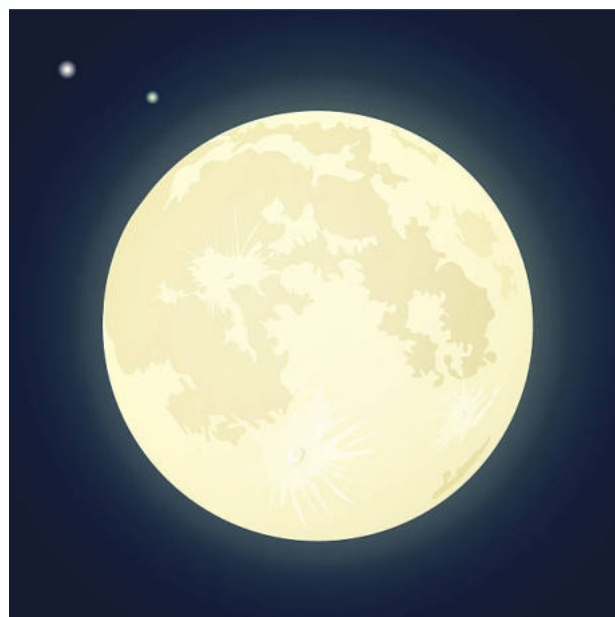


N° 169
NOVEMBRE
2024

LE CIEL DE RHUYS



Les satellites jouent un rôle essentiel dans notre compréhension de l'espace et dans notre vie quotidienne. Savez-vous quelle est la différence entre un satellite naturel et un satellite artificiel ?



Les satellites, qu'ils soient naturels ou artificiels, sont souvent visibles dans le ciel nocturne. Les satellites artificiels, en orbite basse, sont parfois confondus avec des étoiles filantes à cause de leur déplacement rapide. Toutefois, contrairement aux étoiles filantes qui traversent le ciel en une fraction de seconde, les satellites artificiels maintiennent une trajectoire stable et uniforme. Certains satellites, comme ceux de la constellation Iridium, émettent des flashes lumineux grâce à leurs antennes en aluminium, ce qui facilite leur observation. En revanche, les satellites géostationnaires, situés à une altitude bien plus élevée, restent fixes dans le ciel. La Station spatiale internationale (ISS) est également visible à l'œil nu et laisse une trace lumineuse constante lors de son passage.

Qu'est-ce qu'un satellite naturel pour les planètes ? Définition

Un satellite naturel est un objet céleste qui tourne autour d'une planète. Dans le système solaire, plusieurs planètes possèdent des satellites naturels, appelés aussi "lunes". La Terre, par exemple, a la Lune comme satellite naturel. Ces satellites sont généralement formés naturellement grâce, par exemple, à la capture d'un astéroïde. Ganymède, satellite de Jupiter, est le plus grand du système solaire avec un diamètre supérieur à celui de Mercure. Les lunes peuvent influencer leur planète par des effets de marée, à l'image de la Lune sur les océans de la Terre. Ces satellites, souvent en rotation synchrone avec leur planète, accomplissent une révolution complète en fonction de leur distance orbitale.

À quoi servent les satellites artificiels dans l'espace, quelle est leur vitesse, comment fonctionnent-ils et à quelle altitude sont-ils ?

Les satellites artificiels sont des objets fabriqués par l'homme et envoyés en orbite pour accomplir diverses missions. Le tout premier, baptisé *Spoutnik*, a été lancé en 1957 par l'URSS. Aujourd'hui, ces appareils embarquent des équipements nécessaires pour des besoins de communication, de météo, de navigation et d'observation de la Terre et de l'univers. Certains satellites artificiels sont placés en orbite géostationnaire à 36 000 kilomètres de la Terre : ils sont parfaits pour les télécommunications. D'autres, comme les satellites météorologiques ou scientifiques, orbitent à des altitudes plus basses pour capter des informations en temps réel.

En dehors de la Lune de notre système solaire, combien y a-t-il de satellites en orbite autour de la Terre ?

Autour de la Terre, on trouve deux catégories principales de satellites : les satellites naturels, comme la Lune, et les satellites artificiels. Alors que la Lune est le seul satellite naturel de notre planète, il existe actuellement plus de 7 500 satellites artificiels actifs en orbite, selon les chiffres de 2023. *Spoutnik*, le tout premier satellite à avoir été mis en orbite en 1957, avait la taille d'un ballon de basket. Il a orbité autour de la Terre pendant trois mois. En novembre 1965, la France a suivi avec le lancement du satellite *Astérix*. Le pays a ainsi été le troisième à envoyer un satellite dans l'espace après l'URSS et les États-Unis avec *Explorer 1* en 1958. Ces satellites artificiels se sont rapidement intégrés dans notre vie quotidienne, jouant un rôle essentiel dans les domaines clés tels que les télécommunications, la navigation et la météorologie.

Le ciel de novembre

Sommaire:

- Edito
- Le ciel du mois
- Essaims, étoiles filantes,
Planètes
La Lune
Carte du ciel
- Cours d'astronomie à suivre
- Signaux extraterrestres
- Biographie de :Jfrank Drake**
- Constellation : Le Dragon**
- Légende :Les hespérides**
- Le saviez-vous ?
- Enigmes
- La galaxie du Têtard
- Lire, voir, sortir

2024 11 01 13:47 NOUVELLE LUNE

2024 11 05 01:00 Pluie d'étoiles filantes : Taurides S. (7
météores/heure au zénith; durée = 71,0 jours)

2024 11 05 01:48 Rapprochement entre la Lune et Vénus
(dist. topocentrique centre à centre = 3,4°)

2024 11 09 06:56 PREMIER QUARTIER DE LA LUNE

2024 11 10 11:59 Rapprochement entre Mercure et
Antarès (dist. topocentrique centre à centre = 2,0°)

2024 11 12 01:00 Pluie d'étoiles filantes : Taurides N. (5
météores/heure au zénith; durée = 51,0 jours)

2024 11 12 20:32 Rapprochement entre Vénus et M 8
(dist. topocentrique centre à centre = 1,3°)

2024 11 13 22:13 Opposition de l'astéroïde 11
Parthenope avec le Soleil (dist. au Soleil = 2,430 UA; magn. = 9,8)

2024 11 14 12:18 Lune au périgée (distance géoc. = 360 109 km)

2024 11 15 22:29 PLEINE LUNE

2024 11 15 23:46 Rapprochement entre la Lune et Uranus (dist. topocentrique centre à
centre = 3,7°)

2024 11 16 12:00 PLUS GRANDE ÉLONGATION EST de Mercure (22,4°)

2024 11 17 03:43 OPPOSITION de Uranus avec le Soleil

2024 11 17 05:00 Pluie d'étoiles filantes : Léonides (10 météores/heure au zénith; durée =
24,0 jours)

2024 11 19 01:43 Rapprochement entre Vénus et M 22 (dist. topocentrique centre à centre =
1,6°)

2024 11 20 02:21 Rapprochement entre la Lune et Pollux (dist. topocentrique centre à centre
= 2,1°)

2024 11 21 01:00 Pluie d'étoiles filantes : Alpha Monocérosides (durée = 10,0 jours)

2024 11 21 05:06 Rapprochement entre la Lune et M 44 (dist. topocentrique centre à centre
= 2,4°)

2024 11 22 09:44 Maximum de l'étoile variable delta de Céphée

2024 11 23 02:28 DERNIER QUARTIER DE LA LUNE

2024 11 23 05:10 Minimum de l'étoile variable Algol (bêta de Persée)

2024 11 23	23:50	Minimum de l'étoile variable bêta de la Lyre
2024 11 24	03:42	Début de l'occultation de 63-chi Leo (magn. = 4,62)
2024 11 24	04:45	Fin de l'occultation de 63-chi Leo (magn. = 4,62)
2024 11 26	01:59	Minimum de l'étoile variable Algol (bêta de Persée)
2024 11 26	12:56	Lune à l'apogée (distance géoc. = 405314 km)
2024 11 27	18:32	Maximum de l'étoile variable delta de Céphée
2024 11 28	22:48	Minimum de l'étoile variable Algol (bêta de Persée)
2024 11 29	04:07	Maximum de l'étoile variable éta de l'Aigle
2024 11 29	23:34	Maximum de l'étoile variable zêta des Gémeaux

Etoiles filantes, essaims et comètes.

Taurides Nord (NTA)

L'essaim météoritique des Taurides Nord (NTA) produit de lents météores d'une vitesse de 29 km par seconde. Au moment du maximum, le taux horaire moyen (ZHR) est de 5 météores par heure. Tout comme l'essaim des Taurides Sud (STA), les météores des Taurides Nord font parties du complexe des Taurides et sont associés à la comète 2P/Encke.

La découverte des Taurides a été faite en 1869. Les Taurides Nord ont été observées par Giuseppe Zezioli. Les Taurides Sud ont été observées par T. W. Backhouse, et probablement par G. L. Tupman. Alors que les Taurides Sud ont fait l'objet de peu de détections au cours du reste du 19ème siècle, les Taurides Nord ont été fréquemment observées, mais personne n'a reconnu qu'il s'agissait d'un essaim annuel de la région du Taureau visible début Novembre.

Période d'activité : du 20 Octobre au 10 Décembre

Maximum : 12 Novembre Longitude solaire (λ) : 230°

position du radiant au moment du maximum

ascension droite (α) : 058° déclinaison (δ) : $+22^\circ$

Vitesse (en km/s) : 29 r : 2.3 ZHR : 5

Comète associée : 2004 TG10

Léonides

Les recherches de textes anciens effectuées par Edward C. Herrick en 1841, par Hubert Anson Newton en 1864, puis en 1958 par Susumu Imoto et Ichiro Hasegawa, pour les textes anciens chinois, japonais et coréens, et plus récemment par Donald K. Yeomans et Gary W. Kronk, ont mis en évidence de nombreuses traces de pluies météoriques, attribuées aux Léonides, dont la plus ancienne remonte à l'an 901.

Mais l'intérêt pour cet essaim, produisant de spectaculaires pluies de météores, a surtout débuté peu après la grande tempête de 1833. L'une des plus célèbres tempêtes de météores s'est produite le 17 Novembre 1833, lorsque la Terre croisa l'essaim des Léonides. Ce jour-là, des nombreux observateurs de la côte Est des Etats-Unis et de la région des Chutes du Niagara, virent surgir des centaines de météores par minute, soit environ 50.000 à 200.000 mé-

météores par heure, semblant provenir de la région de la constellation du Lion (*Leo*). Le nom de Léonides fut donné à cet essaim.

Déjà, en Novembre 1799, un phénomène similaire avait été observé par le naturaliste allemand Alexander von Humboldt (1769-1859) en compagnie du botaniste français Aimé Bonpland (1773-1858), au large des côtes du Vénézuëla.

Le médecin allemand Heinrich Olbers (1758-1840), découvreur des astéroïdes Vesta et Pallas, fut le premier à oser prédire un retour de l'essaim pour 1867 en se basant sur l'étude de documents historiques plus anciens. Ainsi en Novembre 1866, une nouvelle pluie importante de météores s'abattit sur notre planète, confirmant ainsi la périodicité de l'essaim. Il était maintenant évident que l'essaim revenait tous les 33 ans, mais restait à en trouver l'origine !

Le voile fut levé par la découverte d'une comète de magnitude 6, le 19 Décembre 1865 par Ernst Wilhelm Leberecht Tempel (1811-1889), mais également par Horace Parnell Tuttle le 6 Janvier 1866. La comète fraîchement découverte, et aujourd'hui dénommée 55P/Temple-Tuttle, fut visible pendant plusieurs semaines. Le calcul des éléments orbitaux montrait une grande similitude avec ceux de l'essaim, et confirmait la paternité de cette comète pour l'essaim météoritique des Léonides.

L'influence perturbatrice de Saturne et de Jupiter, en agissant sur la partie la plus dense de l'essaim, fit que l'averse suivante, prévue en 1899 n'eut pas lieu. Toutefois, l'essaim se manifesta de nouveau en 1901 mais le nombre de météores observés ne fut pas exceptionnel. Le retour suivant, en 1932 fut encore plus décevant.

En revanche, en 1966, en raison de nouvelles perturbations, l'on vit quelques 150.000 météores par heure à l'ouest des Etats-Unis et au Mexique. Ce retour de pluie météoritique coïncide avec la redécouverte de 55P/Temple-Tuttle qui s'était fait plutôt discrète depuis sa découverte 100 ans auparavant.

Le nouveau passage au périhélie de la comète 55P/Temple-Tuttle en Février 1998, donna l'occasion aux prévisionnistes d'améliorer considérablement leurs modèles de prévision pour les années suivantes et de décrire avec précision le comportement de cet essaim atypique mais fascinant.

Période d'activité : du 6 au 30 Novembre

Maximum : 17 Novembre Longitude solaire (λ) : 235.27°

position du radiant au moment du maximum ascension droite (α) : 152°

déclinaison (δ) : +22° Vitesse (en km/s) : 71 r : 2.5 ZHR : 15?

Comète associée : [55P/Temple-Tuttle](#) (période de 33.2 ans)

alpha-Monocérotides (AMO)

L'essaim des alpha-Monocérotides (AMO) produit des météores assez rapides avec une vitesse de 65 km par seconde, avec une activité variable. Des sursauts d'activité ont été observés en 1925, 1935, 1985 et le dernier, en 1995, a été vu par de nombreux observateurs d'Europe. Le taux horaire moyen estimé en 1995 était d'environ 400 météores par heure durant environ 30 minutes, avec un pic de 420 météores par heure sur une courte période de 5 minutes.

L'essaim pourrait être associé à la comète 1943 W1 (van Gent-Peltier-Daimaca).

Notre connaissance actuelle de cet essaim météoritique est principalement basée sur les observations visuelles obtenues au cours de trois années séparées, mais les implications sont que cet essaim est de courte durée et possède une période apparente de presque exactement

dix années.

La découverte est à mettre au crédit de F. T. Bradley, qui a observé en premier l'essaim en 1925.

Période d'activité : du 15 au 25 Novembre

Maximum : 21 Novembre Longitude solaire (λ) : 239.32°

position du radiant au moment du maximum

ascension droite (α) : 117° déclinaison (δ) : $+01^\circ$

Vitesse (en km/s) : 65 r : 2.4

ZHR : variable, habituelle ~ 5 , mais peut produire des sursauts d'activité jusqu'à $\sim 400+$

Comète associée : van Gent-Peltier-Daimaca (?)

