. Mais il y avait de la vie avant. Et on s'accorde à dire que l'air que nous respirons aujourd'hui, avec 21% d'oxygène, est un produit de l'activité biologique de la Terre et qu'il est très différent de l'atmosphère de la Terre primitive.

Le processus de formation de la matière organique. Pourquoi les plantes sont-elles vertes?

La vie sur notre planète se maintient fondamentalement grâce à la photosynthèse que les algues et certaines bactéries réalisent dans le milieu aquatique et que les plantes réalisent dans le milieu sec (à la surface de la Terre). Toutes ont la capacité de synthétiser de la matière organique (essentielle à la constitution des êtres vivants) à partir de la lumière et de la matière inorganique. En effet, chaque année, les organismes photosynthétiques fixent environ 100 milliards de ton-

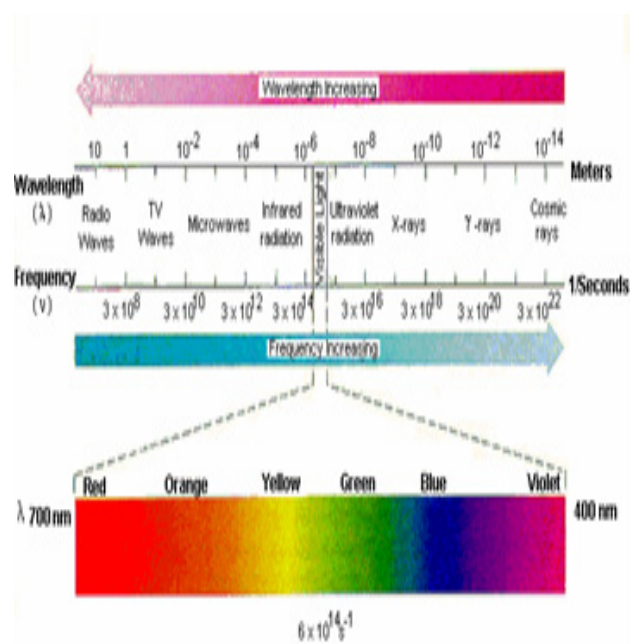


Fig. 16: Le spectre de la lumière visible.

nes de carbone sous forme de matière organique. Les premières étapes de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique dépendent de molécules appelées pigments photosynthétiques. Le terme "pigment" est utilisé pour décrire une molécule qui a la capacité de capturer l'énergie des photons (excitant les électrons à partir de leurs niveaux d'énergie dans les atomes; une molécule qui est "excitée par la lumière"). Tous les pigments biologiques absorbent sélectivement

certaines longueurs d'onde de la lumière tout en en réfléchissant d'autres. La lumière du soleil est composée de différentes couleurs; chacune a une longueur d'onde différente qui se situe entre 400 et 700 nm. La chlorophylle absorbe l'énergie de la lumière rouge et bleue, mais pas celle de la lumière verte. La couleur verte est réfléchiée par la feuille et nos yeux la voient verte.

Production d'oxygène à partir du CO₂ en utilisant la photosynthèse ou la fonction chlorophyllienne

Dans cette proposition expérimentale, nous utiliserons les feuilles d'une plante pour produire de l'oxygène grâce au bicarbonate de sodium, au carbone et à la lumière d'une lampe. Nous utiliserons deux bocaux en verre transparent sur lesquels nous placerons des filtres bleus et rouges.

Les feuilles vertes des légumes doivent être fraîches, consistantes et entièrement vertes, c'est pourquoi il est conseillé d'utiliser des épinards ou des betteraves à feuilles. À l'aide d'un poinçon ou d'une perforatrice à papier, nous découperons des disques de feuilles uniformes (calculer pour avoir 10 disques par bouteille, en évitant les zones avec des nervures centrales).

Nous allons préparer une solution de 25 % de bicarbonate de sodium, c'est-à-dire 25 g de bicarbonate pour 1 litre d'eau, dans le but d'en imprégner les disques découpés dans les feuilles. Nous espérons augmenter la quantité de carbone disponible sous forme de bicarbonate de sodium, ce qui rendra plus visible et accélèrera le phénomène que nous souhaitons observer. Nous mettons 20 ml de la solution de bicarbonate de sodium dans chaque bocal en verre.

On retire le piston d'une seringue jetable de 10 ml et on place les disques dans son corps, puis on place doucement le piston et on aspire 10 ml de la solution de bicarbonate jusqu'à ce que les disques soient en suspension dans la solution.

Nous devons remplacer l'air dans les disques par la solution de bicarbonate. Pour ce faire, il faut sceller l'extrémité de la seringue avec un doigt et aspirer fermement, en essayant de faire le vide, puis relâcher. Dans les espaces internes du tissu végétal, l'air sera remplacé par la solution de bicarbonate : de cette façon, les disques ne flotteront pas dans la solution de bicarbonate, et la solution sera une source de carbone disponible et proche des structures photosynthétiques de la feuille.

Nous plaçons les disques de feuilles ainsi traités dans

chaque bocal de verre (qui contiennent à leur tour une solution de bicarbonate à 25 %). On recouvre l'un des bocaux d'une feuille d'aluminium et on recouvre l'autre bocal avec le papier cellophane coloré. Une lampe doit être installée sur chaque flacon (avec le papier qui le recouvre), de sorte que le faisceau lumineux



Fig. 17 et 18: La solution et les lampes avec filtre rouge et avec filtre bleu.

affecte l'échantillon à étudier : les deux lampes à la même distance (il est nécessaire d'avoir des sources lumineuses individuelles pour chaque flacon, de même puissance, pas moins de 70 W : elles peuvent être fluorescentes, mais l'utilisation de LED est recommandée ; évitez les lampes à incandescence, comme les lampes halogènes, car elles perdent beaucoup d'énergie sous forme de chaleur). Lorsque nous allumons la lumière, nous commençons à mesurer le temps avec un chronomètre. Nous enregistrons le temps nécessaire pour que les disques commencent à monter dans la solution.

Le processus n'est pas immédiat, il peut prendre environ 5 minutes pour que les disques commencent à monter (cela dépend de l'intensité des lumières et de la distance à laquelle la lampe est placée). Les disques commencent à s'élever en libérant de l'oxygène sous forme de bulles, ce qui favorise l'ascension. On notera que le mouvement dans chaque bouteille se produit à des moments différents, en fonction de la couleur de la lumière: il est plus rapide pour la lumière bleue. Nous démontrons ainsi que la composante énergétique supérieure du rayonnement électromagnétique est la plus efficace dans le processus. Le taux de photosynthèse est directement lié au temps nécessaire aux disques pour commencer à monter, un phénomène lié à la production d'oxygène. Le taux de photosynthèse est plus élevé pour le bleu que pour le rouge. Par conséquent, avec cette expérience, nous démontrons comment les plantes et autres organismes photosynthétiques sont responsables de l'existence de l'oxygène dans notre at-

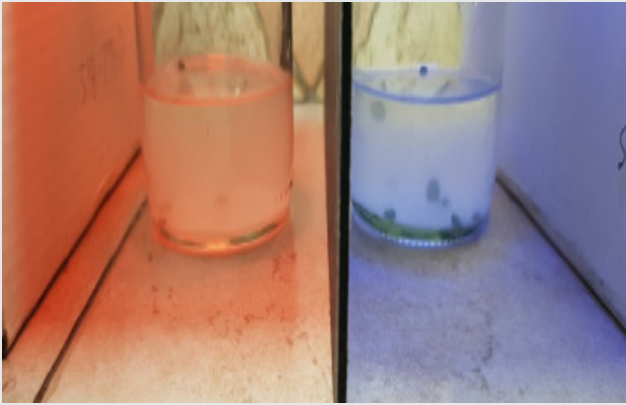


Fig. 19 et 20: Les solutions avec les lampes de différentes couleurs montrant les disques s'élèvent différemment dans chaque cas.

dans notre atmosphère. Le remplacement de l'air par la solution de bicarbonate accélère le processus et nous permet de le visualiser en moins de temps. En outre, au fil du temps, l'interaction du rayonnement UV du Soleil avec les molécules d'oxygène a généré de l'ozone (O₃). Ce processus nous protège des rayons UV les plus énergiques, mais laisse passer les UVA et les UVB, ce qui crée utilement de la vitamine D dans la peau humaine. Variables alternatives à explorer: concentration de bicarbonate dans la solution utilisée, température, sources de lumière de différentes couleurs et intensités (en gardant le reste des conditions constantes et en contrôlant l'obscurité dans tous les cas), feuilles pré-exposées à la lumière ou à l'obscurité, etc.

Vérifier la possibilité de vivre dans des conditions extrêmes

La fermentation pour produire de l'alcool est un processus anaérobie effectué par des levures (champignons). Avec les bactéries, le processus de fermentation est à la base de l'obtention d'énergie dans les microorganismes. Les levures transforment le sucre (glucose) en alcool éthylique ou en éthanol et en dioxyde de carbone. La fermentation est un processus à faible rendement énergétique, tandis que la respiration est beaucoup plus rentable et plus récente du point de vue de l'évolution.

Ainsi, comme le sucre est transformé en alcool éthylique et en dioxyde de carbone, nous baserons notre expérience sur la présence de ce gaz. Si nous en observons la présence, nous saurons qu'il y a eu fermentation et donc que la possibilité de vie a été testée.

Les expériences en microbiologie demandent du temps pour parvenir à des conclusions fiables. Dans notre cas, la présence ou l'absence de dioxyde de carbone nous permettra de savoir si, compte tenu d'un change-

ment des conditions environnementales, nous pouvons en déduire que la vie est possible. Dans tous les cas de notre expérience, nous partons d'une culture dans laquelle l'eau est présente. Afin d'avoir suffisamment de temps pour observer l'évolution de l'expérience, celle-ci est préparée au début de l'atelier et la situation des 7 différentes procédures peut être observée au bout d'une heure.

Pour cela, nous utiliserons 1 cuillère à soupe de levure (utiliser la levure pour faire du pain qui peut être acheté dans un supermarché), c'est un microorganisme vivant facile à obtenir, 1 verre d'eau chaude (un peu plus d'un demi-verre entre 22° et 27° C) et 1 cuillère à soupe de sucre que les microorganismes peuvent consommer.

Nous utiliserons la même procédure pour l'expérience de contrôle et les autres expériences développées dans des conditions extrêmes.

Procédure pour l'expérience de contrôle

Le sucre est dissous dans de l'eau chaude dans une tasse en verre. Ensuite, la levure est ajoutée et mélangée à l'aide d'une cuillère. Ensuite, le mélange obtenu est placé dans un sac en plastique avec une fermeture éclair (il n'est pas possible de faire entrer de l'air à l'intérieur). Tout l'air est extrait de l'intérieur (en l'étalant sur la table et en le pressant avec les mains étendues) avant de le sceller. Il est important de faire attention à ne pas laisser d'air à l'intérieur du sac. Après 5 minutes, nous observons comment le dioxyde de carbone a commencé à s'accumuler dans le sac. Au bout de 20 minutes, des bulles apparaissent à l'intérieur du sac en raison de la libération de ce gaz, l'un des produits finaux de la fermentation qui se produit à l'intérieur du sac. La présence de ce gaz montre que les microorganismes sont vivants.



Fig. 21 L'expérience de contrôle avec des bulles de dioxyde de carbone qui montrent l'existence de la vie

Procédure sur une "planète alcaline" (par exemple, NEPTUNE ou Titan ont tous deux de l'ammoniac): Répétez l'expérience en utilisant tout matériau "de base" disponible (bicarbonate de sodium, ammoniac ...) dans l'eau et attendez de voir si des bulles apparaissent, c'est-à-dire si les micro-organismes peuvent vivre ou non. Échelles de Ph Alcalin: Bicarbonate de sodium: Ph 8,4 et ammoniac domestique: Ph 11.

Procédure dans une "planète saline" (par exemple MARS ou Ganymède est censé avoir de l'eau avec une forte concentration en sel). Répétez l'expérience en dissolvant différentes quantités de chlorure de sodium (sel commun) dans l'eau du robinet.

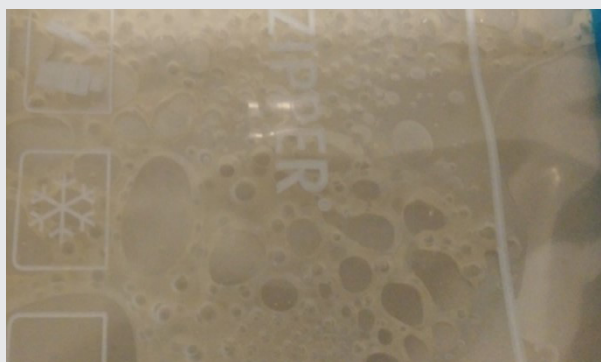


Fig. 22 et 23: La solution alcaline et la solution saline toutes deux avec des bulles

Procédure sur une "planète acide" (par exemple VENUS qui a des pluies d'acide sulfurique): Répétez l'expérience en dissolvant du vinaigre, du citron... ou tout autre acide disponible dans l'eau. Ph balances Acide : Vinaigre : Ph 2,9 et citron : Ph 2.3.

Procédure sur une "planète glacée" (par exemple Europe ou trappiste-1 h). Placez le sac dans un récipient rempli de glace et observez s'il y a de l'activité, c'est-à-dire si le sac gonfle. Si un réfrigérateur ou un congélateur est disponible, il peut également être utilisé. Si les bulles n'apparaissent pas, il n'y a pas de vie.