Visibilité des planètes

Mercure : timidement dans les lueurs du crépuscules milieu du mois(Lib, Sco, oph)

Vénus : visible à la tombée de la nuit (Oph, Sgr)

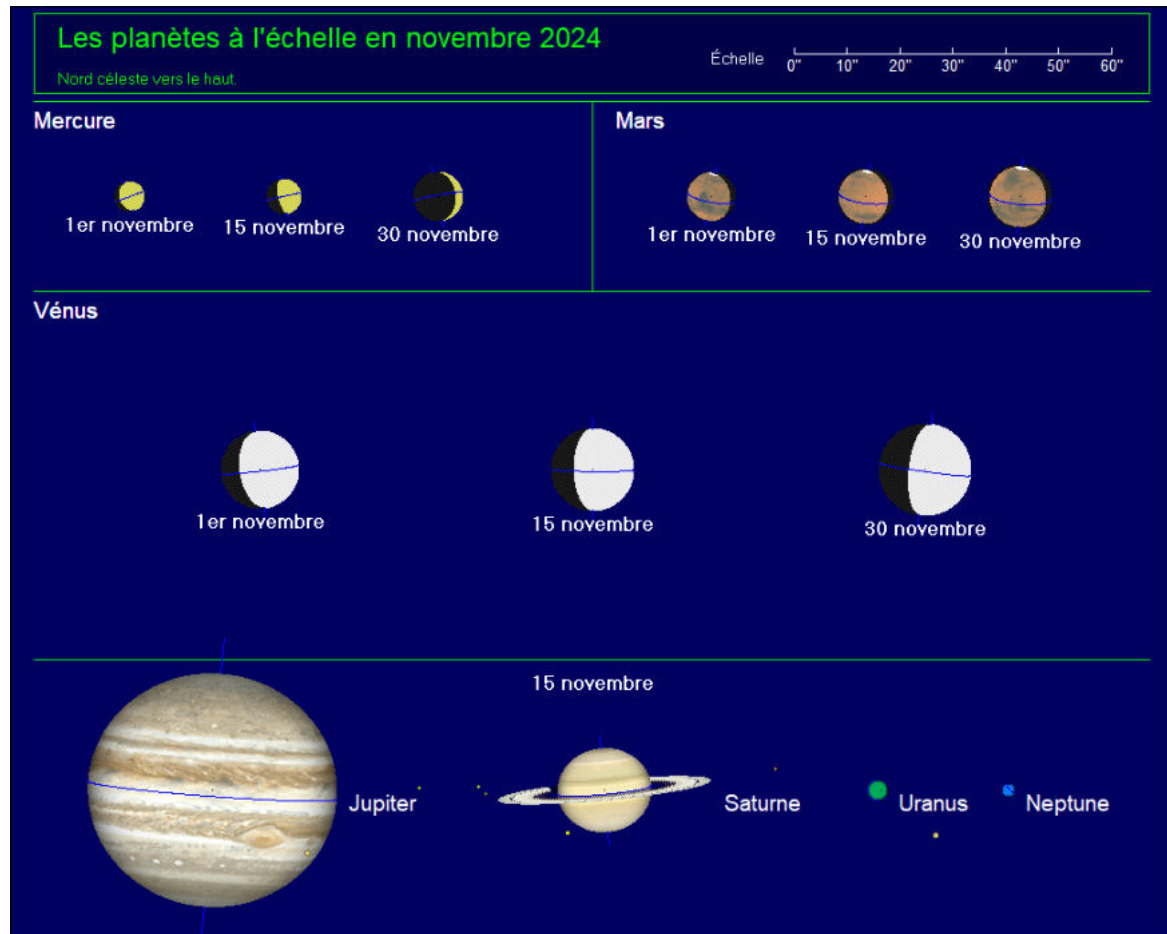
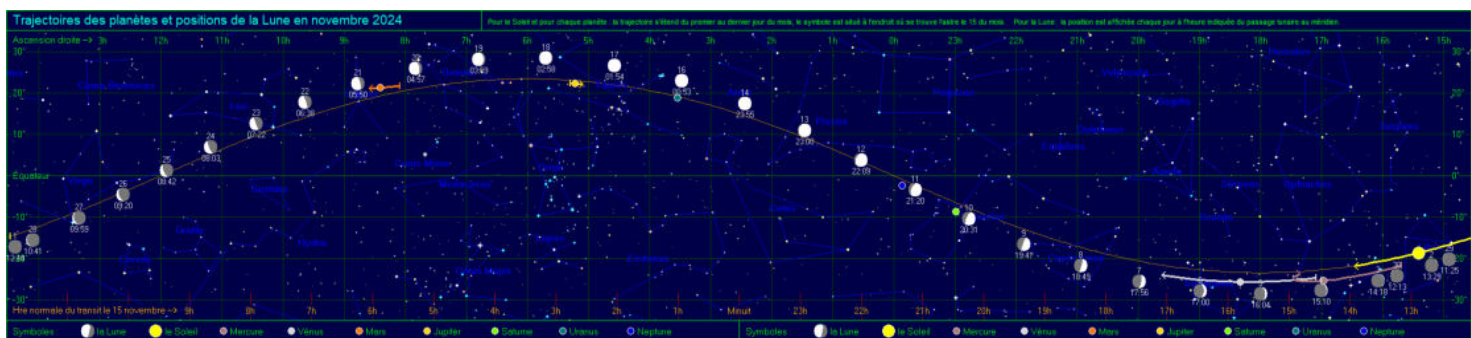
Mars : visible en seconde partie de nuit (Cnc)

Jupiter : bien visible une grande partie de la nuit (Tau)

Saturne : visible en début de nuit (Aqr)

Uranus : observable une grande partie de nuit (Tau)

Neptune : visible en début de nuit (Poissons)

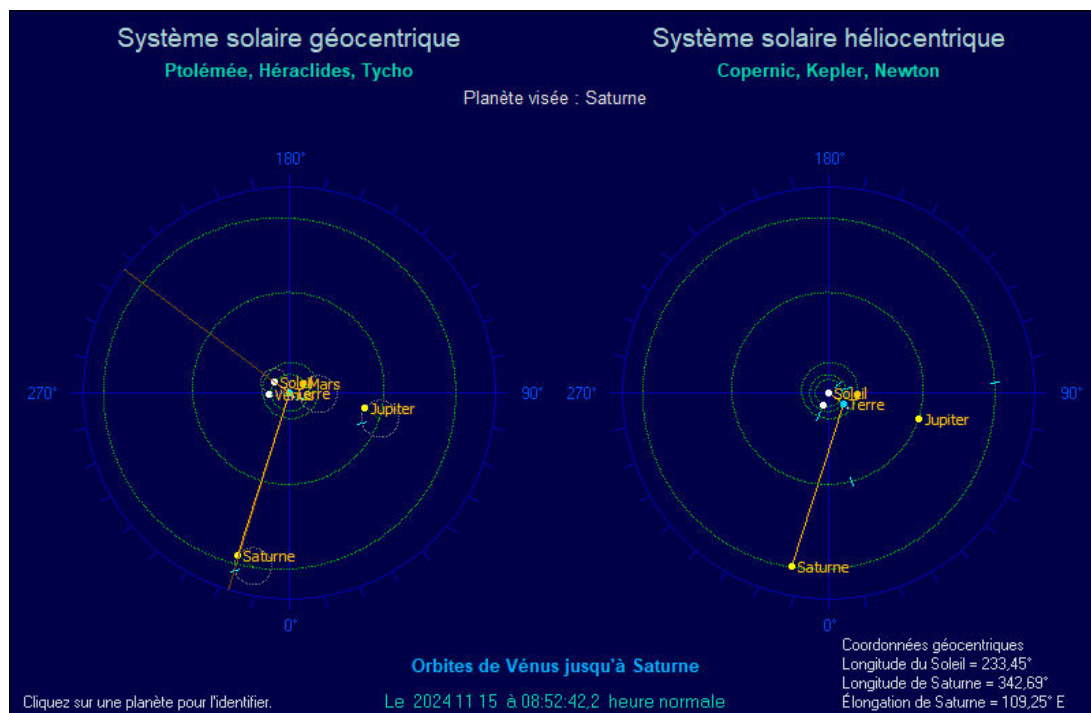


Phases lunaires pour novembre 2024

Les phases sont affichées pour 0 h, heure normale de Nantes. Les traits jaunes indiquent l'orientation des pôles lunaires.

Le trait rouge montre la direction de la libration. Sa longueur est proportionnelle à l'intensité de la libration. Le Nord lunaire est vers le haut.

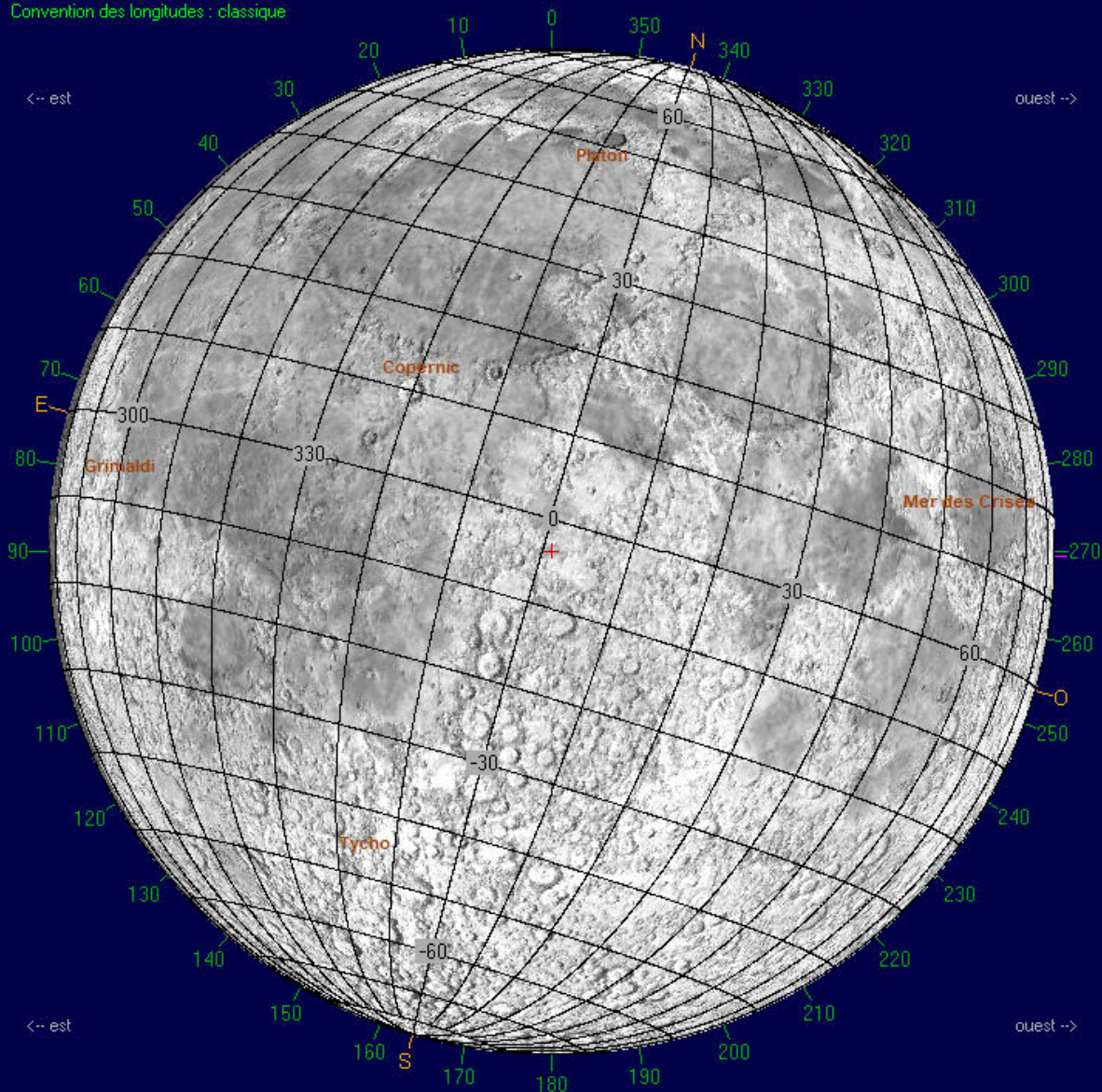
Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi
					1 NL à 13:47 HN	2
3 	4 	5 	6 	7 	8 	9 PQ à 06:56 HN
10 	11 	12 	13 	14 	15 PL à 22:29 HN	16
17 	18 	19 	20 	21 	22 	23 DQ à 02:28 HN
24 	25 	26 	27 	28 	29 	30

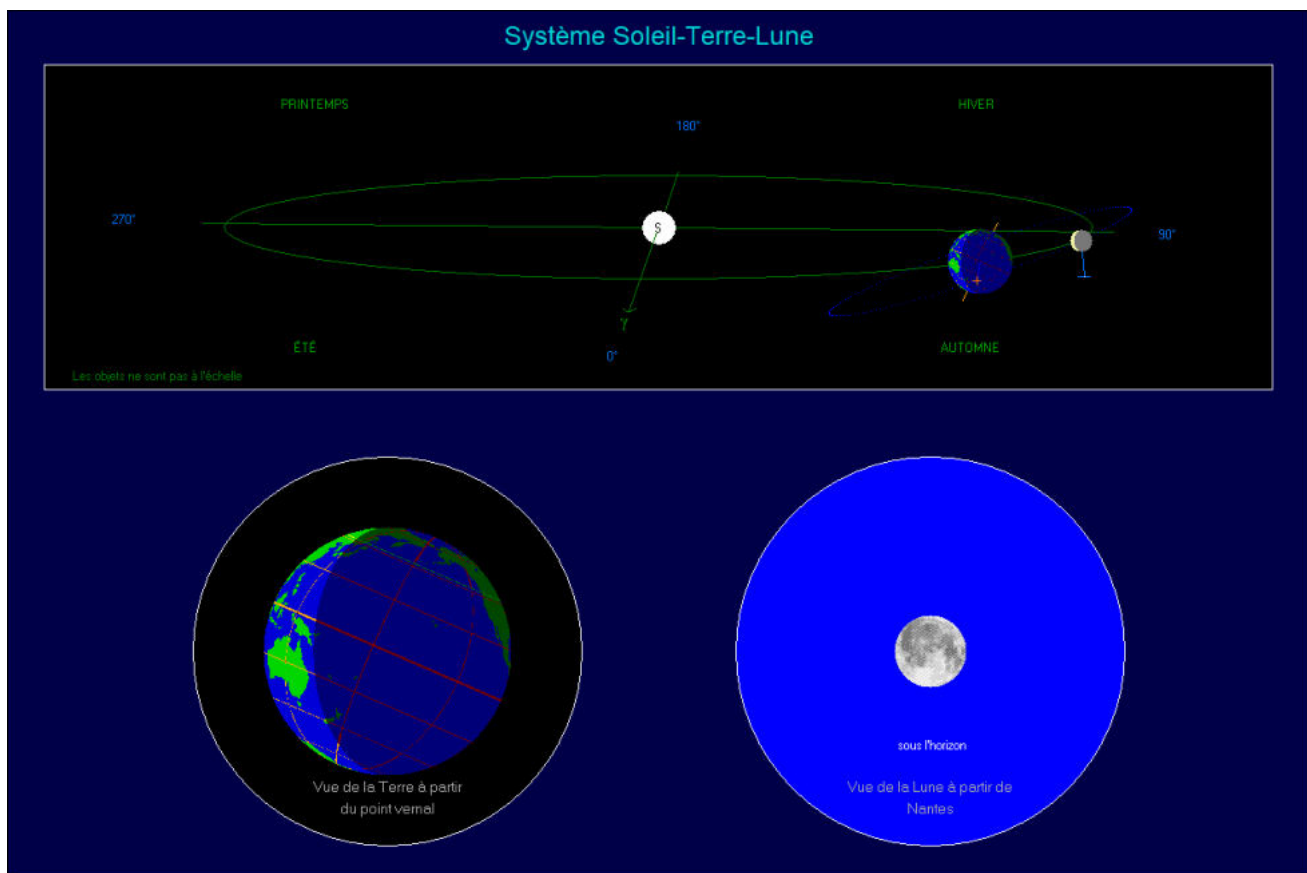
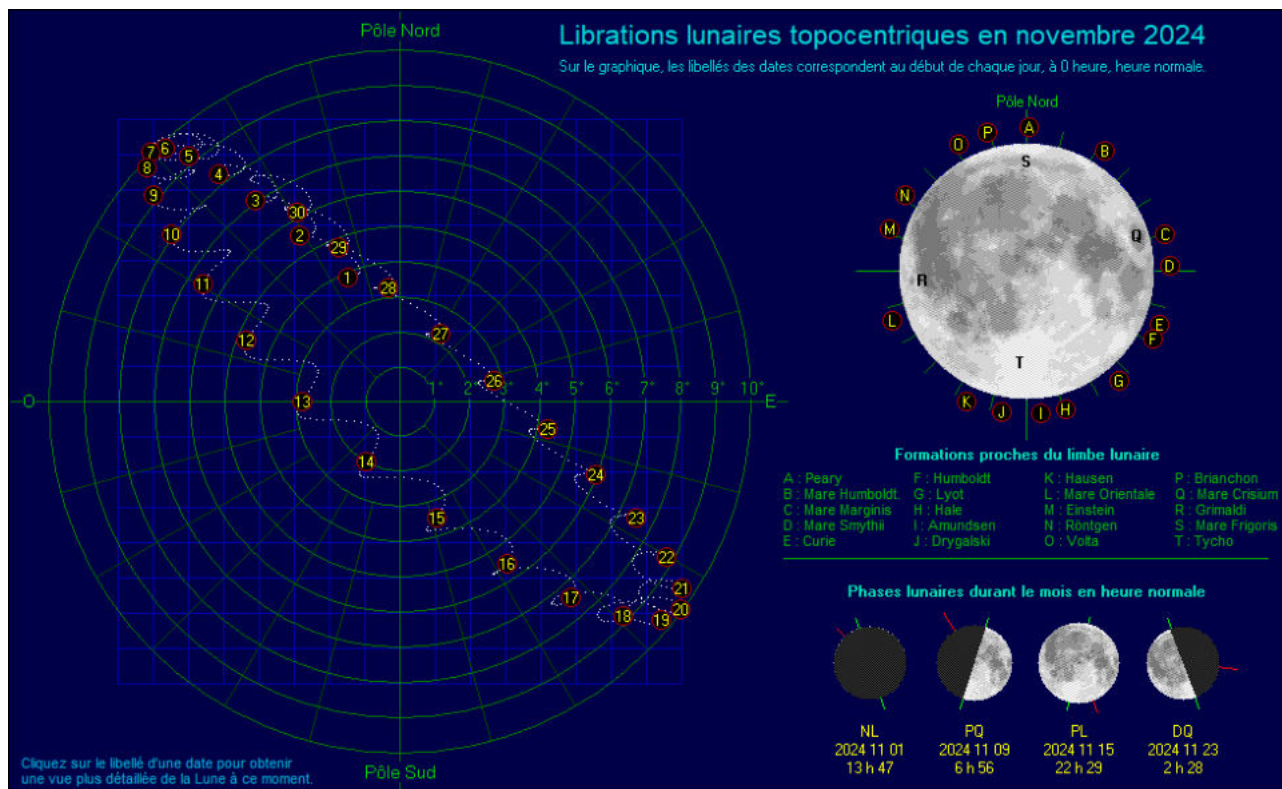