Fig. 24. La solution congelée sans bulles

Procédure sur une "planète avec UV" (par exemple MARS): Effectuez la même expérience mais en gardant le sachet bien serré avec de la levure et du sucre sous l'action de la lumière UV produite par une lampe spéciale pour cela. Si la lampe UV utilisée est de haute énergie (UV-C) ou (UV-B), aucune bulle n'apparaîtra, ce qui signifie qu'aucune vie n'est possible. Mais les lampes commercialisées, appelées "lumière noire", sont des ultraviolets de faible énergie (UV-A), c'est-à-dire qu'elles ne sont pas dangereuses pour la vie et sont souvent utilisées dans le jardinage pour les bons résultats qu'elles donnent en facilitant la croissance des plantes. En utilisant ce type de lampes, on observe qu'un plus grand nombre de bulles se forment. Si des bulles apparaissent, il y a de la vie.

Procédure sur une "planète chaude" (par exemple VENUS en raison de l'effet de serre). Faites la même expérience avec de l'eau très chaude. Dans le cas de Vénus, nous devons utiliser de l'eau bouillante. (Si l'on dispose d'un thermomètre, on peut répéter l'expérience à différentes températures et obtenir un tableau d'activités à ces températures). Si des bulles apparaissent, il y a de la vie.

Planètes et exoplanètes présentant des conditions extrêmes et similaires à celles utilisées dans cette activité

VENUS. Elle possède une atmosphère dense, composée principalement de dioxyde de carbone et d'une petite quantité d'azote. La pression au niveau de la surface est 90 fois plus élevée que la pression atmosphérique à la surface de la Terre. L'énorme quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère provoque un fort effet de serre qui fait **monter la température de la surface de la planète à environ 464 °C dans les régions moins élevées proches de l'équateur.** Cela rend Vénus plus chaude que Mercure, bien qu'elle soit plus de

de deux fois plus éloignée du Soleil, où elle ne reçoit que 25 % de son rayonnement solaire. Les nuages sont principalement composés de gouttelettes de dioxyde de soufre et d'acide sulfurique et recouvrent entièrement la planète, cachant les détails de la surface à l'observation visuelle extérieure.

MARS. Sous la surface glacée de ce monde désertique, il pourrait y avoir de l'eau salée. Cette eau **pourrait abriter des formes de vie capables de tolérer ces conditions extrêmes.** Dans le passé, c'était un endroit très différent. Nous savons qu'il aurait pu ressembler à la Terre. Il y avait des océans, des volcans et une atmosphère aussi dense que la nôtre, riche en dioxyde de carbone, mais cela n'aurait pas été un obstacle à la vie microbienne. **La seule chose qui manquait à la planète rouge et qui lui a valu une fin si différente de la nôtre, était un champ magnétique.** La faible gravité et l'absence de champ magnétique ont permis au vent solaire de retirer lentement son atmosphère. De plus, Mars est une planète qui reçoit à sa surface le rayonnement solaire ultraviolet (UV) avec une forte composante biologiquement très nocive (UV-C et UV-B), qui influence notamment la détérioration de la surface afin de trouver un signe de vie.

NEPTUNE. La structure interne de Neptune ressemble à celle d'Uranus : un noyau rocheux recouvert d'une croûte glacée, caché sous une épaisse atmosphère. Les deux tiers intérieurs de Neptune sont composés d'un mélange de roche en fusion, d'eau, d'ammoniac liquide et de méthane. Le tiers extérieur est un mélange de gaz chaud composé d'hydrogène, d'hélium, d'eau et de méthane. Son atmosphère représente environ 7 % de sa masse. À de grandes profondeurs, l'atmosphère atteint des pressions environ 100 000 fois supérieures à celles de l'atmosphère terrestre. **Les concentrations de méthane, d'ammoniac et d'eau augmentent des régions extérieures vers les régions intérieures de l'atmosphère.**

Ganymède, le satellite de Jupiter, est composé de silicates et de glace, avec une croûte de glace qui flotte au-dessus d'un manteau boueux qui pourrait contenir **une couche d'eau liquide à forte concentration** de sel. Les premiers survols de Ganymède par le vaisseau spatial Galileo ont permis de découvrir que le satellite possède sa propre magnétosphère. Celle-ci est probablement générée de la même manière que la magnétosphère terrestre, c'est-à-dire qu'elle résulte du mouvement d'un matériau conducteur à l'intérieur.

Titan, le satellite de Saturne. On pense qu'il existe

également un océan souterrain d'eau dans lequel de l'ammoniac est dissous jusqu'à une profondeur de 100 kilomètres sous la surface, et peut-être un autre d'hydrocarbures. L'atmosphère est composée à 94% d'azote et est la seule atmosphère riche en azote dans le système solaire, à part notre propre planète. Le reste est constitué de traces importantes de divers hydrocarbures. La glace est très similaire à celle qui existe aux pôles de la Terre, à savoir de la glace à la dérive.

Europe, le satellite de Jupiter. Europe a **une surface glacée et un océan d'eau liquide** sous la surface. Son atmosphère est mince et de faible densité, mais elle est composée d'oxygène. La glace est très semblable à celle qui existe aux pôles de la Terre, de la glace à la dérive. L'Europe a un noyau de nickel-fer entouré d'un manteau rocheux chaud, au-dessus duquel se trouve un océan d'eau liquide d'une profondeur d'environ 100 km, dont les géologues discutent, et d'une surface glacée de 10 km.

Trouver une seconde Terre

La Terre est la seule planète connue qui abrite la vie. Donc si nous recherchons une planète avec une vie extra-terrestre, il est bon de chercher des planètes offrant des conditions similaires. Mais quels sont les paramètres importants?

Le tableau (tableau 3) énumère quelques exoplanètes ayant des propriétés. Éliminez les exoplanètes qui ne conviennent pas à la vie et trouvez peut-être une deuxième Terre. Vous pouvez trouver quelques critères après le tableau.

Rayon et masse

Dans notre système solaire, il y a des planètes terrestres (Mercure, Vénus, Terre, Mars) et des planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune). Les planètes terrestres semblables à la Terre sont composées de roches de silicate et de métaux et ont une densité plus élevée que les planètes géantes. Le rayon et la masse de la planète sont de bons indicateurs d'une densité appropriée.

Nous utilisons la définition de l'équipe de la mission Kepler: Les planètes de la taille de la Terre et les super-terrestres ont un rayon inférieur à 2 rayons terrestres. 10 Les masses terrestres sont considérées comme une limite supérieure pour les planètes de taille super-terrestres.

Nom de l'exoplanète	Masse en masses de Terre	Radius dans les rayons de la Terre	Distance à l'étoile en UA	Masse d'étoiles en masses du Soleil	Type spectral des étoiles/ température de surface
Beta Pic b	4100	18.5	11.8	1.73	A6V
HD 209458 b	219.00	15.10	0.05	1.10	G0V
HR8799 b	2226	14.20	68.0	1.56	A5V
Kepler-452 b	inconnu	1.59	1.05	1.04	G2V
Kepler-78 b	1.69	1.20	0.01	0.81	G
Luyten b	2.19	inconnu	0.09	0.29	M3.5V
Tau Cet c	3.11	inconnu	0.20	0.78	G8.5V
TOI 163 b	387	16.34	0.06	1.43	F
Trappist-1 b	0.86	1.09	0.01	0.08	M8
TW Hya d	4	inconnu	24		
HD 10613 b	12.60	2.39	0.09	1.07	F5V
Kepler-138c	1.97	1.20	0.09	0.57	M1V
Kepler-62f	2.80	1.41	0.72	0.69	K2V
Proxima Centauri b	1.30	1.10	0.05	0.12	M5V
HD 10613 b	12.60	2.39	0.09	1.07	F5V
KIC 5522786 b	inconnu	1.21	1.98	1.79	A

Tableau 3: Candidats pour une seconde Terre.

Zone Habitable

La zone habitable est la plage d'orbites autour d'une étoile à l'intérieur de laquelle une surface planétaire peut supporter de l'eau liquide. Les étoiles de la séquence principale sur lesquelles nous nous concentrons ont une corrélation directe entre la luminosité et la température de surface de l'étoile. Plus la température de surface est élevée, plus l'étoile est brillante et plus la zone habitable est éloignée. Les types spectraux indiquent la température de surface (voir le tableau 4).

Les types spectraux sont classés par une lettre (O, B, A, F, G, K, M) et subdivisés par un chiffre de 0 à 9 (0 est le plus chaud dans un type spectral donné). Le V indique une étoile de séquence principale.

Conseil: si le type spectral d'une étoile est légèrement différent ou si le sous-type est inconnu, utilisez les valeurs données pour la zone habitable comme approximation.

Type spectral	Température K	Zone Habitable
O6V	41000	450-900
B5V	15400	20-40
A5V	8200	2.6-5.2
F5V	6400	1.3-2.5
G5V	5800	0.7-1.4
K5V	4400	0.3-0.5
M5V	3200	0.07-0.15

Tableau 4: Zone habitable en fonction du type spectral

Messe de l'étoile d'accueil

Pour étudier l'habitabilité dans un système planétaire autour des étoiles de séquence principale, il faut considérer l'évolution de l'étoile hôte.

Environ 1 milliard d'années après la formation de la Terre, les premières formes de vie sont apparues. Peut-être y avait-il de la vie même avant, mais cela est incertain. Ainsi, l'étoile hôte doit être stable pendant au moins ~10⁹ ans pour que la vie puisse évoluer.

L'énergie qu'une étoile peut produire à partir de la fusion de l'hydrogène est proportionnelle à sa masse. Et vous obtenez le temps de la séquence principale en divisant cette énergie par la luminosité de l'étoile. Si vous utilisez cette proportionnalité et en utilisant le Soleil comme référence, on obtient la première partie de la formule, à partir de ces considérations, on peut estimer la durée de vie de la séquence principale d'une étoile:

$$t^*/t_s = (M^*/M_s)/(L^*/L_s)$$

Pour les étoiles naines normales ou la séquence principale du diagramme H-R, la luminosité est approximativement proportionnelle à la masse portée à la puissance d'environ 3.5 $L \propto M^{3.5}$

$$t^*/t_s = (M^*/M_s) / (M^{3.5}/M_s^{3.5}) = (M^*/M_s)^{-2.5}$$

qui donne la durée de vie d'une étoile comme une fraction de la durée de vie prévue du Soleil (10¹⁰ ans). Une version simplifiée de cette formule est:

$$t^* \sim 10^{10} \times (M_s/M)^{2.5} \text{ ans}$$

Calculons une limite supérieure pour la masse de l'étoile si l'intervalle de temps de la séquence principale est d'au moins 3 milliards d'années.

$$M^* = (10^{-10} \times t)^{-0.4} M_s$$

$$M^* = (10^{-10} \times 3\,000\,000\,000)^{-0.4} M_s$$

$$M^* = 1.6 M_s$$

Nous voyons que pour les étoiles de masse > 2M, la durée de vie de la séquence principale tombe en dessous de 1 année galactique (temps pour faire le tour du centre galactique 250 millions d'années), donc, même si des planètes habitables existent autour d'elles, la vie n'aurait probablement pas assez de temps pour évoluer.

Bibliographie

- Álvarez, C., y otros, *Guía Libreciencia Taller Abril*, Argentina 2018,
- Anderson, M., *Habitable Exoplanets: Red Dwarf Systems Like TRAPPIST-1*, 2018
- Goldsmith, D., *Exoplanets: Hidden Worlds and the Quest for Extraterrestrial Life*, Harvard University Press, 2018
- Prieto, J., Orozco, P., *Estudios de Astrobiología*, Actas Ciencia en Acción, Viladecans, 2018
- Summers M, Trefil, J., *Exoplanets: Diamond Worlds, Super Earths, Pulsar Planets, and the New Search for Life beyond Our Solar System*, Smithsonian Books; 2018
- Tasker, E. *The Planet Factory: Exoplanets and the Search for a Second Earth*, Bloomsbury Sigma, 2017

Préparation à l'observation

Francis Berthomieu, Ricardo Moreno, Beatriz García, Rosa M. Ros

Union Astronomique Internationale, École Retamar (Madrid, Espagne), Université Nationale de Technologie (Mendoza, Argentine), Université Polytechnique de Catalogne (Barcelone, Espagne)

Résumé

Une soirée astronomique est une excellente occasion pour admirer l'univers, spécialement si vous l'organisez avec un ami ou un groupe d'amis. Pour cela vous devez bien vous préparer si vous prévoyez d'utiliser certains instruments. Ne ratez pas le plaisir de mettre les yeux dans les jumelles observação do céu a olho nu, ou com binóculos.

Objectifs

- Expliquer comment choisir le bon endroit, l'heure et la date, quel équipement vous allez prendre et comment planifier l'événement.
- Apprendre à utiliser le logiciel *stellarium*.
- Reconnaître le problème de la pollution lumineuse

Choisir la date et le lieu

La pollution lumineuse affecte beaucoup notre perception du ciel. Dans les villes, vous ne pouvez observer que le soleil, la lune, quelques planètes, quelques étoiles brillantes et quelques satellites. Il est préférable d'observer à partir d'un endroit sombre, bien que vous puissiez observer à partir de votre école ou de votre maison.

Si vous voulez observer d'avantage d'étoiles et de nébuleuses, vous devez se déplacer vers un site situé loin des routes et des villes, en effet, les villes envoient un halo de lumière qui empêche une bonne observation. Ce phénomène est connu sous le nom de " pollution lumineuse". De la même façon, évitez l'observation au voisinage des lampes ou autres sources de lumière. Restez à l'écart des routes où les voitures peuvent nous éblouir avec leurs phares. Chercher une zone dégagée où les grands arbres n'interfèrent pas avec votre observation du ciel. On doit choisir une date adéquate pour avoir un ciel clair sans nuages et un climat agréable (nous vous recommandons de vérifier la météo sur le net).

cela, éviter les soirées lors de la pleine lune, car durant cette phase, la lune produit beaucoup de lumière ambiante et par conséquence, nous ne pouvons observer que les étoiles les plus brillantes. Quand la lune est en phase du dernier quartier, elle se lèvera plus tard, nous ne la verrons qu'à la fin de la nuit, de ce fait, un ciel sombre est assuré en début de la soirée. Les soirées les plus intéressantes sont celles où la lune est un peu moins que dans la phase du premier quartier. Depuis les premières heures de la nuit et jusqu'à son coucher sous l'horizon, nous pouvons observer les cratères de la Lune. A son coucher, le ciel devient sombre permettant une meilleure observation.

Si nous avons un télescope, vous devez choisir votre site avant le coucher du soleil et ce, pour profiter de la lumière du jour lors de la mise en place de l'équipement.

Equipements nécessaires

Planification de l'observation

Il faut se rappeler que le ciel change avec la latitude du lieu. Vous pouvez utiliser le logiciel *stellarium*. Sur le Web, il existe de nombreux sites pour obtenir des cartes du ciel, par exemple www.heavens-above.com/skychart ou sur www.skyandtelescope.com. Pour obtenir l'une de ces cartes du ciel, vous devez indiquer

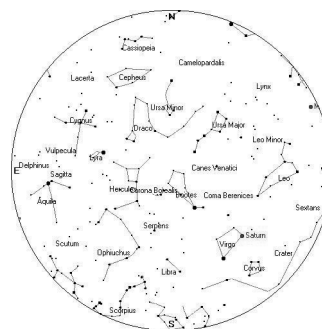


Fig. 1: Exemple de carte du ciel à une moyenne latitude Nord, à mi-juillet 22 h.

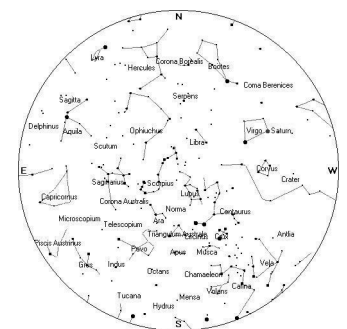


Fig. 2: Exemple de carte du ciel à une moyenne latitude sud, à mi-juillet 22 h.

On tient compte aussi de la phase de la Lune. Pour

l'emplacement (généralement latitude et longitude), la date et l'heure du jour

Lampe torche rouge. Dans l'obscurité, nos yeux s'ouvrent lentement pour laisser entrer d'avantage de la lumière, ce qui nous assure la vision pendant la nuit; cette capacité est appelée «vision nocturne». Cette vision est liée à l'un des deux types de cellules photosensibles de la rétine: les bâtonnets. La rétine, est composée de deux types de cellules: les cônes, sensibles à la couleur et qui sont activés dans la lumière vive, et les bâtonnets, qui ne sont actifs qu'à des niveaux de faible luminosité. Si le site d'observation est éclairé soudainement, notre pupille se referme et les bâtonnets seront désactivés. L'adaptation à nouveau à l'obscurité prendra un instant, temps nécessaire à l'ouverture de la pupille tandis que les bâtonnets prendront au moins 10 minutes pour se réactiver et revenir à la vision nocturne.

Les bâtonnets sont peu sensibles à la lumière rouge, donc en utilisant une lumière rouge, l'œil réagit comme s'il faisait beaucoup plus sombre, ce qui favorise la vision nocturne. Pour avoir une lampe de poche rouge nous utilisons une lampe de poche normale à laquelle on ajoute un filtre simple à l'aide d'un morceau de papier rouge transparent.

La nourriture Le temps consacré à cette activité sera de plusieurs heures en comptant : le déplacement, la préparation du matériel, le rangement du matériel et le retour. L'activité sera plus agréable si nous partageons un peu de nourriture et des boissons (chaude ou froide selon la saison).

Pointeur Laser vert. t. C'est un outil qui permet de pointer facilement les étoiles et les constellations. Soyez très prudent avec ce type de pointeur. Ne jamais le pointer sur les yeux des participants pendant l'observation ou ailleurs, il peut provoquer des lésions oculaires. Ne jamais pointer vers les avions. Cet outil ne peut être manipulé que par des adultes.

Vêtements. Même en été et pendant la soirée, la température baisse et le vent souffle souvent. Et comme l'observation peut durer quelques heures et que le climat peut changer, il vaut mieux prévoir des vêtements appropriés.

Binoculaire, télescopes, Appareil photos (voir ci-dessous) le choix du matériel va dépendre du programme de l'observation.

S'il y a des nuages. Un ciel nuageux peut perturber tout le programme. Cependant, un second plan peut

être programmé: raconter des histoires sur la mythologie des constellations ou parler de tous les sujets astronomiques. Si nous avons Internet, nous pouvons profiter de GoogleEarth, Google Sky, ou autre programme de simulation du ciel. On peut aussi projeter une vidéo astronomique partagée sur YouTube.

À l'oeil nu

Il est essentiel de découvrir le ciel à l'œil nu et de connaître les principales constellations et leurs étoiles les plus brillantes. Pour cela, vous avez besoin d'une carte du ciel et un laser vert. Des applications sur les iPhone et les androides sont utiles pour vous aider à découvrir le ciel et à s'orienter grâce au GPS du téléphone. Le téléphone ne sera pas affecté par les nuages donc il peut servir même si le ciel est couvert

Les étoiles que vous observez dans le ciel dépendent du site d'observation: en effet à partir de l'hémisphère nord on ne peut observer que 50% des étoiles. À l'équateur, on peut observer éventuellement la totalité du ciel ; mais cela dépend de la période de l'année. Un observateur de l'hémisphère sud ne peut observer aussi que la moitié des étoiles.

Les constellations et les étoiles que nous recommandons de connaître sont:

HÉMISPHERE NORD

Les constellations: la Grande Ourse, la petite ourse, Cassiopee, sont des constellations circumpolaires, qui sont toujours visibles. En été, on peut voir le Cygne ; la Lyre, Hercule, le Bouvier, la Couronne Boréale ; le Lion ; le Sagittaire et le Scorpion. Les constellations qu'on peut observer en hiver sont : Orion, le Grand Chien, le Taureau, Andromède, Pégase, les Gémeaux, et l'amas des Pléiades...

Les étoiles: l'étoile Polaire qui indique la direction du pôle nord céleste, Sirius, Aldébaran, Bételgeuse, Rigel, Arcturus, Antares...

L'HÉMISPHERE SUD

Les constellations: La Croix du Sud, le Sagittaire, le Scorpion, la Carène, la Poupe, les Voiles (les trois constellations qui forment l'ancienne constellation d'Argo : Navire Argo). Il est également possible d'observer Orion et le Grand Chien

Étoiles: Aldebaran, Sirius, Bételgeuse sont aussi visibles dans cet hémisphère. Cependant, il n'y a pas une étoile qui indique la direction du pôle sud céleste.

Les constellations zodiacales peuvent être observées des deux hémisphères nord et sud bien qu'elles chan-

gent d'orientation sur la sphère céleste.

Il est intéressant de suivre chaque jour l'évolution des phases de la Lune et son changement de position sur le fond des étoiles. Ceci peut être fait également avec les planètes, en notant leur mouvement lent par rapport à d'autres planètes proches ou par rapport aux étoiles. Cela est particulièrement visible pour les astres qui se déplacent rapidement comme Vénus ou Mercure, au moment du coucher du soleil. Ces planètes peuvent également être visibles au lever du soleil et ensuite vous pouvez continuer à les reconnaître dans le ciel pendant la nuit d'observation. Environ deux heures après le coucher du soleil, vous pouvez commencer à voir des étoiles filantes (météores) à tout moment, avec une fréquence d'environ 5 à 10 par heure. À certains moments de l'année, cette fréquence devient plus importante. Par exemple, vers le 3 Janvier, les Quadrantides sont avec une fréquence d'environ 120 par heure. Le 12 Août, les Perséides sont avec 100 / h, le 18 Novembre est le pic des Léonides, avec environ 20 / h, et entre

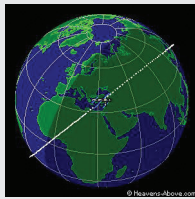


Fig. 3: Orbite de ISS



Fig.4:Grossissement et diamètre de l'objectif

le 12 et le 14 Décembre les Géminides, avec 120 / h. Les Perséides ne sont pas visibles de l'hémisphère sud.

Há Il y a beaucoup de satellites artificiels en orbite autour de la Terre. En se déplaçant lentement dans le ciel et éclairés par le soleil, ils peuvent être vus depuis la Terre. Comme leur altitude est généralement faible, on pourra les voir si on cache longtemps le soleil, par exemple, l'ISS est très lumineux et met environ 2-3 minutes pour couvrir le ciel visible. Les calculs des positions de la majorité de ces satellites artificiels peuvent être prédits une semaine à l'avance selon la position géographique (voir : www.heavens-above.com).

Les Jumelles

Les jumelles constituent un dispositif astronomique utile et aisément disponible, facile à utiliser. Bien que sa capacité à grossir n'est pas généralement très grande, ils recueillent beaucoup plus de lumière que nos yeux, et nous aident à observer les objets qui, à première vue, sont de très faible luminosité tels que : les amas d'étoiles, les nébuleuses et les étoiles doubles. De plus, les jumelles ont l'avantage d'augmenter les différences

de couleur des étoiles, surtout si elles sont réglées légèrement floues.

Ils portent souvent des notations telles que 8x30 ou 10x50. Le premier chiffre donne le grossissement et le deuxième donne le diamètre de la lentille en mm. La taille la plus recommandée pour cette activité est le 7x50. A un grossissement plus élevé, l'image bouge beaucoup, car il est difficile de garder la jumelle stable, et par ailleurs, l'instrument devient plus cher.

Il est intéressant d'utiliser les jumelles pour observer les objets suivantes: la Galaxie d'Andromède (M31) ; l'amas d'Hercule (M13), double amas de Persée (M44), la nébuleuse d'Orion (M42), la région du Sagittaire (quelques nébuleuses comme M8, Trifide (M20) ; Oméga M47, quelques amas globulaires M22, M55, ...), la voie lactée ce qui permet de voir plus d'étoiles qu'à l'œil nu. Dans l'hémisphère sud Omega Centaur et 47 Tucanae sont des amas globulaires les plus spectaculaires.

Observation avec un télescope

La plupart des gens savent qu'un télescope sert à agrandir les objets éloignés, mais moins de gens savent qu'il a une autre mission aussi importante et qui est de capturer plus de lumière que l'œil. Cela permet d'observer des objets de faible luminosité qui resteraient flous même après augmentation du grossissement

Un télescope a deux principaux composants: l'objectif et l'oculaire. L'objectif est une lentille de grand diamètre qui réfracte la lumière (télescopes réfractaires) ou un miroir qui réfléchit la lumière (télescopes réfléchissants). La plupart des miroirs de l'objectif sont de forme parabolique. L'oculaire est une petite lentille où nous mettons l'œil pour observer. Il est généralement amovible et ce, dans le but d'utiliser des oculaires de différents agrandissements. Plus l'objectif est grand, plus de lumière est collectée, et nous pouvons ainsi voir des objets moins lumineux. Les lentilles de haute qualité sont plus chères que les miroirs de même diamètre, de sorte que les plus grands télescopes sont généralement des télescopes réfléchissants.

Le type le plus courant est le Newtonien, il est composé d'un miroir primaire, concave, au fond du tube, qui renvoie les rayons vers un petit miroir secondaire, plan, incliné d'un angle de 45°, en haut du tube, qui dévie les rayons à l'extérieur du tube, où l'oculaire est placé. Un autre type de télescope est Cassegrain : il est constitué d'un miroir primaire, concave, collecteur de lumière, et d'un miroir secondaire, convexe ou plan, qui renvoie la lumière vers un trou percé au centre du

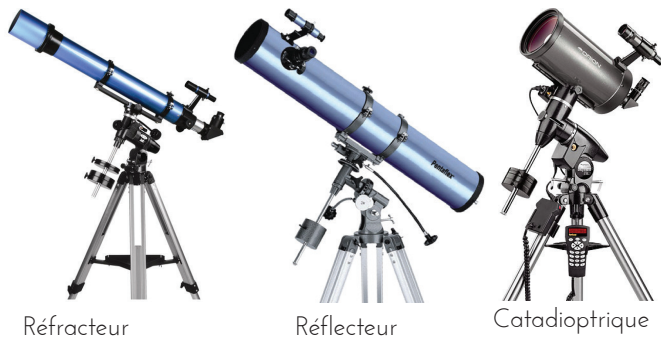


Fig.5 : Différents types de lentilles.

miroir primaire. Ce trou laisse passer la lumière vers l'œil de l'observateur. L'oculaire est placé derrière ce trou central. Enfin, il existe des catadioptriques, typiquement comme un Cassegrain mais en ajoutant une lentille mince à l'entrée du tube, pour réduire considérablement la longueur du tube et le rendre plus léger.

Le grossissement d'un télescope: c'est le rapport entre la distance focale de l'objectif (miroir ou lentille) et la distance focale de l'oculaire. Par exemple si on a une distance focale de 1000 mm et on utilise un oculaire de 10 mm, on obtient un grossissement de 100 fois. Si on veut doubler le grossissement, on doit utiliser un objectif deux fois plus long ou utiliser un oculaire de distance focale 2 fois plus courte. En pratique, cette possibilité est limitée car les oculaires avec de petites focales sont difficiles à fabriquer et peuvent donner des images floues.