Carte de la Lune (vue topocentrique)

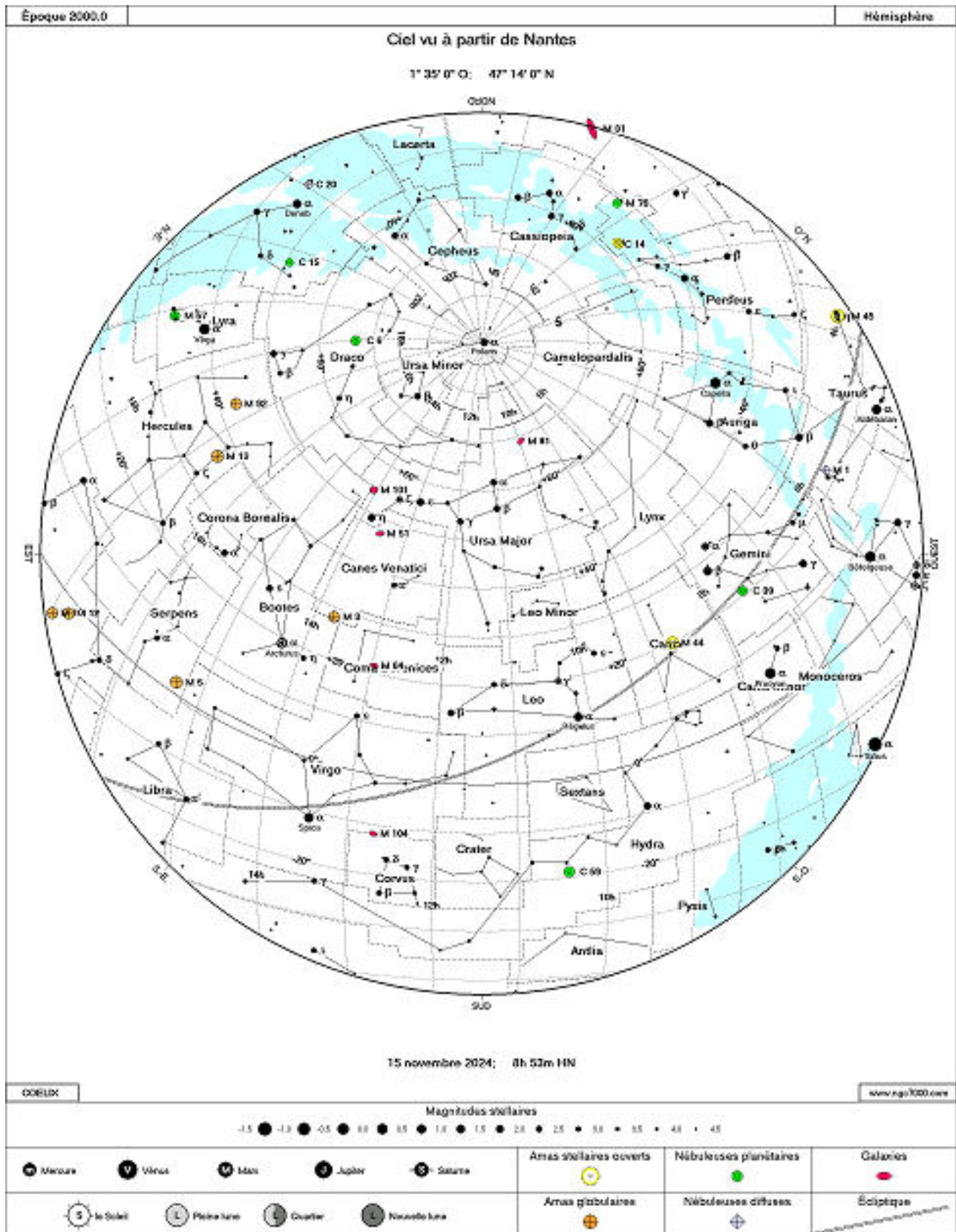
Angle de position du pôle Nord = $343,96^\circ$
 Angle de position du limbe éclairé = $269,53^\circ$
 Pourcentage d'illumination = 99,38%
 Convention des longitudes : classique

Longitude sélénographique du centre du disque = $1,12^\circ$
 Latitude sélénographique du centre du disque = $-3,63^\circ$
 Longitude du terminateur du soleil levant = $279,81^\circ$





CARTE DU CIEL



Comment utiliser la carte du ciel : si par exemple vous observez vers l'ouest, tenez la carte devant vous en plaçant le mot ouest vers le bas. Les constellations dessinées au-dessus de l'horizon Ouest vous font face sur le ciel. Le centre de la carte correspond au zénith, le point situé au-dessus de votre tête. Une constellation représentée à mi-distance du centre et du bord de la carte est donc à égale distance de l'horizon et du zénith.

Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

IV Les mouvements perturbés

Résumé : Dans ce chapitre, très bref, nous découvrirons les succès, les difficultés résolues et enfin les impossibilités plus fondamentales de la mécanique de Newton. Les difficultés proviennent de la portée infinie de l'attraction gravitationnelle, qui oblige à prendre en compte, en principe, toutes les masses pour calculer la trajectoire d'une seule d'entre elles.

Introduction

Nous avons rencontré, lors des chapitres précédents, différentes lois physiques qui semblent gouverner le monde céleste, et même le monde tout court. Après Newton, il a semblé que tout pouvait être expliqué par quelques lois de mécanique, en l'occurrence les trois lois fondamentales du mouvement, plus l'expression de l'attraction universelle. Nous ferons un petit rappel de ces lois. Nous mettrons en lumière quelques-unes de leurs propriétés qui déboucheront sur des conséquences embarrassantes.

L'application de ces nouvelles lois de la mécanique n'était pas toujours facile. Les calculs étaient d'une telle complexité que parfois certains astronomes doutèrent de la validité de certaines lois. Pourtant, à force d'acharnement et d'habileté mathématique, tout parut valider ces lois newtoniennes. Les succès furent nombreux et brillants. Mais bientôt, quelques failles apparurent, qui obligèrent à une révision bouleversante.

Les lois de Newton

Nous avons déjà parlé des lois que Newton avait mises à la base de sa mécanique. Elles étaient au nombre de trois. Nous les rappelons :

Première loi : La Loi d'inertie. En l'absence de force extérieure, la quantité de mouvement (produit de la masse par la vitesse) d'un système demeure constante.

Deuxième loi : Relation fondamentale de la dynamique. Si une force agit sur un corps, le corps accélère dans la direction de la force. Celle-ci est égale à la variation de la quantité de mouvement par unité de temps¹³.

Troisième loi : Loi de la réaction. Les forces sont toujours mutuelles. Si un corps exerce une force sur un autre corps, ce dernier réagit sur le premier avec une force égale et opposée. Newton, pour comprendre le mouvement de la Lune et retrouver les lois de Kepler, a dû postuler, en plus, que tous les corps s'attiraient mutuellement en raison inverse du carré de leur distance et proportionnellement au produit de leur masse. C'est la fameuse loi d'attraction universelle. Par des considérations cinématiques, Newton est parvenu à calculer l'accélération produite sur un corps par une force perpendiculaire à la direction de sa vitesse (voir chapitre III).

Ces trois lois faisaient intervenir les concepts précis de « force », « quantité de mouvement » et « masse ». La loi d'inertie de Galilée pouvait s'exprimer à partir de ce concept nouveau de quantité de mouvement. Deux de ces quantités, la masse et la quantité de mouvement, se conservent (demeurent constantes) malgré l'évolution du système :

1) la masse, qui mesure la quantité de matière d'un corps, se conserve. Ce n'est pas une notion aussi évidente que ce que l'on pourrait penser. On peut l'expérimenter avec un enfant qui pensera que la quantité de pâte à modeler dépend de la forme. Nous verrons bientôt que cette notion de conservation de la masse a été englobée dans une notion encore plus générale, celle de la conservation de l'énergie, par la célèbre relation d'Einstein $E = mc^2$.

2) la quantité de mouvement est une notion encore plus abstraite : le produit d'une masse par une vitesse ! Pourtant nous pouvons essayer d'imaginer une situation où cette loi peut se « ressentir ». Imaginez que vous êtes sur une surface parfaitement glacée, sans frottement. Si vous poussez une personne, de même masse que vous, vous reculerez, chacun dans des directions opposées, avec une vitesse égale. Si au lieu de pousser une personne vous poussiez un mammouth (je dis mammouth plutôt qu'éléphant, à cause du sol gelé !) vous reculerez à grande vitesse alors que le mammouth resterait presque immobile. C'est la loi de la conservation de la quantité de mouvement.

Origine des lois de conservation

La mathématicienne Emmy Noether montra, par des considérations très générales, que ces lois de conservation résultent de propriétés de l'espace et du temps. La démonstration sort du propos de ce cours élémentaire, mais il est important de connaître l'origine profonde de ces lois qui nous gouvernent.



Crédits : www.agnesscott.edu Emmy Noether 1882-1935

La conservation de l'énergie (et indirectement de la masse) est liée au fait que le temps s'écoule de manière uniforme. N'importe quel instant peut servir d'origine. C'est l'uniformité du temps.

La conservation de la quantité de mouvement est liée au fait que tous les points de l'espace sont équivalents. N'importe quel point peut servir d'origine des positions. C'est l'homogénéité de l'espace.

Il existe une autre loi de conservation, applicable pour les systèmes en rotation. C'est ce qu'on appelle la conservation du moment cinétique. Cette loi est liée au fait que toutes les directions sont équivalentes. C'est l'isotropie de l'espace.

Quelques propriétés gênantes des lois de la mécanique

La loi de la gravitation universelle et la conservation de la quantité de mouvement avaient des propriétés qui portaient en elles des complications insoupçonnées.

L'expression même de la loi d'attraction universelle montre que si la distance entre les corps est nulle, la force d'attraction devient infinie. C'est une difficulté pour la microphysique, mais pas pour l'astrophysique dont nous allons parler. C'est au contraire à l'opposé, quand la distance devient infinie, que nous rencontrerons des problèmes. La force tend vers zéro, mais il n'y a pas de limite à la portée de cette attraction. Tous les corps de l'univers agissent les uns sur les autres. Le moindre déplacement d'une masse quelque part dans l'univers doit, en principe, retentir sur tous les autres corps. Si par exemple je me déplace dans mon bureau, en toute rigueur la trajectoire des planètes doit en être modifiée. Évidemment, ma faible masse,

comparée à celle des planètes, rend mon influence infime, mais pas nulle.

La conservation de la quantité de mouvement pose également un problème dans la définition du repère de référence. Expliquons un peu plus en détail. Tant que l'homme se croyait sur une Terre immobile, au centre de l'univers, il n'y avait pas de problème. Mais du fait de la conservation de la quantité de mouvement, la réalité est que le Soleil et la Terre tournent tous deux autour du centre de gravité commun. Si la Terre se déplace un peu, elle induit un petit déplacement du Soleil. La Lune en « tournant autour de la Terre » induit un petit mouvement à la Terre. Le plan de l'écliptique, ce plan si important pour les observations, n'est donc pas exactement le plan défini par l'orbite de la Terre, mais par celui, moins directement accessible, de l'orbite du couple Terre-Lune. Notons que cette particularité a été mise à profit par M. Mayor et D. Queloz, pour réaliser la première détection de planètes extrasolaires (exoplanètes), en mesurant, pour des étoiles proches, les petits déplacements périodiques induits par ces planètes invisibles.

Les succès de la mécanique de Newton

Les premières analyses détaillées furent appliquées au mouvement de la Lune et aux planètes. La trajectoire de chaque planète étant définie par les différents paramètres qui la caractérisent (voir le chapitre précédent), il était possible de prévoir précisément les positions de chacune d'elles, à tout moment.

En 1790, l'orbite de la planète Uranus fut calculée avec précision par Delambre. Cette planète, découverte par hasard neuf ans plus tôt par W. Herschell, ne semblait pas suivre exactement les prédictions. Les perturbations causées par Jupiter et Saturne n'expliquaient pas les écarts. Vers les années 1840, les désaccords entre observation et prédiction étaient de l'ordre de 2', donc très significatifs. Un jeune étudiant anglais, J.C. Adams, proposa que le désaccord provenait d'une perturbation par une planète inconnue, orbitant au-delà de l'orbite d'Uranus. Il calcula la position de cette hypothétique planète et alla voir son professeur, Sir G. Airy. Celui-ci n'accorda aucun crédit à cette prédiction. Un an plus tard, un astronome connu, Le Verrier, fit le même calcul que celui d'Adams et obtint une prédiction similaire. L'observation fut faite. La planète nouvelle fut découverte. Elle fut appelée Neptune. Airy remarqua que la prédiction de son étudiant, un an avant celle de Le Verrier, était correcte. Il eut l'honnêteté de le faire savoir, au risque de se discréditer. Justice fut ainsi rendue au jeune étudiant.

Les mesures qui ne rentrent pas dans le rang

La planète Mercure, la plus proche du Soleil, montrait un curieux phénomène. Le grand axe de son orbite dérivait de 574" par siècle ; il devait s'agir des perturbations des autres planètes. Les corrections étant faites, il restait encore une petite anomalie de 43" par siècle, les perturbations connues expliquant, à elles seules, 531" par siècle.

La première idée fut qu'une planète nouvelle devait exister, très proche du Soleil, qui pourrait expliquer les 43" par siècle. Cette mystérieuse planète reçut même un nom : Vulcain, dieu des Enfers. Mais cette planète ne fut jamais observée. Quand Einstein développa sa théorie de la relativité générale, il pensa que l'anomalie de Mercure s'expliquerait simplement par les nouvelles lois. En effet, Mercure est très près du Soleil. Le champ de gravitation y est très intense, et c'est là justement que les nouvelles lois devaient montrer une différence par rapport à la mécanique de Newton. Einstein fit le calcul de la correction impliquée par sa nouvelle mécanique. Le résultat était étonnant : 43" par siècle. Non seulement il n'y avait plus besoin de Vulcain, mais une telle planète était même exclue.

Les faits à jamais inexpliqués

La portée infinie de l'attraction gravitationnelle pose un nouveau problème. Si on considère les petites planètes, ce qu'on appelle aussi les astéroïdes, les perturbations causées par l'ensemble des masses du Système solaire peuvent devenir grandes, même celles provenant de

petites masses encore inconnues.

En d'autres termes, il devient impossible de prédire les positions des petites planètes. Dans le détail ultime, la trajectoire d'un corps céleste quelconque obéit à une trajectoire imprévisible.

À courte échéance, il est possible de prendre en compte les effets principaux, ceux résultant des grosses planètes, mais aussi ceux produits par les petites planètes déjà identifiées. Mais au-delà d'un certain temps, les petites perturbations encore inconnues peuvent modifier suffisamment les positions, pour rendre impossible toute prédiction. Il n'est pas possible de connaître la trajectoire d'une planète avec une précision infinie. Dans le détail, les trajectoires planétaires sont dites chaotiques.

Pour les corps de petite taille, l'incertitude est très grande. C'est le cas par exemple de l'astéroïde « Toutatis », qui passe tous les quatre ans à proximité de la Terre et qui pourrait un jour la percuter. Nous proposons un exercice (voir rubrique « Astéroïdes » de LUNAP onglet activité) dans lequel nous essayons d'évaluer l'ampleur du séisme que provoquerait la collision de Toutatis avec la Terre. Le résultat est un peu effrayant, même si la probabilité de rencontre est faible.

Nos ancêtres les Gaulois avaient bien raison de se méfier ...

VI- L'analyse de la lumière

Résumé : Dans ce nouveau chapitre, nous entrons dans le domaine de l'astrophysique. C'est par l'analyse de la lumière, la spectrographie, qu'a débuté l'aventure. Les physiciens furent confrontés assez tôt au phénomène nouveau des raies spectrales. Comment interpréter cet invraisemblable imbroglio de raies. C'est par une révolution dans les conceptions de la physique qu'a pu émerger la compréhension.

Introduction

Dans ce nouveau chapitre, nous entrons réellement dans l'astrophysique, car nous allons pouvoir nous intéresser à la physique des astres et plus seulement à leurs positions. Mais comment étudier la physique d'un objet que l'on ne peut pas approcher ? C'est évidemment la lumière qui va nous permettre de réaliser ce que Auguste Comte croyait à jamais impossible. Il écrivait en effet que « ...nos connaissances positives par rapport aux astres sont nécessairement limitées à leurs seuls phénomènes géométriques et mécaniques ».

Comment extraire de la seule lumière une information aussi riche que la composition chimique d'une étoile, ou que les mouvements à sa surface ? C'est ce que nous allons commencer d'étudier.

Il nous faut encore parler de Newton

Nous avons vu quel rôle prépondérant a joué Newton dans l'établissement des lois de la mécanique. Ce savant génial ne s'en est pas tenu qu'à cet aspect de la physique. Il a étudié l'optique. Bon expérimentateur, il a su de manière géniale trouver des expériences qui prouvaient que la lumière « ordinaire » était une lumière « composée ».

Sa première expérience a consisté à faire entrer la lumière du Soleil dans une pièce obscure par une petite ouverture pratiquée dans les volets. Ce fin pinceau lumineux était envoyé sur un coin de verre, ce qu'on appelle un prisme. La lumière blanche du Soleil se décomposait alors en une multitude de couleurs, chacune d'elles sortant du prisme dans une direction différente (figure VI-1). La lumière blanche contenait donc plusieurs couleurs. Mais Newton alla plus loin, il collecta ces rayons colorés avec une lentille convergente et envoya tous ces rayons sur un prisme similaire au premier, mais inversé (figure VI-1). À la sortie de ce deuxième prisme, les différents faisceaux colorés s'étaient recomposés en un seul rayon blanc, semblable au rayon solaire initial. Plusieurs couleurs pouvaient se recomposer en un rayon blanc. Newton montra que le nouveau rayon blanc pouvait à son tour se décomposer en divers faisceaux colorés.

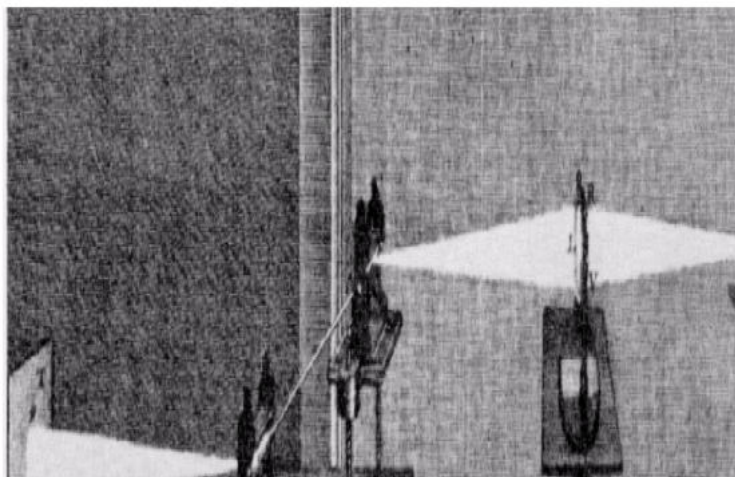


Figure VI-1 : Décomposition et recombinaison de la lumière par l'expérience de Newton.

Une expérience géniale de simplicité

Une question se pose alors : combien de couleurs apparaissent lors de la décomposition de la lumière blanche ? Mon instituteur m'avait appris un mot magique pour retenir ces couleurs : VIBVJOR. Nous avons ainsi les initiales des principales couleurs : Violet, Indigo, Bleu, Vert, Jaune, Orangé, Rouge.

On serait conduit à penser qu'il n'y a que sept couleurs fondamentales. En réalité, nous le verrons un peu plus loin, chaque couleur est caractérisée par une longueur, la longueur d'onde. Il y a autant de couleurs qu'il peut y avoir de longueurs, disons une infinité.

Néanmoins, les sept couleurs vues plus haut conduisent à une bonne représentation de la décomposition d'une lumière blanche, comme nous allons le voir. Newton imagina une expérience, merveilleuse de simplicité, pour montrer qu'une combinaison de couleurs pouvait produire du blanc. En dessinant sur un disque en carton des secteurs colorés chacun avec une des sept couleurs, nous allons pouvoir « faire » du blanc. Il suffit de faire tourner le disque à grande vitesse. Les sept couleurs se superposent à notre vue et nous voyons un disque blanc, ou plus exactement, blanchâtre, car nos sept couleurs ne sont qu'une pâle représentation du spectre complet.

Dans la rubrique « remue-méninges » du CC n° 110 (« Mélange des couleurs p.38 »), nous posons une question embarrassante à propos de la représentation des couleurs. En effet, si, sur le disque de Newton, nous ne faisons figurer que, par exemple, du jaune et du bleu, nous verrons une couleur verte. Bien ! Mais est-ce à dire que le mélange de deux longueurs d'onde (jaune et bleu) fabrique une troisième longueur d'onde (le vert) ? Si nous transposons cela à la musique, en jouant par exemple un do et mi entendrons nous un ré ? Je livre cette question piège à votre sagacité.

Une idée lumineuse

En 1802, quelques décennies après Newton, William Wollaston eut un jour une idée, a priori, curieuse. Il décomposa la lumière du Soleil avec un prisme, comme l'avait fait Newton, mais au lieu de prendre toute l'image du Soleil, il en isola une mince tranche avec une fente. Quel était son but ? On peut le comprendre : quand on prend toute l'image du Soleil, chaque point de l'ouverture d'entrée, va se décomposer dans les différentes couleurs. Aussi, dans une direction de sortie se mélangeront des rayons de différentes couleurs, entrés sous des angles différents.

Il y aura un mélange des couleurs. Avec une fente très fine, il est possible d'éviter ce mélange. On doit avoir des couleurs plus nettes, et qui sait, voir séparément les couleurs qui composent le spectre du Soleil. La figure VI-2 montre le schéma du principe de l'appareillage de Wollaston.

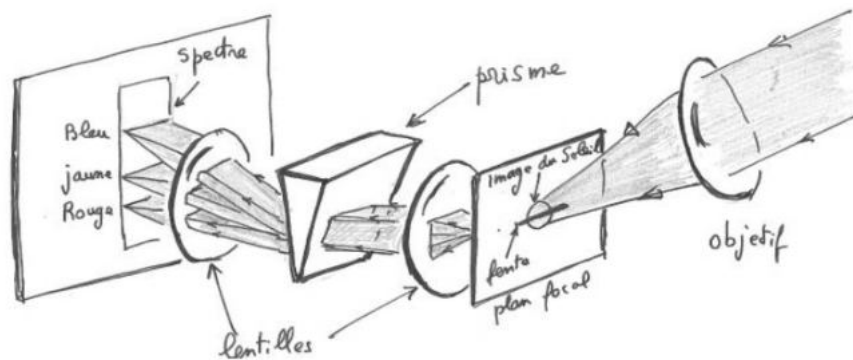


Figure VI-2 : Spectroscopie à fente

Wollaston ne réussit pas à dénombrer les couleurs qui semblaient toujours apparaître plus nombreuses, dans toutes les nuances « VIBVJOR ». Mais il observa une chose étrange : sur le fond coloré se détachaient des lignes sombres, plus ou moins serrées et distribuées apparemment au hasard. Pourtant, ces raies occupaient des positions relatives fixes, toujours les mêmes, quel que soit le dispositif utilisé. Si on élargissait la fente d'entrée, les raies disparaissaient progressivement. Si on resserrait la fente, les raies, qu'on appellera désormais les raies spectrales, réapparaissaient à la même place.

Cette observation qui contenait en germe la nouvelle physique atomique, n'eut pas beaucoup d'écho, jusqu'à ce qu'un opticien allemand, Joseph von Fraunhofer refasse les mêmes observations. Il observa plus de trois cents raies spectrales et il désigna par des lettres les raies les plus intenses. Il observa en particulier ce que les astronomes appellent encore les raies « H » et « K » dans le bleu, le doublet « D », situé lui dans le jaune et bien d'autres. Mais la constatation la plus remarquable de Fraunhofer fut que le doublet « D » pouvait être observé simplement en faisant le spectre d'une flamme dans laquelle brûle du sodium (par exemple une flamme dans laquelle on place du sel ordinaire). Cette constatation montrait qu'il y avait un lien entre la position des raies spectrales et la nature du corps émetteur de lumière. On tenait peut-être la possibilité de connaître la composition des astres. Une révolution se préparait. Mais comment interpréter les positions de ces raies ?

C'est ce que nous allons découvrir bientôt.

Une description ondulatoire

Quand il fut admis que les raies spectrales représentaient la signature des corps émetteurs, les astronomes et les physiciens cherchèrent à déchiffrer le code donnant la position des raies spectrales.

Depuis Newton l'idée que les physiciens se faisaient de la lumière avait évolué. En effet, avec Newton la lumière était supposée faite de particules de différentes couleurs. La propagation rectiligne ou la réflexion sur un miroir obéissaient simplement aux lois de la mécanique newtonienne. Mais bientôt un phénomène bouleversa cette conception si simple : la découverte des interférences. Quand la lumière d'une source passe à travers deux petits trous (qui se comportent comme deux sources indépendantes, mais « synchronisées ») l'image de ces deux sources donne des lignes alternativement claires et sombres (figure VI-3). Ce phénomène est

difficile, sinon impossible, à expliquer avec une conception corpusculaire de la lumière. Si en revanche on considère que la lumière est faite d'une onde qui vibre à une certaine fréquence, on explique très facilement le phénomène d'interférences. Si en un point de l'écran, les ondes issues des deux sources synchrones présentent un maximum, il y aura un maximum de lumière. Si, au contraire, l'une présente un maximum et l'autre un minimum, les deux ondes vont s'annuler, il n'y aura pas de lumière en ce point. L'étude géométrique de ce phénomène collait parfaitement avec les observations. La lumière devait être une onde.

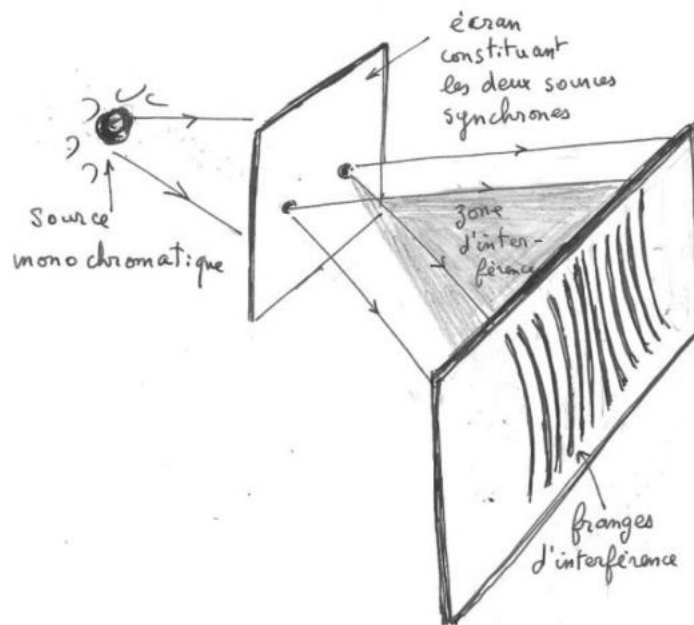


Figure VI-3 : Les interférences prouvent qu'à la lumière peut être associée une onde.

Il y eut pendant quelque temps une hésitation sur cette conception, car il fallait expliquer la propagation rectiligne de la lumière ainsi que la réflexion sur les miroirs. Mais le génial Augustin Fresnel réussit à montrer mathématiquement qu'il n'y avait pas d'incompatibilité. La cause était entendue : la lumière était une onde¹⁴ et mieux, à chaque couleur pouvait être associée une longueur d'onde. La longueur d'onde est très fréquemment notée par la lettre grecque λ (lire lambda) équivalente à notre lettre L.

Interprétation empirique des spectres

En 1885, le physicien Balmer étudie les raies caractéristiques de l'hydrogène. Les quatre principales raies, que l'on désigne par Ha, Hb, Hg, Hd, correspondent aux longueurs d'onde 656 nm, 486 nm, 434 nm et 410 nm (rappelons que le nanomètre noté nm, vaut un milliardième de mètre).

Balmer montre qu'elles obéissent au principe de Ritz écrit sous la forme :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

avec pour n, les valeurs entières, 3, 4, 5 et 6. Plus tard on a trouvé d'autres raies qui correspondaient aux entiers suivants. La constante R appelée la constante de Rydberg avait une valeur expérimentale connue.

L'atome d'hydrogène était un bon exemple à étudier. Mais comment interpréter l'arrivée de nombres entiers dans la physique. Était-ce un retour aux conceptions ancestrales des Grecs ? Nous allons voir que cette interprétation est arrivée par un chemin détourné, que nous allons emprunter.

Quantification pour la catastrophe UV

Les physiciens étudiaient le rayonnement d'un corps isotherme, appelé le corps noir. Un tel corps est totalement absorbant et totalement émissif. Expliquons un peu.