Les fabricants décrivent souvent les télescopes en termes de rapport focal, par exemple $f/6$ ou $f/8$. Le **rapport focal** est la distance focale de la lentille, ou du miroir primaire, divisé par le nombre d'ouverture. Il exprime l'une des deux caractéristiques pour connaître l'autre. Par exemple, si nous avons un réfracteur $f/8$ et que l'objectif est de 60 mm de diamètre, la focale réelle du télescope sera multipliée par le nombre d'ouverture, soit $8 \times 60 = 480$ mm. À la même ouverture, le plus grand rapport focal correspond au plus petit champ de vision et de grossissement..

Plus l'ouverture d'un télescope est grande, plus il peut capturer de la lumière et donc, plus il permet de voir les objets les plus faiblement lumineux. En outre, il offre un niveau supérieur de résolution, et donc, la capacité de voir plus de détails ; lorsque la résolution est faible, vous verrez une image floue, et elle sera plus claire et avec beaucoup de détails lorsque la résolution sera plus élevée. La résolution est influencée également par l'obscurité de la nuit: dans les nuits de pleine lune où la lumière autour de vous est plus importante vous ne pouvez pas voir les étoiles les plus faiblement lumineuses.

Une autre limitation importante est la **stabilité atmosphérique**. Nous avons tous vu comment l'atmosphère chaude d'un désert secoue la vision dans les scènes de film tournées avec des téléobjectifs. Lorsque nous regardons à travers un télescope, de petites perturbations de l'air font bouger l'image. Les astronomes se réfèrent à ce phénomène sous le nom de concept de «qualité de la visibilité». Dans cet ordre d'idée, c'est l'atmosphère qui fait scintiller les étoiles.

L'image que vous voyez avec un télescope est **renversée**, mais cela n'a pas beaucoup d'importance: dans le Cosmos, les positions haut et bas sont relatives. Il y a des accessoires qui renversent l'image pour le mettre en position correcte, mais c'est au prix d'une luminosité légèrement inférieure.

La monture est une pièce importante d'un télescope. Un support de mauvaise qualité risque de permettre au tube télescopique de pivoter à chaque fois que vous y touchez. Le résultat est une observation



Fig. 6: Différents types de supports de télescopes

floue et vous serez incapable de voir les détails. Il est important que les supports soient rigides et stables.

Il existe deux types de montures: l'azimutale et l'équatoriale. Le montage azimutal est le plus simple mais le moins utile. Il peut tourner vers la gauche et vers la droite autour de son axe vertical, et vers le haut et vers le bas autour d'un axe horizontal. Le support Dobsonien est un type azimutal facile à transporter et à utiliser. Dans la monture équatoriale, il y'a deux axes inclinés situés à 90 degrés l'un de l'autre. L'un, l'axe polaire, doit être dirigé vers le pôle de la rotation de la Terre. Il tourne en ascension droite. L'autre axe, l'axe équatorial, nous donne les déclinaisons. Il est utilisé par les astronomes professionnels et par de nombreux astronomes amateurs. Le télescope peut comprendre un moteur dans l'axe équatorial qui compense la rotation de la Terre. Sinon, surtout avec un grand grossissement, l'image quitte le champ de vision dans un temps étonnamment court.

CaSi vous avez une monture équatoriale, vous devez l'orienter de sorte que l'axe polaire soit aligné avec le pôle Nord (ou Sud) du ciel. Cela prend du temps, mais il est nécessaire pour que le moteur de suivi équatorial, qui sert à regarder l'objet, ne se déplace pas au fil du temps, ce qui est essentiel si vous voulez pratiquer la photographie. Si nous n'avons pas de moteur, l'alignement exact est moins important, mais il permettra de garder l'objet dans le champ de vision en déplaçant une simple manette de contrôle.

Enfin, les télescopes informatisés, avec une base de données des positions des objets célestes et deux moteurs, sont plus faciles à utiliser une fois qu'ils sont correctement configurés. Notamment, vous devrez l'aligner avec trois étoiles connues afin de le mettre en place, et les débutants sont souvent incapables de réaliser cette étape

Les mouvements du ciel

Fondamentalement, les mouvements du ciel que nous observons sont la conséquence de mouvements relatifs de rotation et de révolution de la Terre. Cette situation fait que nous percevons deux mouvements du ciel: un mouvement diurne et un mouvement annuel. Le mouvement diurne est très important, il est très rapide et ne permet guère de percevoir le mouvement annuel qui est beaucoup plus lent. La Terre tourne sur elle-même, soit 360° , en 24 heures; à raison de 15° toutes les heures. Ce mouvement est très perceptible sans faire des observations minutieuses. Le mouvement de révolution est de 360° tous les 365 jours, ce qui signifie environ un degré par jour (en fait: un peu moins d'un degré par jour). Si nous imaginons qu'il n'y ait pas de révolution, nous observerions dans le ciel nocturne, jour après jour, la même étoile au même moment et au même endroit toutes les nuits. Dans la réalité, cette étoile se déplace d'un degré (c'est-à-dire l'épaisseur d'un index bras tendu) par rapport à la veille. Cette observation ne peut être visible que si nous prenons comme référence une antenne ou un poteau qui nous permet de comparer l'observation d'un jour à l'autre à la même heure. Ce mouvement est presque négligeable si nous n'avons pas de référence et donc il ne sera pas visible à l'œil nu, mais ce que nous remarquons, c'est que le ciel d'aujourd'hui est complètement différent à celui d'il y a trois mois ou six mois. Au bout de trois mois, le déplacement correspond à 90° , soit environ à $1/4$ du ciel et au bout de six mois, la translation est de la moitié du ciel; si bien que l'on observe la partie du ciel qui était diamétralement opposée.

Activité 1: Parapluie Céleste

Un simple parapluie peut nous permettre de visualiser les mouvements du ciel tel que nous venons de les expliquer. Le parapluie, utilisé en cas de pluie, est un dôme placé au-dessus de nos têtes. Sur ce parapluie, nous pouvons dessiner les constellations désirées. Nous allons utiliser un parapluie noir sur lequel on dessine avec de la peinture blanche (ou un correcteur liquide blanc de type « Blanco »).

Dans ce modèle nous ne dessinerons pas toutes les constellations, mais seulement quelquesunes, de même, nous ne dessinerons que les étoiles les plus importantes. Nous ne cherchons pas ici un beau résultat, nous voulons simplement un modèle de travail avec lequel nous pouvons réfléchir.

Chaque parapluie servira à visualiser l'un des deux hémisphères. Le point d'intersection entre la canne du parapluie et le tissu du parapluie est le pôle de l'hémisphère considéré. La zone du bord du parapluie (où les extrémités des tiges sont protégées avec un morceau de plastique), correspond approximativement à l'Équateur céleste.

Ensuite, l'idéal est de préparer deux parapluies, un pour chaque hémisphère.

Dans l'hémisphère nord on dessinera:

- Aux alentours du pôle Nord (près de la canne du parapluie), la Grande Ourse, Cassiopée et l'étoile Polaire qui est placé précisément où la canne du parapluie

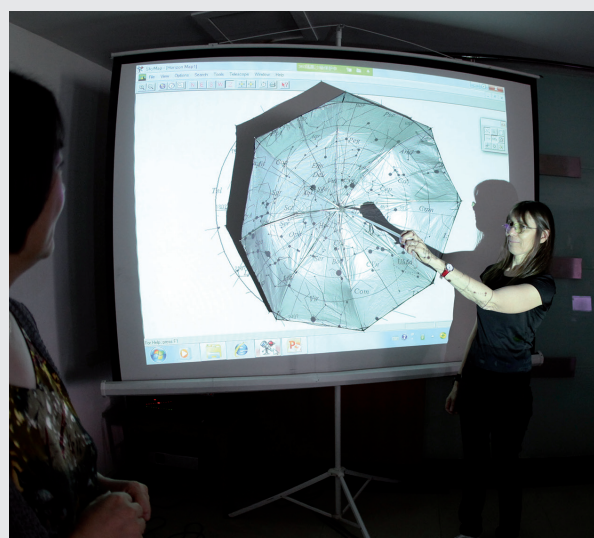


Fig.7: Projection des étoiles de l'hémisphère nord sur un écran pour dessiner les constellations désirées. Nous recommandons de préparer le modèle sur un parapluie noir; ce qui n'est pas le cas sur cette photographie où on a utilisé une autre couleur afin d'expliquer le processus.



Fig. 8 Utiliser le parapluie de l'hémisphère nord avec des élèves

passé à travers le tissu.

• Dans la zone du bord extérieur du parapluie, on dessinera quatre constellations, une pour chaque saison, on choisira les plus communes et les plus facilement reconnaissables:

- Printemps: Lion;
- Été: Cygne;
- Automne: Pégase;
- Hiver: Orion

Evidemment, il est possible de choisir n'importe quelle constellation, mais elles doivent être distribuées de manière équidistante, chacune étant située à environ 90° par rapport à la précédente.

Dans l'hémisphère sud on dessinera:

• Dans le contexte du pôle sud (près de l'axe du parapluie) la Croix du Sud et il est entendu que le pôle sud céleste est situé exactement le pôle du parapluie traverse le tissu

• Dans la zone du bord extérieur du parapluie, nous dessinons quatre constellations, une pour chaque station, la plus connue:

- Printemps: Aquarium;
- Été: Orion;
- Automne: Lion;
- Hiver: Scorpion;

A l'idée est de choisir de grandes constellations et elles sont généralement à l'horizon. Cette proposition peut être adaptée à chaque cas.

Si notre ville se trouve dans la zone équatoriale comprise entre 20° de latitude nord et 20° de latitude sud, il est nécessaire de dessiner les deux parapluies. Si nous sommes situés dans l'hémisphère nord, à une latitude comprise entre 30° et 90°, nous ne dessinerons que le



Fig.9: la Canne de parapluie est inclinée dans la direction du pôle selon la latitude.

parapluie de cet hémisphère et idem pour l'autre hémisphère.

Pour dessiner des constellations avec de la peinture blanche, il est pratique d'utiliser *Stellarium* ou un logiciel similaire, pour générer une image de l'hémisphère céleste désiré que l'on projetera, avec un projecteur multimédia, sur le tissu de parapluie en mettant l'étoile polaire exactement au point d'intersection de la canne de parapluie avec le tissu (figure 7). Une fois cela terminé, les élèves pourront placer le parapluie au-dessus de leur tête (figure 8).

Nous mettrons la canne du parapluie inclinée dans la direction du pôle de l'hémisphère correspondant (comme l'axe de rotation de la Terre). Imaginez un plan parallèle au sol de la pièce, mais au niveau de notre cou, ce serait l'horizon. De cette façon, une partie du tissu du parapluie est en-dessous de cet horizon. Nous distinguons alors deux parties du ciel au-dessus de cet horizon imaginaire. La partie qui est près du pôle, le ciel observé est visible tout au long de l'année, et est toujours plus ou moins la même (c'est la zone autour de l'intersection bâton / tissu du parapluie). La

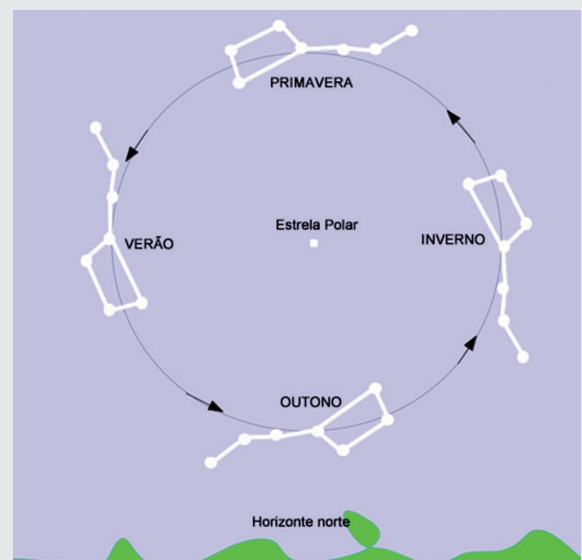


Fig. 10: Position relative de la Grande Ourse autour du pôle Nord tout au long de l'année.

partie qui est près de l'Equateur mais qui est au-dessus de l'horizon, c'est la partie la plus intéressante parce que les constellations changent tout au long de l'année (figure 9).

Nous devons insister sur le fait que ce modèle explique le mouvement de révolution. Nous imaginons ici qu'il n'y a pas de révolution, ce qui revient à observer le ciel chaque jour plus ou moins à la même heure. Nous devons également remarquer que dans ce modèle simplifié, nous visualisons le mouvement du ciel par incrément de 90° , c'est-à-dire chaque 3 mois, mais le mouvement du ciel se fait d'une façon continue chaque jour. Nous avons dit que chaque constellation particulière est visible pendant une saison, il faut donc comprendre que cette dernière sera visible au centre de l'horizon à mi saison.

COMMENT UTILISER LE PARAPLUIE

Nous utilisons le parapluie pour faire comprendre le mouvement de la révolution

Hémisphère Nord.

Pour fixer des idées, supposons que nous sommes dans un lieu de latitude 40° Nord. Nous mettons le parapluie de l'hémisphère nord, avec le pôle Nord de la canne incliné de 40° audessus du sol, au-dessus de nos têtes.

Dans l'hémisphère nord, l'étoile polaire est pratiquement située au pôle Nord. Il est facile de reconnaître la constellation de la Grande Ourse ou celle de Cassiopée. A partir de la Grande Ourse, prolonger 4 fois la distance entre les deux plus lointaines étoiles de la queue de la constellation et localiser l'étoile polaire. En utilisant Cassiopée, l'étoile Polaire est à l'intersection

des deux bissectrices de chaque V du double W représentant Cassiopée.