Une surface peinte en noire absorbe la chaleur. Pour vous en convaincre, placez en plein soleil, une plaque métallique peinte en blanc et une plaque identique peinte en noir. Vous constaterez que la plaque peinte en noir s'échauffe beaucoup plus vite. C'est la raison pour laquelle les capteurs solaires sont peints en noir. Si maintenant vous chauffez les deux plaques à la même température, et que vous les placez dans un endroit plus frais, vous constatez que la plaque noircie se refroidit plus vite. C'est la raison pour laquelle, les radiateurs de voiture, par exemple, sont peints en noir. Si les radiateurs d'appartement sont peints de couleur claire, ce n'est que par souci d'esthétique, mais c'est au détriment du rendement. Cette loi qui dit qu'un corps est d'autant plus émissif qu'il est absorbant est la loi de Kirchhoff.

Plus précisément, les physiciens étudiaient le spectre d'un tel corps noir : à une température donnée, quelle pouvait en être le spectre. L'application des lois de l'électrodynamique permettait de décrire correctement les grandes longueurs d'onde, mais pour les petites longueurs d'onde, l'ultraviolet, la relation prédisait une énergie infinie, ce qui n'était pas raisonnable. C'était un échec complet des lois du rayonnement. Une catastrophe, surtout dans l'ultraviolet.

Le physicien Max Planck fit une hypothèse hardie. Il postula que les échanges d'énergie lors d'un rayonnement à la fréquence ν (rappelons que la fréquence est reliée à la longueur d'onde par la relation $\nu = c/\lambda$, où c est la vitesse de la lumière) ne pouvaient se faire que par quantités finies d'énergie $E = h\nu$ (la constante h fut naturellement appelée la constante de Planck). Une hypothèse bien étrange, mais qui permettait de retrouver parfaitement le spectre expérimental (figure VI-4). Planck hésita à faire cette hypothèse et il semble qu'il ait parfois douté de sa propre théorie. Pourtant cette idée neuve allait déboucher sur une nouvelle mécanique, la mécanique quantique. La relation de Planck permettait aussi de retrouver de manière indépendante le nombre réel d'atomes d'un corps par unité de masse moléculaire (par mole), ce qu'on appelle le nombre d'Avogadro. Ce résultat contribua aussi à valider l'hypothèse nouvelle qui, de surcroît, fut utilisée par Einstein pour interpréter l'émission d'électrons par un corps irradié (c'est l'effet photoélectrique découvert par Hertz). Bref, l'hypothèse fut acceptée et nous allons voir que Bohr en fit un usage intéressant pour le sujet qui nous occupe : l'émission de radiation par un atome. Les spectres de corps noirs à différentes températures sont donnés à la figure VI-4. Plus le corps est chaud, plus sa densité spectrale est forte et plus son rayonnement est dominé par les courtes longueurs d'onde : plus un corps est chaud, plus il est « bleu ». La position du maximum suit une loi simple :

$$\lambda_{\text{maxi}} T = 0,028\,97$$

Où λ_{maxi} est la longueur d'onde du maximum exprimée en mètre et T est la température en kelvin¹⁵. Cette relation, dite relation de Wien sera très utile, comme nous le verrons plus tard.

En route vers la formule de Balmer

Grâce aux expériences de Rutherford, on savait que les atomes étaient faits essentiellement de vide. Les physiciens imaginaient l'atome comme un système planétaire : un noyau dense au centre figurant le Soleil et des électrons gravitant autour comme des planètes. Dans ce modèle la force électrique remplaçait la force gravitationnelle, mais les lois étaient assez semblables. Il sera montré que les trois lois de Kepler s'appliquent aux électrons orbitant autour du

noyau. Surprenant !?

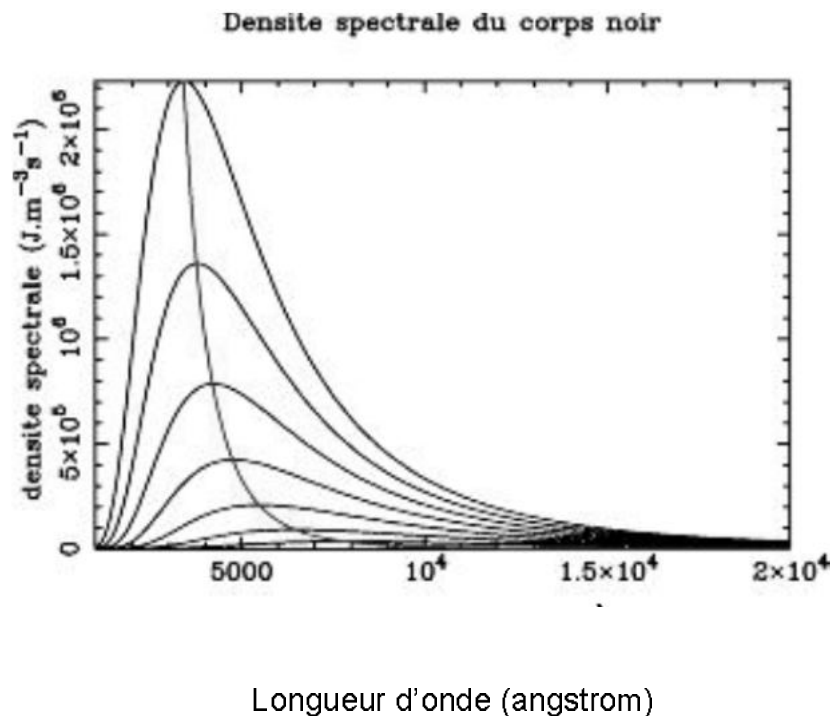


Figure VI-4 : densité spectrale de corps noirs entre 3 000 K et 8 500 K

Depuis Coulomb on connaissait la force qui s'exerce entre deux charges électriques, q , séparées par une distance r :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

On imagina alors que l'électron possédait une charge élémentaire $-e$, négative, et le noyau une charge opposée e , positive.

Nous verrons dans le prochain chapitre, comment Bohr réussit en combinant l'idée de Planck, le modèle de Rutherford et l'expression de la force électrique, à retrouver de manière élémentaire la relation de Balmer pour l'atome d'hydrogène.

VII- Les spectres enfin compris

Résumé : Comment décrypter les spectres et leurs innombrables raies, véritables « Pierre de Rosette » de la physique ? Analysées de manière empirique, les raies spectrales étaient connues, mais pas comprises. L'étude du corps noir par Planck a montré que les échanges énergétiques ne se faisaient que par quantités finies, les « quanta ». L'application par Bohr de ce concept a donné naissance à la mécanique quantique. Il a été possible ainsi de comprendre l'origine des raies spectrales. Les applications astrophysiques qui en découlèrent furent d'une portée inimaginable. C'est ce que nous allons découvrir dans les chapitres à venir.

Les excuses de l'auteur

Je reprendrai les termes mêmes de Daniel Barbier dans son ouvrage fameux sur les atmosphères stellaires (Flammarion) : « Un éloge, parfois mérité, qui est souvent fait aux ouvrages de vulgarisation scientifique est qu'ils se lisent comme un roman d'aventures. Bien certainement cet aperçu sur les ... [spectres] stellaires en est tout à fait indigne. L'auteur s'en excuse et

il espère que l'aveu qu'il en fait lui vaudra quelque indulgence ». Cette mise en garde me convient bien, car je dois avouer que le chapitre présent est assez difficile pour un cours élémentaire. J'espère qu'il aura au moins le mérite de vous faire découvrir le bonheur de comprendre la nature, quantitativement.

Introduction

Les physiciens et les astronomes avaient noté que le spectre solaire, obtenu en décomposant la lumière du Soleil avec un prisme, était barré d'une multitude de raies sombres, les raies spectrales. Ils les avaient repérées soigneusement. Dans le Soleil, ces raies sont innombrables. Leurs positions ne dépendent nullement de la façon de réaliser le spectre : les spectres étant gradués en longueur d'onde, les raies spectrales se présentent toujours de la même façon. Dit autrement, on retrouve toujours les raies solaires aux mêmes longueurs d'onde.

Quand on fait le spectre d'une étoile, on retrouve certaines raies observées dans le spectre solaire, mais on ne les retrouve pas forcément toutes. À l'inverse, il est possible de trouver des raies nouvelles. Les physiciens avaient compris que ces raies étaient caractéristiques des corps émetteurs. Il était ainsi possible de prédire quels corps étaient présents dans telle ou telle étoile. Mais nombre de raies spectrales étaient non identifiées, car elles ne correspondaient à aucun corps étudié en laboratoire. Ce fut le cas d'un corps étrange, observé par Jansen et Lockyer dans le Soleil, et qu'on appela hélium. Ce corps ne fut découvert sur Terre que plus tard.

Parfois les raies spectrales ne pouvaient pas être reconnues, simplement parce que les conditions physiques qui régnaient dans l'étoile étaient très différentes des conditions réalisables en laboratoire. Ainsi, le spectre, de ce qu'on appela un temps le « protohydrogène », pour les similitudes qu'il présentait avec le spectre de l'hydrogène, ne fut-il pas reconnu comme provenant de l'hélium.

Enfin, il fallait comprendre pourquoi certaines raies spectrales apparaissaient sombres sur le fond lumineux et pourquoi, exceptionnellement, certaines raies spectrales apparaissaient en surbrillance sur le fond peu lumineux. Ultime complication, les raies pouvaient ne pas être exactement là où on les attendait, à cause de l'effet Doppler Fizeau, phénomène déjà évoqué, et qui déplace les raies spectrales du fait de la vitesse relative de l'observateur et de l'étoile.

Bref, la compréhension des raies spectrales apparaissait comme un véritable casse-tête, une « Pierre de Rosette » pour les « Champollion » de la physique.



Allez voir le Remue-Méninges dans CC n° 111 (« Spectre d'étoiles » p.35), pour en savoir plus sur les différents aspects des spectres.

S'attaquer à ce problème devait être totalement décourageant. Pourtant, il devait bien y avoir une logique sous cette complexité. La force de Niels Bohr fut de s'attaquer au spectre du corps

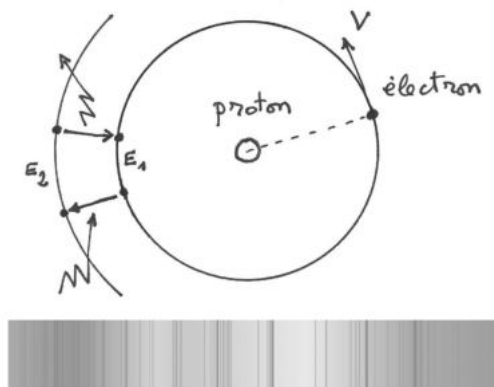
le plus simple : l'hydrogène. Il réussit à retrouver la relation empirique rencontrée lors du chapitre précédent :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2} \right)$$

où n et p sont des nombres entiers (satisfaisant à la condition $n < p$)

Le rêve de Niels Bohr

Bohr raconta que la solution lui vint en rêvant. N'y voyons pas quelque révélation mystique. Quand un problème nous taraude, il nous hante toujours, même la nuit, jusqu'à ce que la solution nous apparaisse, presque miraculeusement. Bohr adopta, pour l'hydrogène, le modèle « planétaire » de Rutherford : un proton autour duquel tourne un électron, comparativement très léger (voir figure ci-dessous).



Bohr admet que l'électron ne peut occuper que certaines orbites particulières sur lesquelles il ne rayonne pas d'énergie. L'énergie de l'électron sur une de ces orbites est donc constante. Quand l'électron passe sur une autre orbite, l'énergie n'étant plus la même, il y a émission (ou absorption) de la différence d'énergie. Autrement dit, si un atome d'hydrogène absorbe de l'énergie, l'électron passe sur une orbite permise de plus grande énergie. Si en revanche l'électron va sur une orbite de moindre énergie, l'atome rend la différence d'énergie sous forme d'un rayonnement. Comment calculer ces orbites particulières permises ? Comment s'exprime alors la variation d'énergie par passage d'une orbite à l'autre ? C'est ce que nous allons voir. Que ceux que les calculs rebutent passent à la section expliquant les mécanismes de l'émission et de l'absorption. L'essentiel de ce qu'il faut connaître pour comprendre y est dit.

Les forces d'attraction gravitationnelle entre les deux particules sont négligeables (on le vérifierait aisément). Seule la force électrique a une intensité importante :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

e est la charge élémentaire de l'électron et du proton (mais de signe opposé pour les deux particules). La constante diélectrique vaut

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{(36 \pi)} 10^{-9} \text{ C}^2 \text{ m}^{-2} \text{ N}^{-1}$$

Comme pour le cas gravitationnel, cette force va produire une force d'inertie opposée, $m.a$, où a est l'accélération. Si vous regardez le chapitre III de mécanique vous verrez que nous avons établi l'expression de l'accélération que prend un corps sous l'effet d'une force transversale, quand ce corps est animé d'une vitesse V . Le corps décrira une trajectoire circulaire de rayon r . L'expression de l'accélération est :

$$a = \frac{V^2}{r}$$

L'égalité de la force attractive et de la force d'inertie s'écrit :

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = m \frac{V^2}{r} \quad (1)$$

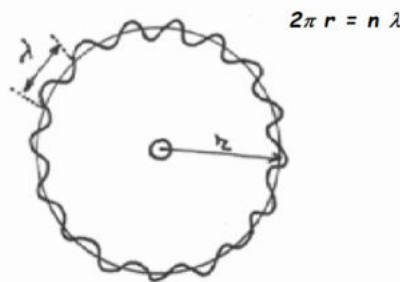
Jusqu'à présent il n'y a rien de nouveau. Mais Bohr va introduire maintenant l'hypothèse de Planck, du quantum d'action h . Il va écrire que le produit $m.V.r$ ne peut prendre qu'un nombre entier (n) de fois la valeur de $h/2\pi$. C'est-à-dire :

$$m V r = \frac{n h}{2 \pi} \quad (2)$$

Nous allons expliquer cette relation de manière plus concrète, en partant de la relation de Louis de Broglie, (dont la démonstration est rappelée dans le CC n° 110 « [De Broglie et la nouvelle mécanique](#) » p. 33 à 37). La relation de Louis de Broglie donne la longueur d'onde associée à une masse m se déplaçant à la vitesse V . Rappelons cette relation :

$$\lambda = \frac{h}{m V}$$

La relation de quantification des orbites signifie simplement que dans une orbite de longueur $2\pi r$, il y a un nombre entier de longueurs d'onde λ . L'onde associée apparaît alors comme une onde stationnaire le long de l'orbite de l'électron.



Cette condition s'écrit simplement (figure ci-dessus) :

$$2 \pi r = n \lambda = n \frac{h}{m V}$$

Ce qui donne bien la relation adoptée par Bohr.

Des relations (1) et (2) on tire très facilement le rayon des orbites permises :

$$r = \frac{\varepsilon_0 n^2 h^2}{\pi m e^2} \quad (3)$$

Le premier rayon pour $n = 1$ est ce qu'on appelle le "rayon de Bohr". Il vaut 0,052 9 nm.

Reste à calculer l'énergie de l'électron sur ces orbites permises. L'énergie totale est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle (électrique). L'énergie cinétique se déduit de la relation (1) comme étant :

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{e^2}{8 \pi \varepsilon_0 r}$$

L'énergie potentielle est l'énergie qui lie l'électron au proton (on dit d'ailleurs qu'il est dans un état lié). Son énergie est comptée négativement, car il faut fournir de l'énergie à l'électron pour l'emmener à l'infini, où nous supposons son énergie potentielle nulle. Nous ne démontrerons pas la relation, mais les lois de l'électrostatique nous donnent cette énergie potentielle :

$$E_p = - \frac{e^2}{4 \pi \varepsilon_0 r}$$

D'où l'énergie totale :

$$E_T = E_C + E_P = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

Si maintenant nous remplaçons r par une des valeurs permises (relation 3), nous obtenons l'expression cherchée :

$$E(\text{niveau } n) = -\frac{m e^4}{32 \pi^2 \epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}$$

Nous commençons de voir apparaître le carré d'un entier, semblable à celui de la formule empirique. Encore un petit effort et nous serons au bout du calcul...