Horizon Nord

Nous pointons la canne du parapluie vers l'étoile polaire. Si nous faisons une légère rotation, nous observons les constellations de la Grande Ourse et de Cassiopée en train de tourner autour du pôle Nord tout au long de l'année (figure 10).

Nous commençons par placer la constellation de la Grande Ourse vers le haut et Cassiopée vers le bas (ce qui arrive au printemps), nous tournons la poignée du parapluie 90° afin d'avoir la Grande Ourse à gauche et Cassiopée à droite (alors nous avons la configuration du ciel de l'été). Encore une fois, nous tournons la poignée de 90° dans le même sens, alors nous avons la Grande Ourse en bas et Cassiopée en haut (c'est la position correspondante à l'automne) et enfin nous tournons encore de 90° ; on aura alors la Grande Ourse à droite et Cassiopée à gauche (c'est l'hiver). Si nous tournons de nouveau de 90° , nous reproduisons la situation initiale et les quatre saisons d'une nouvelle année recommence (figure 10).

Comme on l'a décrit précédemment, cette zone du ciel, qui est appelée l'horizon nord, est la zone de l'horizon correspondant au Nord, les constellations que nous voyons tout au long de l'année, sont toujours les mêmes mais elles changent de positions.

Horizon du Sud

Nous considérons maintenant la zone équatoriale, la zone de la bordure du parapluie. Les constellations dans cette zone de l'horizon du sud varient selon la saison. Nous plaçons le parapluie tel que le Lion, la constellation centrale du printemps, soit dans la partie la plus haute de l'horizon, ensuite nous tournons le parapluie de $\frac{1}{4}$ de tour ou de 90° et nous avons dans l'horizon sud les constellations centrales de l'été: le Cygne, la Lyre et l'Aigle, qui constituent le triangle d'été. Un autre $\frac{1}{4}$ de tour nous sommes en automne et la constellation centrale sera le grand carré de Pégase. Et nous tournons encore 90° , nous sommes en hiver où domine la constellation d'Orion et les constellations des Chiens.

Hémisphère Sud

Prenons, par exemple, la latitude de 40° Sud. Plaçons le parapluie de l'hémisphère sud, avec le pôle sud incliné de 40° par rapport au sol, sur nos têtes.

Dans l'hémisphère sud, il n'y a pas d'étoile polaire qui permettrait de visualiser la position du pôle Sud. La constellation de la Croix du Sud est utilisée pour mar-

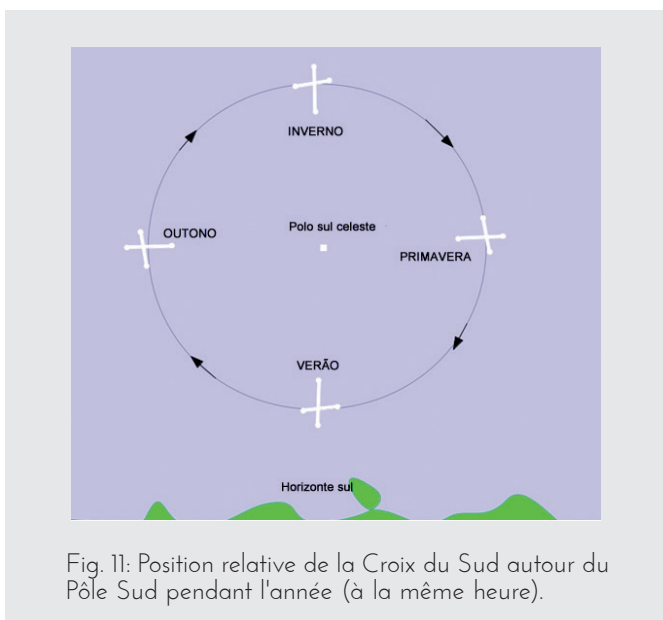


Fig. 11: Position relative de la Croix du Sud autour du Pôle Sud pendant l'année (à la même heure).

quer la position du pôle sud céleste. Les étoiles Acrux et Gacrux (respectivement la base et le sommet de la croix) forment une ligne qui, prolongée dans le sens Gacrux-Acrux de 4,5 fois la distance les séparant, permet d'atteindre un point assez proche du pôle sud céleste. Cette constellation fait une révolution autour du pôle en 24 heures. Sa position change tout au long de l'année, comme le montre la figure 11. Nous observons toujours à la même heure pour éviter l'effet de la rotation de la Terre ce qui nous permet de considérer seulement la rotation du ciel due à la translation.

Horizon du Sud

Regardez la zone de l'intersection entre la canne de parapluie et le tissu de parapluie, la zone du pôle Sud. Nous tournons lentement la poignée et notons que la constellation de la Croix du Sud tourne autour du pôle sud tout au long de l'année. Nous commençons par placer la Croix du Sud au-dessus (ce qui se passe en hiver), nous faisons tourner la poignée du parapluie 90° jusqu'à avoir la Croix du Sud à droite (la position au printemps). Nous tournons de nouveau 90° dans la même direction, la Croix du Sud est en bas (c'est la position correspondante à l'été), et finalement tournons encore 90° en mettant la Croix du Sud à gauche du Pôle Sud (comme en automne). Si nous tournons de nouveau à 90°, nous reproduisons la situation initiale et les quatre saisons d'une nouvelle année recommencent (figure 11).

Horizon du Nord

Nous regardons maintenant le tissu du parapluie dans la zone équatoriale, c'est-à-dire l'horizon nord. C'est la zone où les constellations sont plus variables. Les constellations visibles en été, ne le sont pas en hiver. Zeus, roi des dieux dans la mythologie grecque, aurait mis le géant. Orion dans le ciel après la mort de ce dernier suite à la piqûre d'un scorpion. De même, Zeus aurait mis la constellation de Scorpion dans le ciel, mais diamétralement opposée, de sorte qu'il ne peut plus attaquer Orion.

La constellation centrale au printemps est la constellation du Verseau. Nous tournons le parapluie 90°, c'est-à-dire après trois mois et nous avons, sur l'horizon nord, Orion avec ses chiens, qui est la constellation centrale de l'été. Après un autre ¼ de tour, nous sommes en automne et la constellation centrale est le Lion. Si nous faisons pivoter le parapluie 90°, c'est l'hiver, et nous avons la belle constellation du Scorpion sur l'horizon.

Conclusions pour les deux hémisphères

Grace au schéma présenté précédemment pour les

deux hémisphères et les deux horizons de chaque hémisphère, nous pouvons comprendre le mouvement dû au mouvement de translation dans le ciel nocturne.

Si nous voulons inclure le mouvement de rotation dans l'activité, nous devons considérer que, en plus du mouvement annuel décrit, un mouvement quotidien se fait en raison de la rotation de la Terre. En un jour, la Grande Ours et la Croix du Sud donnent un tour complet à leurs pôles respectifs. Nous avons simplifié l'activité en imaginant que nous effectuons toujours l'observation à la même heure, c'est à dire comme si nous avions négligé la révolution de la Terre.

Ciel sombre et pollution lumineuse

Pour observer les étoiles, nous devons avoir un ciel sombre. Mais cela n'est possible que si nous sommes loin des villes. Ce problème se produit parce que la plupart des éclairages urbains publics utilisent d'énormes quantités d'énergie, qui sont inutiles et gaspillées, pour éclairer le ciel. La pollution lumineuse est une des formes de pollution de l'environnement les moins connues. Elle affecte la visibilité du ciel nocturne, mais aussi altère l'équilibre de l'écosystème et affecte la san-

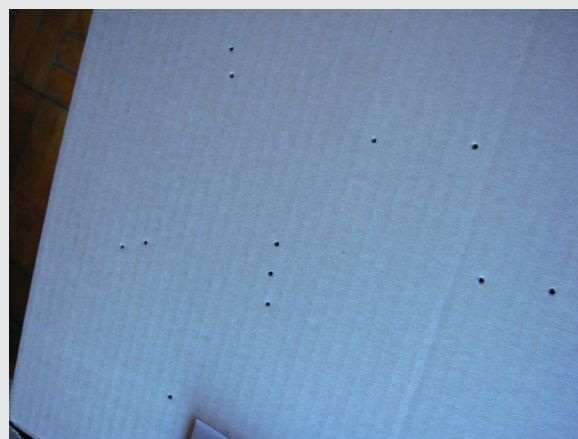


Fig. 12a et 12b: boîte en carton, et représentation de la constellation d'Orion Sur face du carton.



Fig. 13: Vue, de l'intérieur de la boîte, de la constellation d'Orion, chaque trou représente une étoile.

te humaine, car elle dérègle les horloges biologiques qui sont coordonnées avec des périodes de lumière et d'obscurité. Il faut être vigilant à ce sujet, apprendre à reconnaître le problème, avertir les autres des conséquences et trouver des solutions solutions.

Il existe trois types de pollution lumineuse:

a) La lueur est un phénomène qui se produit, en général, par l'éclairage public à l'extérieur. C'est évident lorsque nous avons l'occasion de voyager la nuit et en s'approchant d'une ville, nous voyons qu'une lumière l'enveloppe. Cette lumière est gaspillée, elle est utilisée



Fig. 14a: balle de ping-pong sans écran. Fig. 14b: balle de ping-pong dont la Moitié de surface est peinte.

à éclairer le ciel, non seulement elle affecte l'observation des étoiles, mais elle dépense l'énergie inutilement. Ce type de pollution peut être réduit en choisissant les appareils d'éclairage et des ampoules appropriées.

b) L'intrusion: la lumière intérieure est souvent projetée dans toutes les directions et une partie fuit, même involontairement, hors de nos maisons. Si, la nuit, la lumière est allumée dans les chambres, nous devons obscurcir les fenêtres avec des rideaux.

c) L'éblouissement: Ce type de pollution est lié aux phares des voitures. Il est évident, que dans une rue en pente, l'éblouissement du ciel se produit d'autant plus



Fig. 15a: retirer la cache de la lampe de poche. Fig.15b: simulation d'un lampadaire

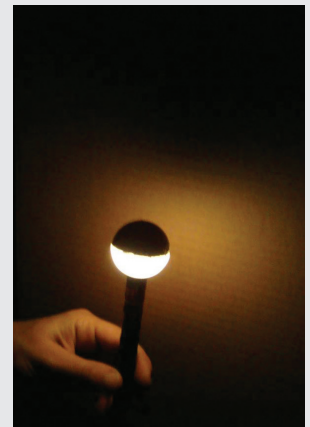


Fig. 16a: lampe sans écran. Fig. 16b: lampe avec écran



Fig. 17a: Apparence du ciel étoilé avec un éclairage.
Fig. 17b: Apparence du ciel étoilé avec un éclairage disposant d'un écran ne disposant pas d'un écran

facilement. Récemment, l'introduction des phares de voiture à base de LED a permis de réduire cette sorte de pollution lumineuse.

Il est possible à partir de différents programmes sur Internet de compiler une série d'activités pratiques pour travailler sur ce phénomène, nous proposons une seule qui est interactive et facile à exécuter.

Activité 2: Pollution lumineuse

Les objectifs de cet atelier sont de montrer l'effet polluant de l'éclairage non protégé, en insistant sur l'effet bénéfique, du point de vue astronomique, du choix d'un déflecteur conçu pour diminution de la pollution lumineuse. Cette diminution vise à améliorer l'observation des étoiles, mais aussi à mieux illuminer les lieux où nous désirons disposer de lumière abondante.

Pour réaliser cette expérience, prenez une boîte en

carton de dimensions suffisantes pour permettre à l'étudiant de regarder à l'intérieur. Dessiner la constellation que vous sélectionnez (dans cet exemple celle d'Orion) et marquer les étoiles, d'abord comme des points; puis comme des trous dont le diamètre sera fonction de la magnitude stellaire (figures 12a et 12b). La constellation dessinée à l'extérieur de la boîte doit être l'image miroir de la vraie constellation, de telle sorte que, lorsque vous regardez à l'intérieur de la boîte, la constellation apparaît comme celle visible dans le ciel.

L'intérieur de la boîte doit être peint en noir de sorte que, si on regarde à l'intérieur, la constellation a l'apparence de celle indiquée sur les figures 12a et 12b. Les «étoiles», ou les points qui les représentent, seront éclairées par la lumière extérieure.

Préparer deux balles de tennis de table, faire un trou qui leurs permettraient de s'ajuster sur une lampe de poche. L'une des balles est laissée telle quelle et l'autre, a sa moitié supérieure qui est peinte avec de l'émail synthétique de n'importe quelle couleur. Cette calotte de peinture constitue un écran qui empêche la lumière de se projeter (figures 14a et 14b).

Pour réussir l'expérience, vous devez utiliser des lampes de poche pour lesquelles vous pouvez retirer le capot de protection de l'ampoule de façon à insérer l'ampoule dans la balle comme indiqué dans les figures 15a et 15b.

L'expérience a été réalisée en deux étapes. Eteignez les lumières pendant l'expérience. Les deux modèles de lampadaire sont testés avec la même lampe de poche pour éviter les variations de l'intensité de la lumière. Ces modèles de lampadaires doivent être positionnés à proximité d'une surface lisse (par exemple un mur ou un morceau de carton) (Fig. 16a et fig16 b).

Deuxièmement : la lumière dans la pièce où se déroule l'expérience doit être allumée. Il s'agit de voir ce qui se passe dans la boîte. La situation est représentée sur les figures 17a et 17b, respectivement pour les cas de lampe avec et sans peinture. Vous pouvez utiliser un appareil photo numérique pour prendre des photos de ce qui se passe dans la boîte, s'il n'est pas possible de regarder à l'intérieur.