Il nous suffit d'écrire que la différence d'énergie entre un niveau (n) et un niveau (p) est rayonnée (ou absorbée) par quanta :

$$\Delta E = h \nu = \frac{h c}{\lambda}$$

selon les préceptes de Planck. Il vient alors :

$$\Delta E = -\frac{m e^4}{32 \pi^2 \epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2} \right) = \frac{h c}{\lambda}$$

Expression de laquelle nous retrouvons la formule empirique de Balmer, vue en introduction. Après simplification, la constante de Rydberg R serait donc donnée par :

$$R = \frac{m e^4}{8 \epsilon_0^2 h^3 c}$$

Imaginez la fébrilité de Bohr quand il a dû faire le calcul numérique pour voir si R avait bien la valeur trouvée expérimentalement. Nous allons faire le calcul à notre tour avec un peu la même fébrilité (je crains d'avoir fait une erreur de calcul).

En prenant les valeurs dans le système international d'unités nous avons :

$$m = 9,109\,56\,10^{-31} \text{ kg}$$

$$e = 1,602\,2\,10^{-19} \text{ C}$$

$$\epsilon_0 = 1/36\pi\,10^{-9} = 8,841\,94\,10^{-12} \text{ C}^2 \text{ m}^{-2} \text{ N}^{-1}$$

$$h = 6,626\,20\,10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$c = 2,997\,924\,58\,10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

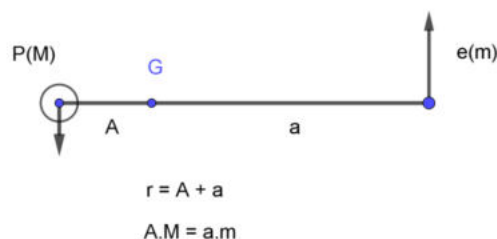
Le calcul n'est pas aussi simple qu'on pourrait le penser. En effet, si on entre dans sa calculette les valeurs et qu'on exécute le calcul comme il vient, on dépasse la capacité d'une machine ordinaire avec des puissances supérieures à 100. Il faut donc faire le calcul des chiffres significatifs seulement, puis calculer les puissances entières. Le résultat est alors : $R = 11\,004\,362 \text{ m}^{-1}$, les longueurs d'onde étant exprimées en mètre. Si nous les exprimons en nm, nous obtenons $R = 0,011\,004\,3 \text{ nm}^{-1}$, ce qui est, à peu de chose près, la valeur expérimentale.

On imagine sans peine la satisfaction énorme que Bohr a dû ressentir en trouvant cet accord numérique. Un coin du voile venait de se soulever.

Les améliorations du modèle

Un premier raffinement consiste à considérer des trajectoires elliptiques plutôt que circulaires. Mais cela ne change pas les niveaux d'énergie.

Il est possible de raffiner le modèle de manière plus sensible. En effet, exactement comme pour les planètes, ce n'est pas réellement l'électron qui tourne autour du proton central, mais ce sont les deux particules qui tournent autour du centre de gravité commun (voir figure ci-dessous).



La position de G est définie par $A.M = a.m$, où m et M sont les masses des deux particules. A et a sont leurs distances à G. On peut écrire la relation sous la forme :

$$\frac{A}{1/M} = \frac{a}{1/m} = \frac{A+a}{1/M + 1/m} = \frac{r}{1/\mu}$$

μ est ce qu'on appelle la masse réduite. On voit qu'en utilisant μ à la place de m , on est ramené exactement au cas précédent. Mais μ est un peu plus petit que m . puisqu'on a :

$$\mu = \frac{m M}{m + M}$$

Notre valeur de R sera réduite par cette correction.

Ce n'est pas tout. On peut faire une correction relativiste qui prendra en compte l'augmentation de la masse avec la vitesse. Ainsi, il sera possible de prévoir de nouvelles raies plus fines (c'est ce qu'on appelle précisément la structure fine). Pour aller encore au-delà, il faudra considérer le « spin ». Qu'est-ce donc que ce spin ? L'image triviale que l'on en donne est celle de la rotation de la particule sur elle-même. Selon que le spin de l'électron est dans le même sens que celui du proton ou opposé, le niveau d'énergie est légèrement différent. Spontanément, le spin de l'électron peut basculer d'un état vers l'autre. Nous verrons que la petite émission qui en résulte produit le rayonnement de l'hydrogène neutre, rayonnement si important pour l'étude des galaxies lointaines. C'est une transition hyperfine.

Le cas des hydrogénéoïdes

Il est possible de considérer des atomes un peu plus compliqués que l'hydrogène, mais néanmoins très proches. En effet, si le quantum d'énergie absorbé par un atome est très élevé (c'est ce qui se passe avec des rayonnements énergétiques de courte longueur d'onde), l'électron sera purement et simplement arraché à l'atome. L'atome sera *ionisé*. L'électron sera libre. En perdant ainsi un ou plusieurs électrons, certains atomes peuvent devenir semblables à l'hydrogène. On appelle ces corps des hydrogénéoïdes.

C'est le cas par exemple de l'hélium une fois ionisé, He^+ , ou du lithium deux fois ionisé, Li^{++} . La structure est identique à celle de l'hydrogène (un seul électron restant en orbite autour du noyau), mais le noyau est composé de plusieurs protons et neutrons. Les neutrons n'interviennent pas dans la force attractive. Seul le nombre de charge Z du noyau intervient. Aussi, dans les relations suffit-il de remplacer e^2 par Ze^2 pour pouvoir prédire les nouvelles raies. C'est ainsi que Bohr lui-même a pu identifier la série de raies de l'hélium ionisé avec les raies du mystérieux protohydrogène détecté dans quelques étoiles, comme nous l'avons signalé en introduction.

Mécanismes d'émission et d'absorption

Nous avons donc compris que l'atome ne peut absorber ou émettre que des paquets d'énergie correspondant à la différence d'énergie de deux orbites. Si, initialement, l'électron est sur une orbite d'énergie E_1 , il peut absorber de l'énergie et passer sur une orbite d'énergie E_2 supérieure. L'absorption se fera exactement à la longueur d'onde $hc / (E_2 - E_1)$. En effet, la différence d'énergie ne peut correspondre qu'à un photon de fréquence $h\nu$ (c'est ce qu'a montré Planck). Or la fréquence est reliée à la longueur d'onde par la vitesse de la lumière $\nu = c/\lambda$. De même si un électron est sur un niveau d'énergie E_2 et retombe sur un niveau d'énergie E_1 , plus bas, il y a émission à la seule longueur d'onde $hc / (E_2 - E_1)$.

Si maintenant nous considérons des échanges plus énergétiques, au-delà de l'énergie d'ionisation, tous les niveaux d'énergie sont permis entre l'atome ionisé et l'électron libre. Le rayonnement émis ou absorbé est alors un rayonnement continu. Signalons que, entre atomes ionisés et électrons libres, il peut y avoir également une interaction simple, d'échange d'énergie cinétique, un peu comme quand deux corps célestes passent l'un près de l'autre. Le rayonnement qui en résulte se fait également à toutes les longueurs d'onde. On appelle ce rayonnement le « *Bremsstrahlung* ».

Bref, un atome peut absorber ou émettre à des longueurs d'onde bien précises :

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

(ΔE est la différence d'énergie des deux orbites impliquées). Au-delà d'une certaine énergie, l'émission et l'absorption de rayonnement peuvent se faire à toutes les longueurs d'onde.

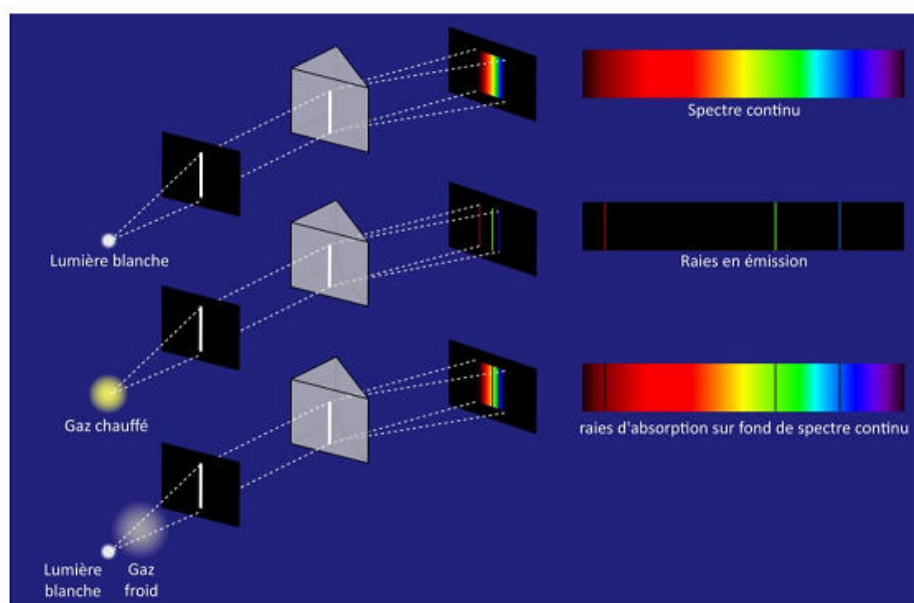
Spectres des objets astronomiques

Mais pourquoi les étoiles montrent-elles souvent des raies d'absorption et rarement des raies d'émission ? Pourquoi les nuages gazeux interstellaires (on les appelle les nébuleuses gazeuses) ne montrent-ils que des raies d'émission ? C'est ce que nous allons essayer de comprendre.

Regardez d'abord le schéma ci-dessous qui résume les différentes situations possibles. La source principale donne un spectre continu de corps noir, à une certaine température. Le spectre de la source vue à travers le nuage (par exemple de sodium) est le même, mais il est privé des longueurs d'onde propres au corps composant le nuage (par exemple le doublet du sodium apparaît comme deux raies d'absorption).

Le nuage de gaz a absorbé ces radiations. Il va les réémettre (sinon sa température augmenterait à l'infini), mais dans toutes les directions. Le spectre du nuage seul montrera seulement la réémission de ces raies (par exemple du doublet du sodium). Remarquons que le spectre de droite reçoit une partie de cette réémission. Les raies d'absorption ne tombent pas à une émissivité nulle. Quant au nuage de gaz, il émet principalement sur les longueurs d'onde qu'il a absorbées, mais il présente aussi un faible rayonnement continu correspondant à sa température propre, très faible.

Le cœur chaud des étoiles émet un rayonnement continu et les raies spectrales d'absorption proviennent de l'atmosphère plus froide, entourant l'étoile. Quelques rares étoiles ont une enveloppe gazeuse étendue qui produit des raies d'émission. Enfin, les nuages de gaz, excités par les étoiles voisines, émettent des raies d'émission. On a tout compris !



Notes

13 En effet, la définition de la force est $F = dp/dt$, où p est le vecteur quantité de mouvement et où t est le temps. Notons que cette définition très générale de la force est valable aussi en mécanique relativiste. En mécanique de Newton, où la masse m est constante et où $p = m.v$, on retrouve la fameuse loi fondamentale de la mécanique de Newton : $F = m dv/dt = m.a$, où a est le vecteur accélération. (Rappelons que la quantité de mouvement est le produit de la masse par la vitesse)

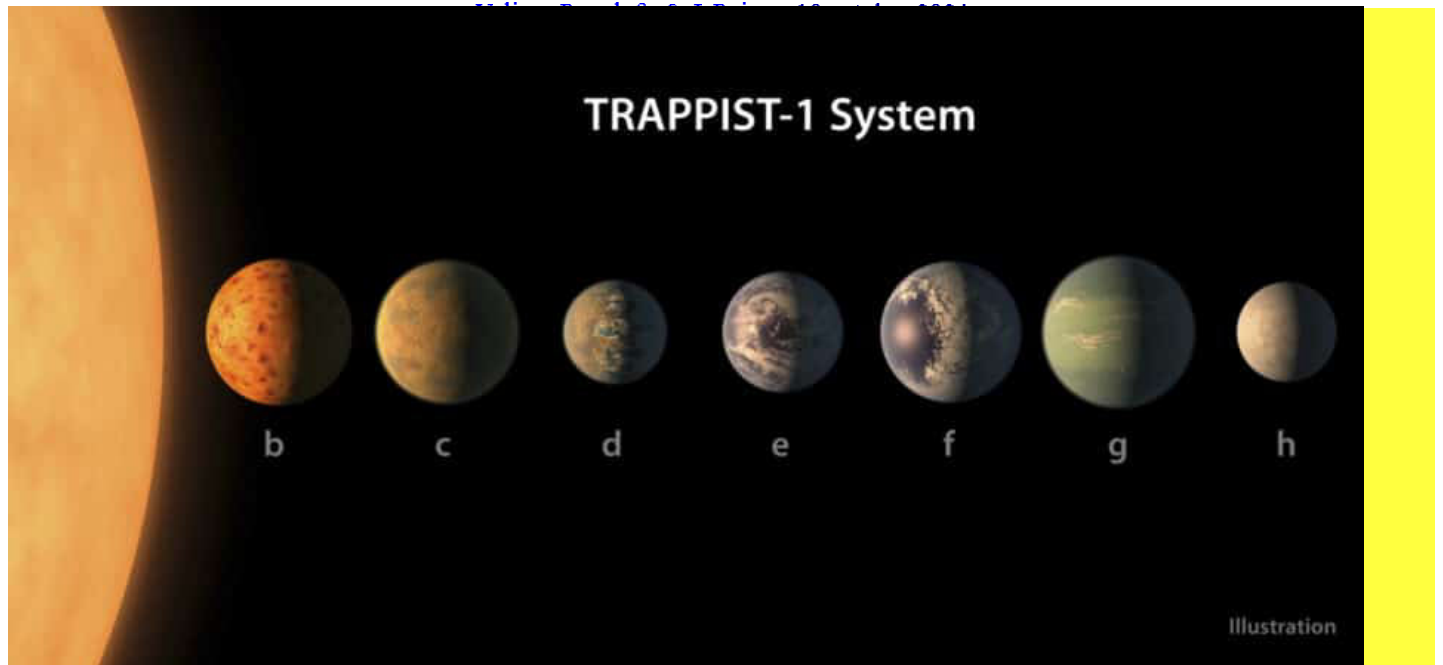
14 Cette conception ondulatoire sera encore révisée plus tard grâce à une analyse d'Einstein sur laquelle nous reviendrons.

15 Les kelvins sont notés K. Ils correspondent à nos degrés Celsius habituels majorés de 273 degrés Celsius.

16 Un milliardième de mètre, soit 10^{-9} m

A SUIVRE

Une nouvelle technique pour intercepter les signaux radio extraterrestres émis entre les exoplanètes



Le système stellaire TRAPPIST-1, ciblé dans le cadre de l'étude. | NASA/JPL-Caltech

En utilisant une version perfectionnée de l'Allen Telescope Array (ATA), une équipe d'astronomes a mis au point une nouvelle technique permettant de capter les signaux radio émanant d'exoplanètes. Cette méthode permet notamment d'identifier des signaux à bande étroite, semblables à ceux émis par nos sondes et orbiteurs, en exploitant la configuration orbitale naturelle des systèmes multiplanétaires. La détection de ces signatures pourrait potentiellement indiquer la présence d'une technologie extraterrestre.

Les recherches visant à détecter des technosignatures extraterrestres se concentrent généralement sur les signaux radio puissants. Cette approche est motivée par le fait que les récepteurs radio terrestres peuvent capter des signaux ayant franchi des distances interstellaires. Cependant, des décennies de recherches infructueuses ont poussé les astronomes à explorer de nouvelles stratégies de détection.