Vous remarquerez, dans la première situation, que le déflecteur (écran sur la boule de pingpong) est efficace pour contrôler la pollution lumineuse: l'émission dans le ciel est considérablement réduite. Dans la deuxième situation, en utilisant les deux types de lam

(avec boule de ping-pong avec ou sans écran) à l'intérieur de la boîte, nous simulons la situation d'une nuit avec deux types d'éclairage public. Dans le cas d'éclairage avec écran, l'observation des étoiles est facilitée. Avec un appareil photo numérique, vous ne pouvez photographier correctement les étoiles.

En revanche, la lampe de poche adaptée pour contrôler la pollution lumineuse, il est clair que ce dispositif permet au ciel d'être beaucoup plus sombre et l'appareil est capable d'enregistrer la constellation d'Orion.

.....

Bibliographie

- Berthier, D., *Descubrir el cielo*, Ed. Larousse, Barcelona, 2007.
- Bourte, P. y Lacroux, J., *Observar el cielo a simple vista o con prismáticos*, Larousse, Barcelona, 2010.
- García, B., *Ladrones de Estrellas*, Ed. Kaicron, Colección Astronomía, BsAs, 2010.
- Reynolds, M., *Observación astronómica con prismáticos*, Ed. Tutor, Madrid 2006.
- Roth, G.D. *Guía de las estrellas y de los Planetas*, Omega. Barcelona 1989.

Appendice d'utilisation du logiciel Stellarium 0.10.6.1



Pour visualiser les barres d'outils ou non (amenez le curseur en bas à gauche).



Localisation. Vous pouvez entrer par villes, par coordonnées ou en cliquant sur une carte.



Localisation. Vous pouvez entrer par villes, par coordonnées ou en cliquant sur une carte.



Réglage de la vue du ciel. Il comporte à son tour quatre menus, qui sont expliqués ci-dessous.



N° d'étoiles, de planètes... pour montrer ou non l'atmosphère.



Montrer les lignes de coordonnées dans le ciel à partir des constellations... Type de projection du ciel. Il est recommandé d'utiliser une méthode stéréographique ou orthographique.



Montrez le paysage, le sol, le brouillard.



Noms et figures des constellations et des étoiles dans différentes cultures. Les plus connus sont les Occidentaux.



Recherchez un objet (par exemple Saturne, M13, NGC 4123, Altair).



Définir la langue et les informations affichées pour les objets à l'écran.



Aide (touches de raccourci, etc.).



Rythme normal du temps.



Augmenter la vitesse du temps. Vous pouvez le changer plusieurs fois.



Ralentissez le temps.



Centrer l'objet non sélectionné.



Retour à l'époque actuelle.



Mode nuit.



Lignes en constellation.



Plein écran / fenêtre.



Noms de constellations.



Oculaire (comme si l'on regardait l'objet sélectionné avec un télescope).



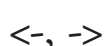
Les chiffres de la constellation.



Satellites artificiels en orbite.



Le carré équatorial.



Déplacez-vous dans la vue.



Grille azimutale + horizon.



Augmentez le grossissement.



Solo / Horizon.



Diminuer le grossissement.



Montrez les points cardinaux.



Définir la planète sélectionnée à partir de la planète elle-même. Pour revenir à la Terre, recherchez "Terre" et ensuite Ctrl+G pour sélectionner la Terre comme point de référence



Atmosphère.



Identification des planètes.



Les nébuleuses et les noms.



Capture d'écran.



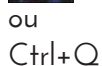
Noms des planètes.



Sair (enceinte ou *Stellarium*)



Assemblage équatorial / azimutal.



L'archéo-astronomie et son potentiel éducatif

Juan Antonio Belmonte Avilés

Instituto de Astrofísica das Canarias (Espagne)

Introduction

Archéoastronomie, astroarchéologie, astronomie culturelle, ethnoastronomie, histoire de l'astronomie,... Ces dernières années, le monde scientifique, et par extension le public universitaire en général, a commencé à reconnaître un certain nombre de sous-disciplines qui, d'une manière ou d'une autre, s'efforcent de relier la science de l'astronomie aux sciences humaines traditionnelles (archéologie, histoire, ethnographie, anthropologie, histoire de l'art ou philosophie, etc.) ou, plus précisément, aux sciences sociales.

Le supplément "Archaeoastronomy" du *Journal for the History of Astronomy* créé par Michael Hoskin - qui n'est malheureusement plus publié - a popularisé le terme "archaeoastronomy" au milieu des années 1980. (Pour rendre les choses plus confuses, cependant, un terme tout aussi valable, "astroarchéologie", qui fait référence à l'orientation astronomique des vestiges archéologiques, a fini par être appliqué aux tentatives de relier les sites archéologiques aux visites d'êtres supposés extraterrestres. La confusion entre la terminologie scientifique et la pseudo-science est, malheureusement, une longue tradition. C'est pourquoi les astronomes s'appellent eux-mêmes par un terme prosaïque signifiant "nom des étoiles" plutôt que les plus appropriés "astrologues", comme le font les biologistes, les écologistes, les anthropologues et une longue liste d'autres "traiteurs de" sciences).

Qu'est-ce donc que l'archéo-astronomie? Dans l'ouvrage **History of Astronomy: an Encyclopedia**, "l'archéoastronome" Edwin Krupp, directeur de l'Observatoire Griffith de Los Angeles, propose la définition suivante du terme: *l'archéoastronomie est l'étude interdisciplinaire de l'astronomie préhistorique, ancienne et traditionnelle dans le monde entier, dans le cadre de son contexte culturel. Cette étude comprend des sources écrites et archéologiques, couvrant les sujets suivants: calendriers; observation pratique; cultes et mythes célestes; représentation symbolique d'événements, de concepts et d'objets astronomiques; orientation astronomique des*

tombes, des temples, des sanctuaires et des centres urbains; cosmologie traditionnelle et application cérémonielle des traditions astronomiques.

Il est vrai que cette définition est suffisamment large pour couvrir une grande variété de sujets. Cependant, "l'archéoastronomie" ainsi définie ignore deux domaines très importants où l'astronomie est pleinement liée aux sciences sociales, à savoir l'histoire de l'astronomie et l'ethnoastronomie. Le premier domaine d'étude, qui a déjà une longue tradition, retrace de manière appropriée les progrès de l'astronomie en tant que discipline scientifique et l'évolution de la pensée et de la pratique astronomique à partir de la Grèce classique. L'ethnoastronomie, complète ce domaine en retraçant l'astronomie dans les traditions orales des cultures actuelles et, selon certains chercheurs, dans les sources écrites (chroniques de conquête, études anthropologiques anciennes) de cultures éteintes, couvrant un éventail de sujets qui coïncident largement avec ceux de l'archéoastronomie proprement dite. En fait, les frontières entre ces trois disciplines sont extrêmement mal définies et les études qui relèvent de deux ou de toutes ces catégories sont plus la règle que l'exception.

C'est pourquoi le terme général "astronomie culturelle" semble le plus approprié à toute étude dans laquelle l'astronomie est liée aux sciences sociales. C'est pourquoi les spécialistes de ce domaine s'appellent aujourd'hui la "Société européenne pour l'astronomie en culture (SEAC)" www.archaeoastronomy.org.

Où se trouve l'archéo-astronomie ?

L'une des plus importantes distinctions entre l'archéoastronomie et les sciences physiques "dures" est le remplacement du langage "astronomique" par un langage plus compatible avec le point de vue épistémologique des sciences sociales. L'archéo-astronomie, il faut le garder à l'esprit, n'est pas une autre branche de l'astrophysique moderne, et son but fondamental n'est pas de faire progresser la connaissance physique de l'Univers. L'archéo-astronomie est plutôt une spécialité

plus étroitement liée aux études anthropologiques, au service de disciplines telles que l'archéologie du paysage (au sens large du terme paysage), l'histoire des religions ou l'archéologie du pouvoir. Par conséquent, un astronome formé principalement aux sciences quantitatives peut avoir des difficultés à savoir comment répondre aux questions qui intéressent les archéologues, voire à poser les questions elles-mêmes. Pourtant, il est important pour les personnes intéressées par l'astronomie de se familiariser avec leurs racines et de comprendre comment différentes cultures ont utilisé l'observation du ciel pour façonner leur vision de l'univers qui les entoure en une vision du monde cohérente et significative.

Il a été avancé qu'une collaboration étroite entre les archéologues et les astronomes est nécessaire pour mener des recherches substantielles en archéo-astronomie. Cette symbiose interdisciplinaire est une conséquence naturelle de la nécessité pour les archéologues, anthropologues et historiens de l'astronomie de maîtriser des techniques astronomiques telles que l'astronomie de position ou la mécanique céleste et des outils mathématiques tels que la trigonométrie sphérique, qui vont bien au-delà de leur formation habituelle.

Cependant, mon opinion actuelle, après plus de deux décennies d'expérience dans ce domaine, est que l'astronome et l'anthropologue doivent tous deux se transformer en un type d'érudit sensiblement différent, un archéo-astronome, en oubliant nombre des habitudes épistémologiques issues de longues années de formation disciplinaire et en établissant des schémas de pensée tout à fait nouveaux. Tout ce qui est étudié en archéo-astronomie ne peut pas nécessairement être considéré comme interdisciplinaire, même si une certaine approche multidisciplinaire peut être nécessaire. Il s'agit, en somme, d'un domaine légitime en soi.

L'archéo-astronomie a un autre problème important : c'est une sorte de no man's land dans lequel les astronomes et les astrophysiciens ne se sentent pas à leur place (bien que cela commence heureusement à changer), et les archéologues et les historiens n'y voient souvent rien d'utile pour leur compréhension du passé. Cela contraste avec d'autres intersections des sciences humaines avec les sciences expérimentales comme, par exemple, l'utilisation du C14 dans la datation, qui est largement acceptée par les scientifiques, les historiens et les archéologues. Le problème est aggravé lorsque le titre d'"archéo-astronome" est appliqué aux scientifiques désireux d'appliquer leurs connaissances et qui utilisent (et abusent) des outils physiques et mathématiques considérables à leur disposition pour proposer des

théories historiques absolument absurdes, à l'horreur des archéologues et des anthropologues. Les efforts déployés par des scientifiques consciencieux pour obtenir un certain degré de reconnaissance des approches astronomiques de l'archéologie peuvent être contrariés par quelques membres éminents de ce que les scientifiques britanniques appellent la frange lunatique.

La frontière entre ce qui est scientifique et ce qui ne l'est pas devrait être basée sur l'application de règles de base telles que le Rasoir d'Ockham, la formulation la plus simple du Principe d'économie (face à deux réponses possibles à un problème scientifique, la plus simple est souvent vraie). Cependant, nous devons reconnaître que ces règles ne sont pas universellement applicables.

Archéo-astronomie et NASE

Le potentiel de l'archéo-astronomie dans l'enseignement de l'astronomie est qu'elle peut inspirer le cœur et la conscience des jeunes apprentis à voir leur propre culture se refléter dans la manière de comprendre le cosmos de leurs ancêtres. En ce sens, l'archéo-astronomie peut fournir un lien direct avec leur environnement immédiat par opposition à l'éloignement apparent du ciel et de l'univers en général. Si cela est vrai, il serait intéressant de mener des recherches sur les effets pédagogiques de l'archéo-astronomie ou de l'ethno-astronomie ou même d'une combinaison des deux.

Ces approches offrent aux étudiants la possibilité de stimuler le dialogue avec les anciens pour apprendre les connaissances traditionnelles du ciel, en particulier s'ils se trouvent à proximité ou dans des sociétés agricoles ou de chasseurs-cueilleurs. Dans les sociétés urbaines modernes, les connaissances sont transmises de manière plus formelle par les écoles et les médias. Pour les étudiants intéressés par cette approche, un plan d'entretien type pouvant servir de guide est joint (voir annexe 1).

D'autre part, il est presque certain que dans l'environnement immédiat du jeune apprenti astronome, où qu'il se trouve, il y aura une série de bâtiments qui pourraient avoir un caractère symbolique marqué et qui ont déjà une fonction religieuse ou séculière. Ces bâtiments, ou l'aménagement de l'espace urbain, sont des objets potentiels d'expérimentation archéo-astronomique. Nous en citons quelques exemples:

- Les églises dans un environnement chrétien.
- Les mosquées dans un environnement musulman.
- Temples en milieu hindou, bouddhiste ou shintoïste (compris les pagodes ou gopurams)

- Les plans d'urbanisme, en particulier ceux qui ont un cadre orthogonal clairement organisé (très courant dans le monde entier).
- Les sanctuaires des sociétés indigènes (Polynésie ou Amérique)
- Autres lieux de culte dans les sociétés tribales.
- Les monuments anciens s'il y en a.

L'iconographie astronomique existante dans ces lieux peut également être étudiée, par exemple l'analyse des stations de gravures rupestres qui montrent souvent des représentations astrales élaborées. Ainsi, l'astronomie culturelle peut devenir une approche efficace et précieuse qui peut faire connaître l'astronomie au grand public, et en particulier aux jeunes.

Annexe I (Adapté de "El Cielo de los Magos")

TYPE D'ENTRETIEN POUR LE TRAVAIL DE TERRAIN ETHNOASTRONOMIE

L'ensemble des questions proposées est de nature générale et peut être appliqué dans la plupart des cas. Toutefois, l'expérience montre que, dans ce type de recherche, une fois la conversation engagée, d'innombrables questions plus spécifiques et plus directement liées au sujet traité se posent. Par conséquent, bien que ce schéma puisse servir de guide, on s'attend à ce que la plupart des entretiens prennent naturellement un caractère plus ouvert.

Tout d'abord, demandez à la personne interrogée d'expliquer ce que nous savons et pourquoi, en commençant par des questions générales telles que

- Voici que vous avez récemment regardé dans le ciel pour quelque chose ?
- L'utilisez-vous comme un guide, un signe, un symbole ou un guide pour quelque chose ?

1. Demandez ensuite des précisions sur chaque objet qui peut être utilisé à des fins prédictives:

- a) Questions axées sur les étoiles
- Êtes-vous guidé par les étoiles la nuit ?
 - Quelles étoiles connaissez-vous dans le ciel ?
 - Connaissez-vous "telle ou telle" étoile (*) ?
 - Posez des questions sur le lieu et la période de l'année où vous sortez pour observer et sur les étoiles que vous regardez, afin de préciser à quelle(s) étoile(s) la personne interrogée fait référence.
 - Vous souvenez-vous des noms des autres groupes d'étoiles ?
 - Est-ce que cela vous indique quelque chose sur les étoiles ?

- La pluie est-elle associée à une étoile ?
- Les observations se font-elles le plus souvent la nuit ou tôt le matin ?
- Utilisez-vous l'observation des étoiles pour décider quand et où effectuer des travaux agricoles ?
- Sur quelle base prenez-vous ces décisions... qu'une étoile soit vue ou non à un moment donné ? si une étoile se trouve dans une position particulière ? etc. ?
- Comment la personne interrogée dit-elle l'heure la nuit ?
- Le lever d'une étoile particulière a-t-il une importance quelconque ?
- Le bétail fait-il quelque chose ou se passe-t-il quelque chose qui est associé aux étoiles ?
- Le bétail est-il agité ou nerveux à cause de la position ou du comportement des étoiles ?

(*) **Note:** Il sera fait spécifiquement référence à toute étoile, connue p

b) Questions relatives à la Lune:

- Avez-vous regardé la Lune ?
- Utilisez-vous la Lune comme guide pour quelque chose ?
- Avez-vous regardé ou remarqué où la Lune se couche ?
- Avez-vous remarqué la position, la forme ou les phases de la Lune récemment ?
- La position de la Lune indique-t-elle quelque chose ?
- Avez-vous regardé la Lune pour vous aider dans vos travaux agricoles ?
- Avez-vous remarqué quelque chose de spécial à propos de la Lune ?
- Y a-t-il une phase ou une saison de la Lune plus importante que les autres ?
- La Lune a-t-elle une influence sur la pluie ?
- La Lune a-t-elle une influence sur les animaux ?

c) Questions relatives au soleil:

- Avez-vous regardé le Soleil ?
- Utilisez-vous le Soleil comme guide pour quoi que ce soit ?
- Avez-vous regardé ou remarqué où le Soleil se couche ?
- Utilisez-vous le Soleil pour indiquer l'heure ? ... Comment ?
- Avez-vous regardé la Lune pour vous aider dans vos travaux agricoles ?
- Avez-vous entendu parler de la danse du Soleil ?

d) Questions relatives aux phénomènes météorologiques:

- Comment savoir s'il va pleuvoir ou non ?
- Connaissez-vous un signe quelconque, quelque part, qui indique qu'il va pleuvoir ?
- Quels autres signes connus se rapportent aux vents, aux nuages ou aux événements célestes ?
- Y a-t-il eu un signe pour telle ou telle montagne ?
- Avez-vous un moyen de savoir ce que le temps fera dans la mer (pêche) ?
- S'il va pleuvoir, pouvez-vous dire en regardant le ciel à quelle heure cela va se produire, ... (*)?
- Quand, à cette heure-là, regardez-vous (*) ?

(*) **Note:** Ces deux dernières questions ont pour but de savoir s'ils connaissent les Cabañuelas sans en mentionner expressément le nom. Sinon ...

e) Questions relatives aux Cabañuelas et aux Aberruntos (méthodes traditionnelles de prévision météorologique):

- Y a-t-il un moment particulier pour rechercher les signes du temps pendant le reste de l'année ?
- Connaissez-vous les Cabañuelas ?
- Que savez-vous des Cabañuelas ?
- À quelle date ?
- En quoi consiste la méthode ?
- Connaissez-vous un Aberrunto ?
- Qu'est-ce que cela signifie ?
- Ces méthodes fonctionnent-elles ou non ?
- Y a-t-il une Cabañuela qui soit plus précise que les autres méthodes ?
- Y a-t-il une Cabañuela associée au Soleil ou à la Lune ?

f) Questions relatives aux jours fériés et à la fête des saints:

- Quelles fêtes avez-vous ici ?
- Quand ont-elles lieu ?
- Quelles sont les plus importantes ?
- Quel est votre Saint Patron ?
- Que fait votre saint ?
- Que faites-vous le jour spécial ?
- Faites-vous quelque chose en rapport avec le ciel ce jour-là ?

2. Questions d'ordre général à poser au cours de l'entretien:

- -Vous souvenez-vous d'une chanson, d'un chant ou d'une parole en rapport avec les choses du ciel ?
- Avez-vous quelqu'un qui sait comment prédire le temps qu'il fera ?
- Quel est son nom ?
- Les prédictions sont-elles très précises ?

- Quels autres signes connaissez-vous ?
- Faites-vous confiance à tous ces signes ?
- De nos jours, vous suivez toujours ces signes ?
- De nos jours, les gens cherchent-ils encore ces choses ?
- Pensez-vous que les signes sont dignes de confiance ?
- Qui vous a appris ce savoir ?
- -Où est-il ou elle est né(e) ? Où a-t-il ou a-t-elle grandi ? D'où était-il (père, grand-père, père, ...) ?

Annexe II (Adapté de "L'orientation comme signe d'identité culturelle: les églises historiques de Lanzarote")

Résumé

L'orientation des églises chrétiennes est un élément distinctif de son architecture qui répète des motifs de l'époque chrétienne. On observe une tendance générale à orienter leurs absides dans la gamme solaire, avec une prédilection pour l'est géographique (équinoxe astronomique proche), bien que les alignements en sens inverse, avec l'abside à l'ouest, même s'ils sont exceptionnels car ils ne suivent pas le schéma canonique, ne soient pas inhabituels.

Le cas des églises construites dans le nord-ouest de l'Afrique avant l'arrivée de l'Islam est paradigmatique à cet égard et pourrait refléter des traditions antérieures. Les îles Canaries représentent l'extrémité occidentale de la koinè culturelle nord-africaine, il a donc été jugé pertinent d'étudier un ensemble compact d'églises anciennes dans l'une des îles, en choisissant Lanzarote. L'orientation d'un total de 30 églises construites avant 1810, ainsi que quelques exemples supplémentaires de périodes plus tardives, sont mesurés. L'échantillon indique qu'un modèle d'orientation décisive sur l'île a suivi, mais contrairement à la norme trouvée jusqu'à présent dans le reste du monde chrétien, ce prototype est double. D'une part, apparaît la direction standard Est (ou Ouest), mais l'échantillon est aussi un marquage d'orientations vers le Nord-Nord-Est, pour l'instant, à l'exclusion de Lanzarote. L'annexe explique pourquoi cette étrange règle, en considérant plusieurs possibilités pour la plupart écartées. Nous avons constaté que l'explication peut être très prosaïque, de telle sorte que, parfois, les besoins terrestres sont plus pertinents que les besoins décisionnels de la secte.

Introduction: Prolegomena

L'étude de la disposition et de l'orientation des églises chrétiennes intéresse depuis longtemps et a récemment connu un nouvel essor dans la littérature spécialisée. Il

s'agit d'un facteur important de leur architecture. Selon les textes des écrivains et des premiers apologistes chrétiens, les églises doivent suivre une certaine orientation, c'est-à-dire que le prêtre doit se tenir face à l'Est pendant le culte. Reconnu par Origène, Clément d'Alexandrie et Tertullien, le Concile de Nicée (325) a déterminé qu'il s'agissait là d'un fait prioritaire. Atanasius d'Alexandrie, également au IV^e siècle, a exprimé que le prêtre et les participants devaient être orientés vers l'Orient, où le Christ, Soleil de Justice, brillera à la fin des temps (*ecclesiarum situs plerumque talis erat, ut fideles altare facie versa orientem solem, symbolum Christi qui est Sun iustitia et lux mundi [...] interentur* ; pour une analyse approfondie des sources et des méthodes d'orientation initiales, vous pouvez suivre Vogel (1962).

Cependant, ces commandements ne sont pas tout à fait clairs, ce qui permet de choisir entre différentes interprétations : est-il orienté vers le soleil levant le jour qui commence la construction de l'église ? Ou vers le Soleil un autre jour considéré comme important, comme le jour du patron de l'église ? Soit l'orientation vers l'Est, serait-elle considérée au sens strict ? Les églises sont orientées vers le lever du soleil à l'équinoxe ? dans ce cas, vers quel équinoxe ? Au départ, les basiliques chrétiennes primitives n'étaient pas construites avec l'abside, ou la tête de l'Église, détournée vers l'Est. À cet égard, Delgado-Gomez (2006) indique que sur les 20 premières basiliques chrétiennes construites à l'époque de Constantin et de ses successeurs à Rome, Jérusalem, Constantinople et en Afrique du Nord, 18 sont situées approximativement sur la ligne est-ouest, mais l'abside de 11 d'entre elles est orientée vers l'ouest. Il est cependant intéressant de noter que dans ces cas, la chaire et les prêtres sont positionnés en regardant vers l'Est, d'où l'autel situé entre eux et les pleureurs.

Entre le III^e et le VII^e siècle, des recommandations ont été imposées et ainsi les constitutions apostoliques indiquent que les églises doivent être construites face à l'Est (const. Apost., II, 7). Au Ve siècle, Sidonios Apollinar et Paulinus de Nola ont indiqué que l'abside devait être tournée vers l'Est, c'est-à-dire vers l'Équinoxe, ce qui a été confirmé plus tard par le pape Virgile et par Isidoro de Séville dans son *Etymologiae* (XV, 4) (McCluskey 1998). Cela sera confirmé au cours du Moyen-Âge par Honorius Augustodunensis (XI-XII^e siècles) : [...] *ecclesiae ad orientem vertuntur ubi sol oritur [...]* et par d'autres auteurs tels que William Durando (XII^e-XIII^e siècles : [...] *contra orientem, hoc est, contra solis ortum aequinoctialem, nec vero contra aestivale solstitium [...]*), qui indique clairement la direction à suivre: l'équinoxe, empêchant le procès des solstices.

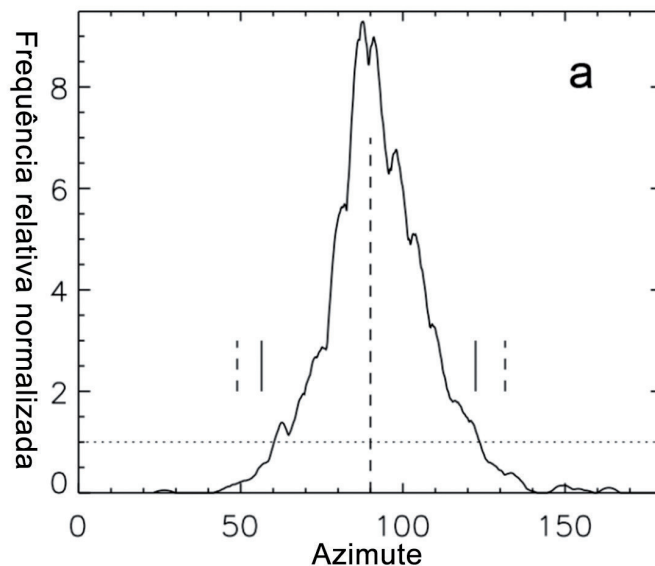


Figure 1: Histogramme azimutal d'une simple de 1274 églises médiévales européennes.

L'orientation vers l'Est a une symbolique claire, comme nous l'avons déjà dit. C'est dans cette direction que le soleil se lève et donc que le Christ, en tant que Soleil de Justice, en sortira dans le Jugement dernier (McCluskey 2004, 2010). D'autre part, la non-préférence des solstices pourrait être liée à l'importance de ces dates dans les périodes précédentes et aux nombreux temples païens visés dans ces directions (voir, par exemple, Belmonte, 2012).

Cependant, dans ces prescriptions, l'ambiguïté persiste encore. Quel Equinoxe doit être pris en considération ? Comme le mentionne McCluskey (2004), il y a plusieurs possibilités: l'équinoxe de printemps romain a eu lieu le 25 mars, tandis que l'équinoxe de printemps grec a eu lieu le 21 mars - comme le reflète le Concile de Nicée - ; mais vous pouvez utiliser d'autres définitions, telles que l'entrée du Soleil dans le signe du Bélier ou l'équinoxe d'automne. Chacune de ces définitions propose différentes dates et, par conséquent, des orientations légèrement différentes (Ruggles 1999, González-García & Belmonte 2006).

Un autre point important à considérer est l'utilisation du calendrier julien pendant le Moyen Âge et une partie du calendrier moderne. La nature de ce dernier conduirait au fait que, si nous regardons un calendrier d'équinoxe - c'est-à-dire à une date spécifique - ce temps serait décalé dans le temps, ce qui se traduirait par un changement systématique d'orientation, si cela se faisait par l'observation du lever du soleil ce jour-là.