Étant donné que ces signaux seraient logiquement des « fuites » radio non destinées à être interceptées, il a été suggéré qu'ils pourraient se situer dans une bande de fréquence étroite, plutôt que l'inverse. En d'autres termes, comme ils ne seraient pas émis dans l'intention d'être captés à une distance interstellaire, ils pourraient être bien moins puissants qu'on ne le pensait.

Une invitation à rêver, prête à être portée.

D'autre part, la plupart de nos technologies (téléphones, radars d'aéroports, etc.) produisent des signaux radio à bande beaucoup plus étroite que ceux des processus astrophysiques naturels. La détection de ce type de signal en dehors de la Terre pourrait ainsi potentiellement indiquer la présence d'une civilisation extraterrestre intelligente.

Cependant, étant donné la faible probabilité que de tels signaux à bande étroite puissent être détectés depuis la Terre, de nouvelles techniques de détection doivent être explorées. Dans cette optique, une équipe de l'Université d'État de Pennsylvanie propose une technique reposant sur l'occultation planète-planète (PPO), un phénomène s'appuyant sur la dynamique orbitale naturelle des systèmes multiplanétaires, et sur la précision de détection améliorée de l'ATA.

« La plupart des recherches supposent un signal puissant, tel une balise destinée à atteindre des planètes lointaines, car nos récepteurs ont une limite de sensibilité à une puissance d'émission minimale au-delà de ce que nous envoyons involontairement », explique dans un [communiqué](#) de l'Université de Pennsylvanie Nick Tusay, auteur principal de l'étude, prépubliée sur le serveur arXiv. *« Avec un meilleur équipement, nous pourrions bientôt être en mesure de détecter les signaux d'une civilisation extraterrestre communiquant avec son vaisseau spatial »,* ajoute-t-il. Le SETI Institute et l'Université de Californie, à Berkeley, ont également contribué à cette recherche.

2 264 signaux corrects sur 25 millions

La PPO est un phénomène qui se produit lorsqu'une planète passe devant une autre, la masquant temporairement (vue depuis la Terre). Durant ce phénomène, les fuites de signaux radio entre les deux planètes peuvent être captées. Ces émissions seraient similaires à celles produites par les communications entre nos vaisseaux spatiaux, rovers et bases spatiales.

Pour tenter de détecter de tels signaux, l'équipe a commencé par cibler TRAPPIST-1, un système multiplanétaire situé à 40,7 [années-lumière](#) de la Terre, comportant sept planètes rocheuses de taille terrestre orbitant autour d'une naine rouge. Certaines d'entre elles se trouvent dans la zone habitable et pourraient ainsi potentiellement abriter de l'eau liquide.

Toutes sont uniformément espacées et proches les unes des autres, effectuant une orbite complète en deux ou trois jours. *« Le système TRAPPIST-1 est relativement proche de la Terre, et nous disposons d'informations détaillées sur l'orbite de ses planètes, ce qui en fait un excellent laboratoire naturel pour tester ces techniques »,* explique Tusay.

Schéma comparatif de TRAPPIST-1 et de notre système solaire. Les zones habitables sont indiquées en vert. © NASA/JPL-Caltech

La version améliorée de l'ATA dispose d'un logiciel avancé de filtrage des signaux, baptisé NBeam Analysis. Isoler les bonnes interférences radio (RFI) de celles d'origine terrestre est en effet l'un des défis principaux de la détection des technosignatures extraterrestres. Selon les experts, « depuis le tout premier projet de recherche d'intelligence extraterrestre, l'analyse des interférences radio a été un problème important ». Avant de cibler TRAPPIST-1, le système a été testé sur les signaux de nos orbiteurs martiens, notamment pour évaluer sa précision

L'équipe a ensuite observé et intercepté les signaux radio à bande étroite provenant de TRAPPIST-1 durant une fenêtre PPO de 28 heures, constituant la plus longue recherche de signaux radio monocible à ce jour. En isolant les signaux émanant uniquement de la cible, NBeam Analysis a réduit le nombre d'émissions radio de 25 millions à 2 264.

Illustration du phénomène PPO montrant les fuites d'émission radio. © Penn State

Cependant, aucun des signaux détectés ne provient d'une technologie extraterrestre. Néanmoins, les chercheurs estiment que cette technique pourrait ouvrir la voie à l'exploration d'autres systèmes stellaires. En outre, combiner cette technique avec des télescopes plus grands et plus puissants pourrait permettre de détecter des signaux radio à bandes encore plus étroites. « *Les méthodes et algorithmes développés pour ce projet peuvent être appliqués à d'autres systèmes stellaires, augmentant nos chances de découvrir des communications régulières entre des planètes au-delà de notre système solaire, si elles existent* », suggère Tussy.

Par ailleurs, l'étude pose une question intrigante : les extraterrestres pourraient-ils, eux aussi, observer les PPO de notre système solaire depuis leurs emplacements ? Ces phénomènes se produisent moins fréquemment que dans TRAPPIST-1, environ une fois tous les deux ans. Néanmoins, nos émissions radio sont si abondantes qu'elles pourraient facilement engendrer des fuites lors d'une PPO observée depuis un autre système stellaire.

Source : [arXiv](#)

En utilisant une version perfectionnée de l'Allen Telescope Array (ATA), une équipe d'astronomes a mis au point une nouvelle technique permettant de capter les signaux radio émanant d'exoplanètes. Cette méthode permet notamment d'identifier des signaux à bande étroite, semblables à ceux émis par nos sondes et orbiteurs, en exploitant la configuration orbitale naturelle des systèmes multiplanétaires. La détection de ces signatures pourrait potentiellement indiquer la présence d'une technologie extraterrestre.

Les recherches visant à détecter des technosignatures extraterrestres se concentrent généralement sur les signaux radio puissants. Cette approche est motivée par le fait que les récepteurs radio terrestres peuvent capter des signaux ayant franchi des distances interstellaires. Cependant, des décennies de recherches infructueuses ont poussé les astronomes à explorer de nouvelles stratégies de détection.

Étant donné que ces signaux seraient logiquement des « fuites » radio non destinées à être interceptées, il a été suggéré qu'ils pourraient se situer dans une bande de fréquence étroite, plutôt que l'inverse. En d'autres termes, comme ils ne seraient pas émis dans l'intention d'être captés à une distance interstellaire, ils pourraient être bien moins puissants qu'on ne le pensait.

Une invitation à rêver, prête à être portée.

D'autre part, la plupart de nos technologies (téléphones, radars d'aéroports, etc.) produisent des signaux radio à bande beaucoup plus étroite que ceux des processus astrophysiques naturels. La détection de ce type de signal en dehors de la Terre pourrait ainsi potentiellement indiquer la présence d'une civilisation extraterrestre intelligente.

Cependant, étant donné la faible probabilité que de tels signaux à bande étroite puissent être détectés depuis la Terre, de nouvelles techniques de détection doivent être explorées. Dans cette optique, une équipe de l'Université d'État de Pennsylvanie propose une technique reposant sur l'occultation planète-planète (PPO), un phénomène s'appuyant sur la dynamique orbitale naturelle des systèmes multiplanétaires, et sur la précision de détection améliorée de l'ATA.

« La plupart des recherches supposent un signal puissant, tel une balise destinée à atteindre des planètes lointaines, car nos récepteurs ont une limite de sensibilité à une puissance d'émission minimale au-delà de ce que nous envoyons involontairement », explique dans un [communiqué](#) de l'Université de Pennsylvanie Nick Tusay, auteur principal de l'étude, prépubliée sur le serveur arXiv. « Avec un meilleur équipement, nous pourrions bientôt être en mesure de détecter les signaux d'une civilisation extraterrestre communiquant avec son vaisseau spatial », ajoute-t-il. Le SETI Institute et l'Université de Californie, à Berkeley, ont également contribué à cette recherche.

2 264 signaux corrects sur 25 millions

La PPO est un phénomène qui se produit lorsqu'une planète passe devant une autre, la masquant temporairement (vue depuis la Terre). Durant ce phénomène, les fuites de signaux radio entre les deux planètes peuvent être captées. Ces émissions seraient similaires à celles produites par les communications entre nos vaisseaux spatiaux, rovers et bases spatiales.

Pour tenter de détecter de tels signaux, l'équipe a commencé par cibler TRAPPIST-1, un système multiplanétaire situé à 40,7 [années-lumière](#) de la Terre, comportant sept planètes rocheuses de taille terrestre orbitant autour d'une naine rouge. Certaines d'entre elles se trouvent dans la zone habitable et pourraient ainsi potentiellement abriter de l'eau liquide.

Toutes sont uniformément espacées et proches les unes des autres, effectuant une orbite complète en deux ou trois jours. « *Le système TRAPPIST-1 est relativement proche de la Terre, et nous disposons d'informations détaillées sur l'orbite de ses planètes, ce qui en fait un excellent laboratoire naturel pour tester ces techniques* », explique Tusay.

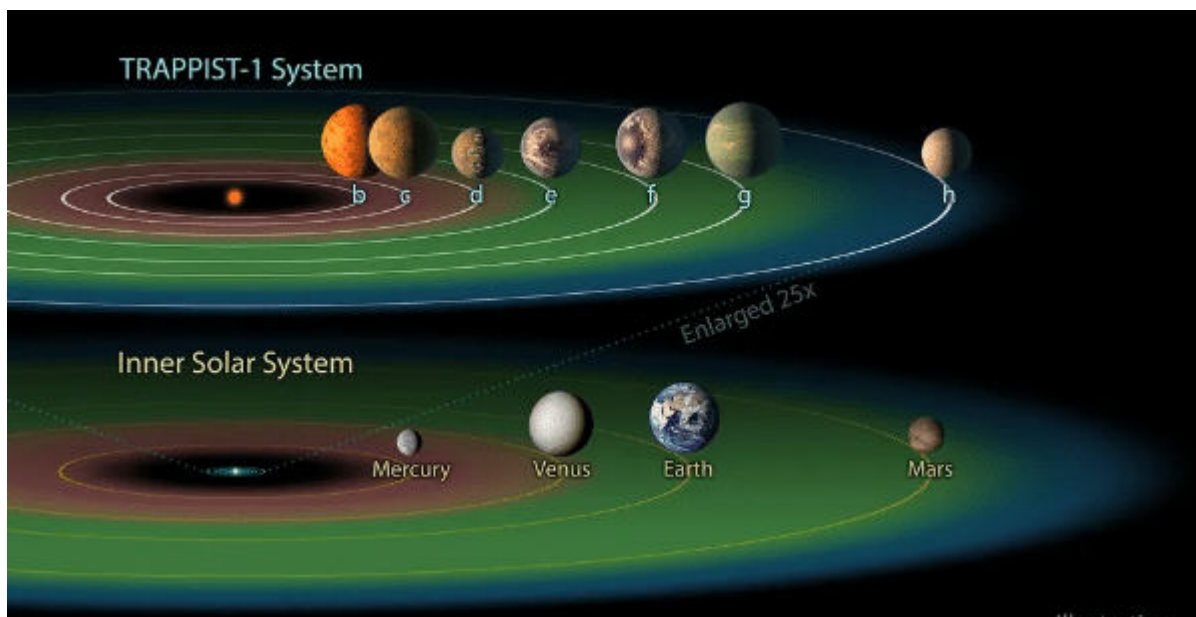


Schéma comparatif de TRAPPIST-1 et de notre système solaire. Les zones habitables sont indiquées en vert. © NASA/JPL-Caltech

La version améliorée de l'ATA dispose d'un logiciel avancé de filtrage des signaux, baptisé NBeam Analysis. Isoler les bonnes interférences radio (RFI) de celles d'origine terrestre est en effet l'un des défis principaux de la détection des technosignatures extraterrestres. Selon les experts, « depuis le tout premier projet de recherche d'intelligence extraterrestre, l'analyse des interférences radio a été un problème important ». Avant de cibler TRAPPIST-1, le système a été testé sur les signaux de nos orbiteurs martiens, notamment pour évaluer sa précision

L'équipe a ensuite observé et intercepté les signaux radio à bande étroite provenant de TRAPPIST-1 durant une fenêtre PPO de 28 heures, constituant la plus longue recherche de signaux radio monocible à ce jour. En isolant les signaux émanant uniquement de la cible, NBeam Analysis a réduit le nombre d'émissions radio de 25 millions à 2 264.



Frank Drake

Frank Drake, radioastronome et astrophysicien américain, pionnier de la recherche de vie intelligente dans la Voie lactée, est décédé le 2 septembre à son domicile d'Aptos, en Californie, à l'âge de 92 ans.

Ses contributions dans le domaine de la science sont nombreuses. Fondateur du champ d'étude scientifique dont l'objet est la recherche de vie extraterrestre intelligente (SETI), on lui doit notamment l'équation de Drake, un modèle permettant d'estimer le nombre de civilisations potentielles dans la galaxie. On lui doit également les premières observations de la ceinture de Van Allen de Jupiter et il est l'un des premiers astronomes à avoir mesuré la température accablante de la surface de Vénus ainsi que l'effet de serre de son épaisse atmosphère. Directeur du radio-observatoire d'Arecibo à Porto Rico, il est la figure tutélaire de générations d'astronomes et d'astrophysiciens qu'il a inspirés.

« Quand on écrira l'histoire de la science d'ici quelques centaines d'années et qu'une forme de vie intelligente aura été détectée en dehors de la Terre, ce qui finira par arriver, j'en suis absolument convaincu, je crois que Frank aura sa place parmi les plus grands scientifiques à avoir vécu », prédit Andrew Siemion, astrophysicien et directeur du Centre de recherche du SETI (BSRC) de l'Université de Californie à Berkeley. « Ça a été extraordinaire d'avoir la chance de le connaître. »

Frank Drake naît le 28 mai 1930 à Chicago. C'est à l'âge de huit ans qu'il entame le parcours intellectuel qui le mène jusqu'aux étoiles quand son père lui apprend qu'il existe d'autres mondes dans le cosmos. Si ce dernier veut en fait parler des autres planètes du Système solaire, l'esprit du jeune Frank imagine pour sa part une multitude de mondes comme la Terre dispersés dans toute la galaxie : des planètes habitables peuplées d'êtres assez intelligents pour s'être dotés de leurs propres voitures et de leurs propres rues et pour avoir répliqué la ville de Chicago.

Frank Drake cultive sa fascination pour l'espace tout au long de son parcours scolaire. En 1951, il obtient une licence d'ingénierie physique à l'Université Cornell. Membre du Corps de réserve de la Navy à Cornell (programme ROTC), il sert dans l'U.S. Navy de 1952 à 1955 en tant qu'officier affecté à l'électronique. Il étudie ensuite l'astronomie à l'Université Harvard de 1955 à 1958 où il a pour directrice de thèse Cecilia Payne-Gaposchkin, l'astrophysicienne qui, la première, a émis l'hypothèse que les étoiles sont principalement faites d'hydrogène et d'hélium.

À Harvard, Frank Drake met pour la première fois à l'épreuve ses théories d'enfant concernant l'existence de Terres alternatives. Une nuit, alors qu'il observe l'amas d'étoiles des Pléiades au

radiotélescope, il aperçoit un curieux signal qui semble se déplacer avec l'amas. Il se dit que des créatures du fond du cosmos sont peut-être en train d'émettre un signal... Mais il s'agit en réalité d'une transmission d'un opérateur radio amateur de la région. Frank Drake se met alors en tête de découvrir par le calcul si un signal radio artificiel aurait pu provenir de ce système lointain.

Après l'obtention de son doctorat, Frank Drake part pour Green Bank et son Observatoire national de radioastronomie (NRAO), où il installe de nouveaux télescopes et réalise des observations alors inédites de Jupiter et de Vénus. En 1960, à l'aide du télescope Tatel, qui mesure 25 mètres de diamètre, il [s'embarque dans ce qu'il nomme le Projet Ozma](#), du nom de la princesse du *Magicien d'Oz*, œuvre de l'écrivain L. Frank Baum. Par ce surnom, il cherche à évoquer un monde semblable au nôtre quoique bizarre et étranger.