Avec les pyramides d'Égypte et les mégalithes européens, l'étude de l'orientation des églises médiévales européennes est l'une des plus anciennes épreuves auxquelles l'archéo-astronomie a été confrontée. Gonzá-

lez-García (2013) a récemment mené une collection de travaux dans ce domaine. Elle montre que les prescriptions relatives à l'orientation vers l'Orient ont suivi un schéma assez systématique dans toute l'Europe au cours du Moyen Âge, comme le montre la figure 1. Toutes les régions étudiées par González-García (2013) suivent ce schéma d'orientation avec un maximum clair principalement axé sur l'Orient, soulignant qu'à de nombreuses occasions, notamment en Europe occidentale, ce maximum est légèrement déplacé vers le nord de l'Est astronomique, ce qui indique peut-être une utilisation de dates spécifiques pour l'équinoxe (25 mars) qui, avec le temps, se déplacent comme décrit cidessus, bien que chaque région présente des caractéristiques particulières.

Il est intéressant de noter qu'une constante dans la littérature sur l'orientation des églises est qu'elles sont orientées vers le lever du Soleil dans l'éphéméride du saint patron (ce qui ne semble pas du tout être le cas des églises de Lanzarote, comme nous le verrons). Cependant, dans les premiers écrits, et jusqu'à une époque très avancée du Moyen-Âge, il n'existe pas d'appui épigraphique à une telle affirmation. Les travaux passés en revue par González-García (2013) indiquent que pour certaines régions d'Allemagne et peut-être d'Angleterre et de France, il pourrait y avoir un intérêt de certains saints pour certains monuments, même si ces édifices sont généralement des églises monastiques romanes ou des cathédrales gothiques et donc tardives. Un cas intéressant et bien documenté est donné en Slovaquie où Čaval (2009) a trouvé des preuves d'une prédilection particulière pour la fête dite de la Chaire de Saint Pierre, inclinaison qui se reflète dans l'orientation d'un nombre important d'églises dans la direction du lever du soleil ce jour-là. McCluskey (2004) indique que quelque chose de similaire se produit en Angleterre dans les églises romanes où, peut-être, la Les églises ayant des dédicaces mariales et quelques autres saints peuvent suivre cette norme, complétant ainsi l'orientation vers l'Orient.

Dans ce contexte, et compte tenu de l'objet de la présente étude, il est intéressant de noter qu'à l'exception d'un petit nombre d'ouvrages consacrés à des églises particulières, notamment en Angleterre et en Europe centrale, il n'existe pas d'études systématiques sur l'orientation des temples dans les périodes postérieures au Moyen Âge, comme c'est le cas actuellement. Comme nous le verrons, la grande majorité des églises et chapelles de Lanzarote ont commencé à être érigées des décennies après la conquête et la colonisation de l'île par les Normands au service de la couronne de Castille au XVe siècle.

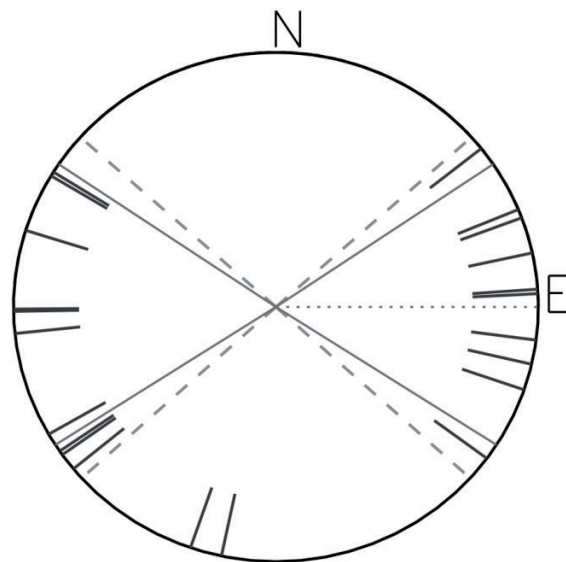


Figure 2: Orientation diagram of 23 early Christian churches in the north of Africa.

Il est intéressant de noter qu'une exception à la règle d'orientation est l'Afrique du Nord, où les églises sont construites dans des directions opposées. Les données présentées dans la figure 2 ont été obtenues par Esteban et al. (2001) et Belmonte et al. (2007), ainsi que d'autres qui n'ont pas été publiées précédemment (González-García 2013) et comprennent un total de 23 églises, en particulier en Afrique Proconsularis et en Tripolitaine, lieux d'origine possibles de la population autochtone des îles Canaries (Belmonte et al.2010). Il est intéressant d'observer que ces églises sont nombreuses et orientées vers l'Occident, ce qui était habituel dans les premiers temps du christianisme, comme indiqué ci-dessus. Il souligne également que la plupart des églises sont situées dans l'aire solaire, avec des concentrations aux équinoxes et aux solstices, ce qui pourrait donner des indices sur le processus de christianisation dans cette région.

En Espagne, tant dans la péninsule ibérique que dans les deux archipels, tandis que l'on rapporte des événements particuliers d'ombre et de lumière dans les temples romans à des moments particuliers comme l'équinoxe (comme à Santa Marta de Tera ou à San Juan de Ortega, dans les provinces respectives de Zamora et Burgos), la question de l'orientation des églises a été peu étudiée en général d'un point de vue statistique, ce qui a conduit à des explications de pèlerins revendicateurs sur la cause possible des déviations de certaines églises par rapport à l'orientation canonique (voir par exemple Godoy-Fernández, 2004). Perez-Valcárcel (1998) a enquêté sur l'orientation de 187 églises romanes du Chemin de Saint-Jacques. Bien que ses données n'incluent pas la mesure de la hauteur angulaire de l'horizon, ce qui est malheureusement très

courant dans d'autres études européennes, ce qui semble clair, c'est que il n'établit pas de relation générale entre l'orientation de ces églises et le lever du soleil à la date du saint patron du culte de l'Église.

Notre équipe a décidé de lancer un projet à grande échelle à la fois dans la péninsule ibérique et aux Canaries. Dans cette dernière, ce qui est montré ici est la première étude systématique développée jusqu'à présent. Toutefois, dans le cadre d'un programme plus large visant à mesurer de manière systématique les orientations des églises préromanes du territoire péninsulaire, González-García et al. (2013) ont consacré une attention particulière aux églises de la période asturienne et à son interaction avec la puissance musulmane dominante dans le sud de la péninsule. En particulier, il existe encore 13 églises de cette période dans les Asturies qui possèdent une orientation canonique, avec l'abside à l'Est, bien que généralement déviée de plusieurs degrés vers le Nord de l'Est. En outre, les auteurs ont constaté que les mosquées d'Al Andalus, bien qu'elles aient pu être orientées vers la Mecque, avec des qiblahs qui auraient pu être conformes aux alignements canoniques des églises. Cependant, il semblerait que les mosquées "évitent" les orientations possibles qui pourraient confondre leurs temples avec des églises, tandis que les églises asturiennes, et peut-être les Mozarabes qui ont suivi immédiatement, ont également tendance à éviter les positions qui confondent ces temples avec des mosquées, dans un exemple d'interaction entre la religion, le pouvoir et l'astronomie. Par conséquent, nous voyons que dans des circonstances exceptionnelles, les modèles canoniques peuvent être modifiés.

Enfin, García-Quintela et al. (2013) ont étudié l'introduction du christianisme dans le nordouest de la péninsule et le remplacement éventuel d'éléments indo-européens (celtiques) par des facteurs chrétiens,



Figure 3: Église de Nuestra Señora de las Mercedes à Mala.

par l'introduction de ce qu'ils ont appelé un "paysage martyr": par l'orientation des églises et la christianisation de leur environnement, ainsi que par la création de mythes et d'histoires qui ont canalisé, modifié ou remplacé les éventuels cultes païens. Ainsi, il serait intéressant d'analyser cette même phénoménologie aux Canaries et, en particulier, sur l'île de Lanzarote, un cas particulièrement frappant puisqu'elle a été la première à être colonisée par l'Europe et que sa taille et le nombre de ses noyaux de population permettraient d'étudier un échantillon statistiquement significatif dans un espace très compact et réduit.

Exemple: Les églises et chapelles de Lanzarote. Conclusions

Après la conquête et la colonisation de l'île canarienne de Lanzarote par les populations européennes au début du XVe siècle, la colonisation à grande échelle a commencé dans les siècles suivants avec l'établissement de petites fermes et de hameaux, à côté de certains sites plus anciens comme Femés ou Teguisse, où s'est achevée la construction d'un nombre important de temples chrétiens qui illustrent la nouvelle situation sociale et religieuse. Dans certains endroits, il est possible que les bâtiments aient été orientés en imitant les modèles de culte autochtones. Dans d'autres, la tradition de l'alignement canonique des temples à l'Est (avec quelques exceptions à l'Ouest) a été respectée mais avec un degré de liberté plus grand que d'habitude. À cet égard, il convient de mentionner que seule l'église de Mala semble présenter une orientation compatible avec le lever du soleil le jour de l'invocation (mariale) du temple (figure 3)

Enfin, à Lanzarote, il y a un nombre statistiquement significatif d'églises orientées vers le Nord-Nord-Est, ce qui constitue une exception notable à la règle. Diverses possibilités ont été analysées pour expliquer cette anomalie, ce qui a permis de conclure que la réponse la plus plausible est à son tour la plus prosaïque. Ce schéma d'orientation semble obéir à un désir d'éviter les forts vents dominants sur l'île, précisément de cette direction, et, en particulier, d'éviter les désagréments causés par le sable déplacé par le vent dans les bâtiments proches ou limitrophes d'El Jable, une région sablonneuse du nord de l'île.

Ce n'est que la première expérience d'un projet que nous espérons pouvoir entreprendre dans les années à venir, en mesurant l'orientation des plus anciens temples chrétiens dans d'autres îles de l'archipel des Canaries. À cet égard, nous supposons que l'étude de l'île de Fuerteventura, soumise au même flux de vent, soufflant encore plus fort, sera un cas d'étude très intéressant à

comparer avec l'île voisine de Lanzarote.
Les églises de Fuerteventura auront-elles également deux poids, deux mesures ? Ses bâtisseurs ont osé enfreindre le précepte canonique pour imposer les besoins humains du culte? Le temps dira...

Bibliographie

Belmonte J.A., *Pirámides, templos y estrellas: astronomía y arqueología en el Egipto antiguo*, Crítica, Barcelona, 2012.

Belmonte, J.A. y Sanz de Lara M., *El Cielo de los Magos*, La Marea, La Laguna, 2001.

Belmonte J.A., Tejera A., Perera M.A. y Marrero R., "On the orientation of pre-Islamic temples of North-west Africa: a reappraisal. New data in Africa Proconsularis", *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* 6, 3: 77-85. 13, 2007.

Belmonte J.A., Perera Betancort M.A. y González García A.C., "Análisis estadístico y estudio genético de la escritura líbico-bereber de Canarias y el Norte de África", en *VII Congreso de patrimonio histórico: inscripciones rupestres y poblamiento del Archipiélago Canario*, Cabildo de Lanzarote, Arrecife, (2010).

Čaval, S. (2009). "Astronomical orientations of Sacred Architecture during the Medieval period in Slovenia", en J.A. Rubiño-Martín, J.A. Belmonte, F. Prada and A. Alberdi (eds.), *Cosmology Across Cultures*, 209-19. San Francisco. Astronomical Society of the Pacific.

Estéban, C., Belmonte, J.A., Perera Betancort, M.A., Marrero, R. y Jiménez González, J.J., "Orientations of pre-Islamic temples in North-West Africa", *Archaeoastronomy* 26, S65-84, (2001).

Gangui A.; González García A.C.; Perera Betancort M.A. y Belmonte, J.A., *La orientación como una señal de identidad cultural: las iglesias históricas de Lanzarote*, Tabona en prensa, 2015.

García Quintela, M.V., González-García, A.C. y Seoane-Veiga, Y., "De los solsticios en los castros a los santos cristianos: la creación de un paisaje mártir en Galicia", *Madridier Mittelungen*, 2013.

González-García, A.C., "A voyage of christian medieval astronomy: symbolic, ritual and political orientation of churches", en F. Pimenta, N. Ribeiro, F. Silva, N. Champion, A. Joaquineto, L. Tirapicos (eds.): *Stars and stones*. British Archaeology reports, 2013.

González-García, A.C. y Belmonte, J.A., "Which Equinox?" *Archaeo-astronomy, The Journal of Astronomy in Culture* 20. 97-107, 2006.

González-García, A.C., Belmonte J.A. y Costa-Ferrer, L., "The orientation of pre-Romanesque churches in Spain: Asturias, a case of power re-affirmation", en M.A. Rappenglueck, B. Rappenglueck and N. Champion (eds.), *Astronomy and Power*. British Archaeology Reports, 2013.

Godoy Fernández, C., "A los pies del templo. Espacios litúrgicos en contraposición al altar: una revisión", *Antigüedad Cristiana* 21, 473-89, 2004.

Krupp E.C., *Echoes of the Ancient Skies*, Harper & Row, Nueva York, 1983.

Krupp E.C., *En busca de las antiguas astronomías*, Pirámide, Barcelona, 1989.

Krupp E.C., *Beyond the Blue Horizon*, Oxford University Press, Oxford, 1991.

McCluskey, S.C., *Astronomies and cultures in early Medieval Europe*. Cambridge University Press. Cambridge, 1998.

McCluskey, S.C., "Astronomy, Time, and Churches in the Early Middle Ages", in M.-T. Zenner, Villard's legacy: *Studies in Medieval Technology, Science and Art in Memory of Jean Gimpel*. Ashgate, Aldeshot: 197-210, 2004.

McCluskey, S.C., "Calendric cycles, the eighth day of the World and the orientation of English Churches", en C. Ruggles and G. Urton (eds.), *Skywatching in the Ancient World, New Perspectives in Cultural Astronomy*, 331-353. University Press of Colorado. Bolder, 2010