Pendant trois mois, Frank Drake scrute des étoiles semblables au Soleil répondant aux noms de Tau Ceti ou d'Epsilon Eridani, en restant à l'affût de signaux radios en provenance de planètes abritant peut-être des civilisations extraterrestres. Il fait chou blanc, « mais c'était un début, et cela a incité beaucoup d'autres personnes à se mettre en quête », [l'entend-on se souvenir dans un entretien de 2012](#).

Le Projet Ozma attire rapidement l'attention du public. À l'âge de 31 ans, Frank Drake obtient un soutien financier de l'Académie nationale des sciences (NAS) pour animer à Green Bank un atelier unique en son genre dont le but est de discuter de la recherche de vie en dehors de la Terre. Un brillant parterre de scientifiques est alors attendu en Virginie-Occidentale (notamment l'astronome Carl Sagan et le biochimiste Melvin Calvin qui obtient un prix Nobel durant le sommet) et Frank Drake se rend compte qu'il a besoin d'une méthode pour organiser les discussions du colloque.

Pour trouver des idées, Frank Drake descend dans le sous-sol situé sous la cafétéria de l'observatoire et se met à noter une série de facteurs que les astronomes devraient connaître pour déterminer le nombre de civilisations détectables dans la Voie lactée. Par exemple, le nombre de planètes orbitant autour d'autres étoiles et la probabilité que la vie émerge sur une planète donnée. Il s'aperçoit ensuite qu'il vient de tracer le contour d'une équation qui permettra de calculer le nombre de civilisations détectables dans notre galaxie selon la valeur des variables.

[L'équation de Drake est née](#) : non pas dans un éclair de génie, mais dans un effort pratique visant à établir un guide de discussions dans le cadre d'un colloque.

« Il n'avait à l'évidence aucune idée à l'époque de ce que cette équation allait devenir, de ce qu'elle allait finir par représenter », confie Nadia Drake, fille de Frank Drake et contributrice régulière pour *National Geographic*. « Le fait que des gens se la soient fait tatouer, qu'on l'ait imprimée sur le flanc d'un camion U-Haul, qu'on la cite régulièrement comme l'une des équations les plus connues de la science, l'amusait beaucoup. »

THE DRAKE EQUATION

$$\begin{aligned} N &= R^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L \\ &\text{The number of detectable civilizations in the Milky Way galaxy} \\ &\text{The rate at which stars are born} \\ &\text{The fraction of stars that host planets} \\ &\text{The number of habitable planets per planetary system} \\ &\text{The fraction of those planets on which life evolves} \\ &\text{The fraction of life that evolves intelligence} \\ &\text{The fraction of intelligent life that develops communicative technologies} \\ &\text{The average length of time civilizations are detectable} \end{aligned}$$

PHOTOGRAPHIE DE [Mark Thiessen](#), [National Geographic](#)

Après le NRAO, Frank Drake travaille brièvement au Laboratoire de recherche sur la propulsion par réaction de la NASA en tant que directeur du service des sciences lunaires et plané-

taires. En 1964, il rejoint le département d'astronomie de l'Université Cornell. Il est également directeur de l'Observatoire d'Arecibo à Porto Rico de 1966 à 1968 puis du Centre national d'astronomie et de l'ionosphère (NAIC), qui administre l'observatoire, de 1971 à 1981.

Lors de son mandat, Frank Drake supervise notamment des rénovations à l'Observatoire d'Arecibo. Celles-ci doivent adapter à la recherche astronomique cet observatoire qui sert à l'origine à surveiller la haute atmosphère dans le cadre d'un programme de défense anti-missiles. Sur la gigantesque antenne parabolique du télescope, on installe, entre autres, un nouveau revêtement ainsi qu'un puissant radar dernier cri ; l'instrument est désormais plus sensible que jamais et peut détecter le mouvement d'astéroïdes et d'autres corps planétaires.

Frank Drake joue également un rôle central dans la représentation que l'humanité donne d'elle-même dans les messages qu'elle émet vers ces mondes lointains. C'est à lui que l'on doit le « [message d'Arecibo](#) », signal radio émis en 1974 en direction d'un amas d'étoiles situé à environ 22 000 années-lumière.

En 1972, Frank Drake co-conçoit la plaque de Pioneer, ce célèbre message pictographique dont on a équipé les sondes Pioneer 10 et Pioneer 11 représentant un homme et une femme, notre Système solaire, ainsi qu'une carte indiquant la position du Soleil dans la galaxie. Il deviendra également directeur technique du Voyager Golden Record, cet emblématique recueil de photos et de sons terriens qui, de même que la plaque de Pioneer, est une bouteille que l'humanité a jeté dans les mers du cosmos.

Frank Drake quitte Cornell en 1984 et emménage avec sa famille en Californie où il devient doyen du Département des sciences naturelles de l'Université de Californie à Santa Cruz. Quand il démissionne de ce poste en 1988, il y demeure toutefois professeur et est recruté à l'Institut SETI, qui vient alors d'être fondé, où il officie en tant que président du conseil d'administration et en tant que directeur du Centre Carl-Sagan pour l'étude de la vie dans l'Univers. Il mettra fin à sa carrière d'enseignant en 1996.

Les distinctions académiques qu'il reçoit tout au long de sa carrière sont pléthoriques. La [nécrologie publiée par l'Université de Californie à Santa Cruz](#) en atteste : membre de l'Académie américaine des arts et des sciences, membre de l'Académie nationale des sciences, président de la Société astronomique du Pacifique, président du Comité national de recherche en physique et en astronomie, et vice-président l'Association américaine pour l'avancement des sciences.

Mais on ne peut résumer Frank Drake à son travail. Pour canaliser son désir ardent de précision mathématique, il devient lapidaire amateur ; il taille et polit des pierres précieuses pour fabriquer des bijoux pour ses amis et sa famille. Il aime cultiver des orchidées (ses serres en abritent des centaines). Pendant un temps, il cultive également son propre vin rouge et remporte quelques médailles pour son travail à la New York State Fair.

Frank Drake est aussi un grand malicieux, et c'est sa fille qui le dit. Au début des 1980, alors qu'ils habitent Ithaca, il passe tout un réveillon de Noël à sauter dans le bois qui jouxte sa maison avec une lampe de poche couverte de cellophane pour donner à Nadia et à sa petite sœur la joie d'apercevoir le tarin lumineux de Rudolphe le renne au nez rouge, star fictionnelle de contes pour enfants.

Mais ses tendances espiègles débordent également sur sa vie professionnelle. Quand, pour fustiger ce qu'il considère être un gaspillage d'argent public, le sénateur américain William Proxmire décerne un très ironique [Golden Fleece Award à une proposition de la NASA et du SETI](#), Frank Drake tente d'inscrire l'écu à la Flat Earth Society, qui défend l'idée selon laquelle la Terre serait plate. Sa requête sera toutefois rejetée.

Dans ses dernières années, Frank Drake sera témoin d'une révolution qui transformera l'astronomie du 21^e siècle, qui approfondira l'intérêt scientifique porté au SETI et qui permettra d'affiner les paramètres de son équation : la découverte de milliers de planètes orbitant autour d'autres étoiles dans la Voie lactée.

Nadia Drake se souvient d'un jour de 2011 où Kepler, le télescope spatial de la NASA, a transmis [un diagramme](#) répertoriant plus de 1 200 nouvelles planètes potentielles découvertes dans son champ de vision. Quand Nadia l'a montré à son père, « il s'est juste arrêté un instant et a simplement dit : 'Il y a tant de planètes' », avec une voix pleine d'émerveillement.

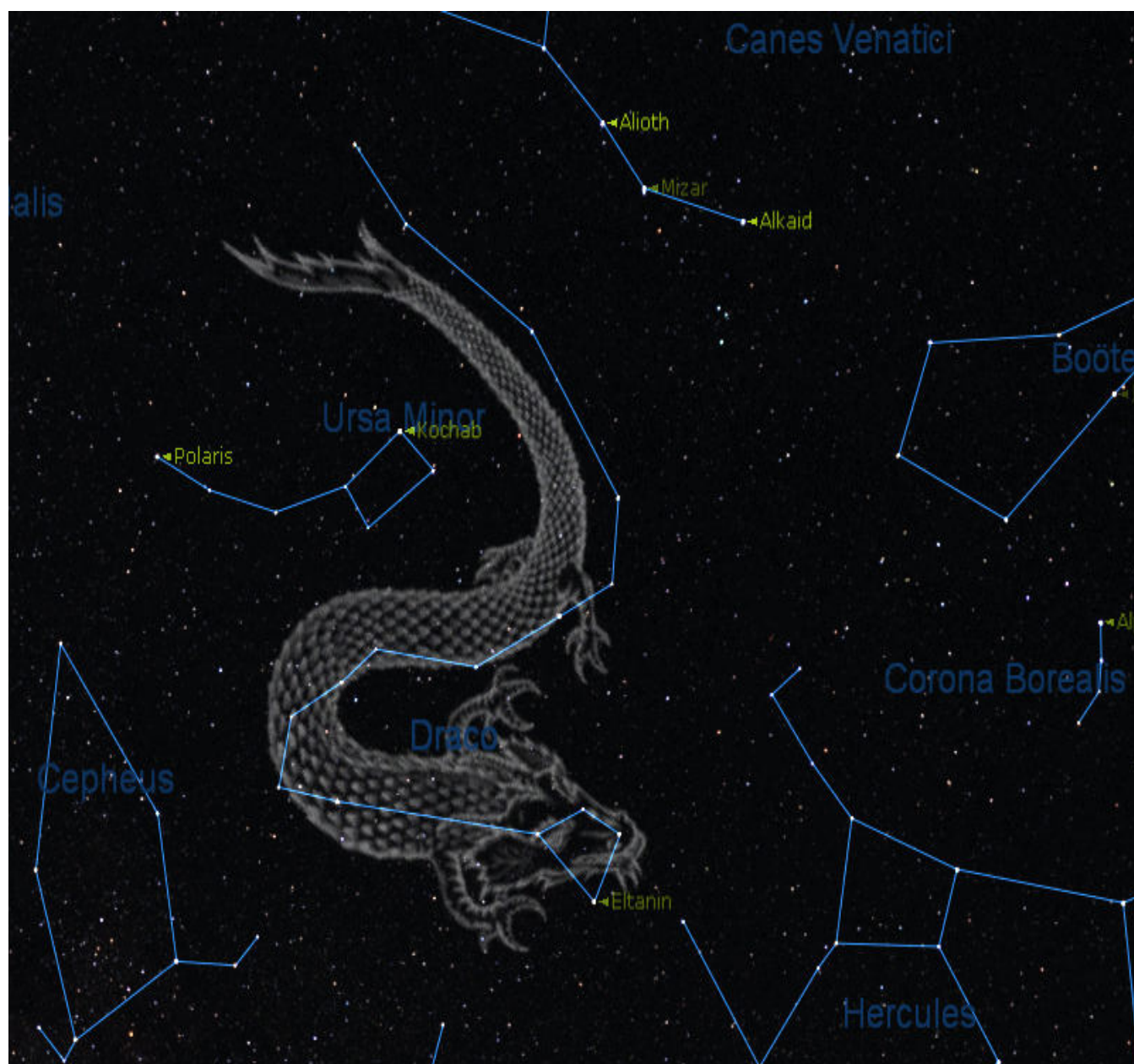
Grâce à Kepler et à d'autres missions, les astronomes savent désormais que le nombre de planètes et d'étoiles dans la Voie lactée se trouve sur le même ordre de grandeur : il y en aurait 100 à 400 milliards. Parmi elles, [des centaines de millions pourraient être des planètes](#) telluriques de la taille de la Terre orbitant à une distance autorisant la présence d'eau liquide. Nombreux sont les astronomes qui pensent qu'un jour nous pourrions découvrir des traces de vie sur l'un de ces mondes lointains.

Et comme l'avait prédit un certain Frank Drake il y a plus de 80 ans, peut-être que ces planètes ont leurs propres voitures, leurs propres rues et leur propre Chicago.

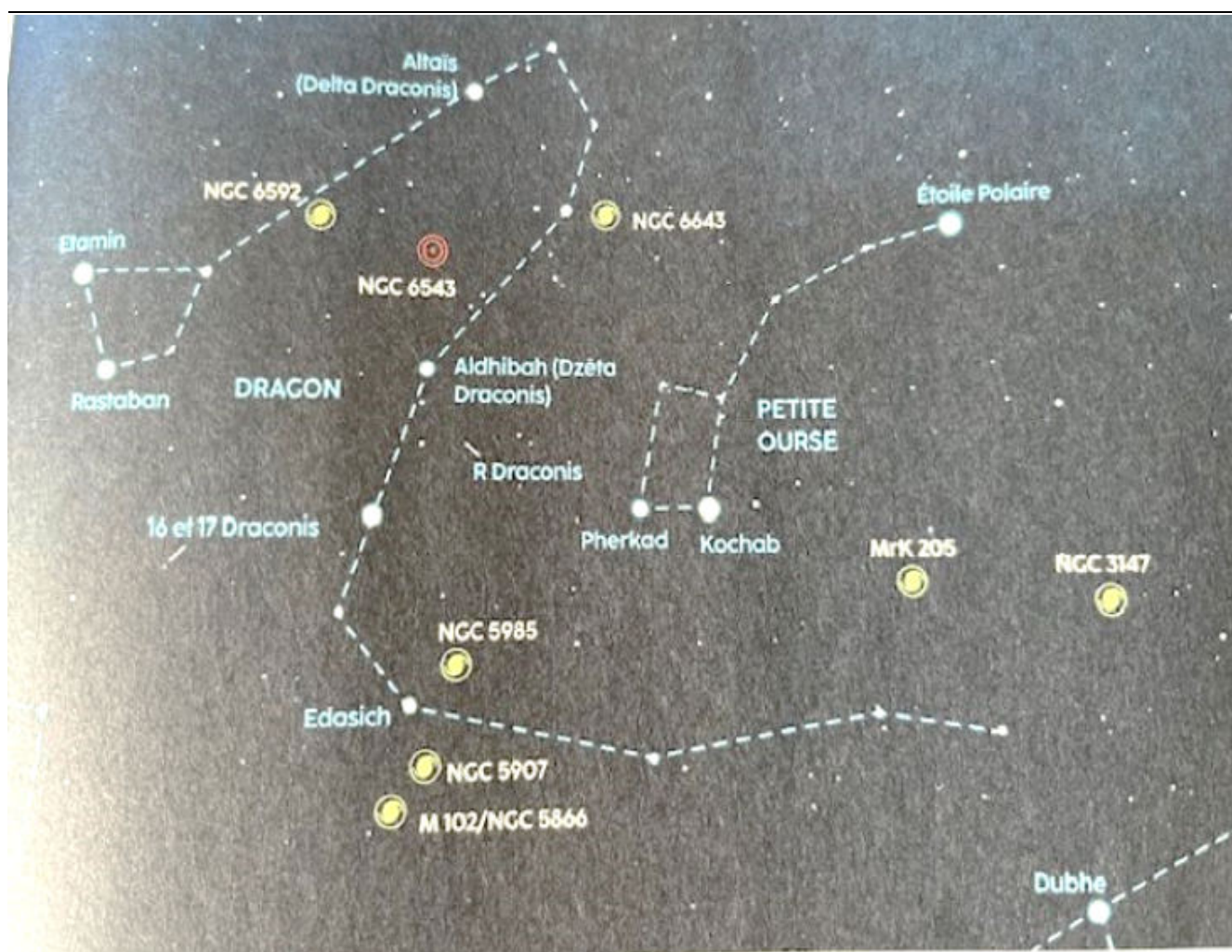
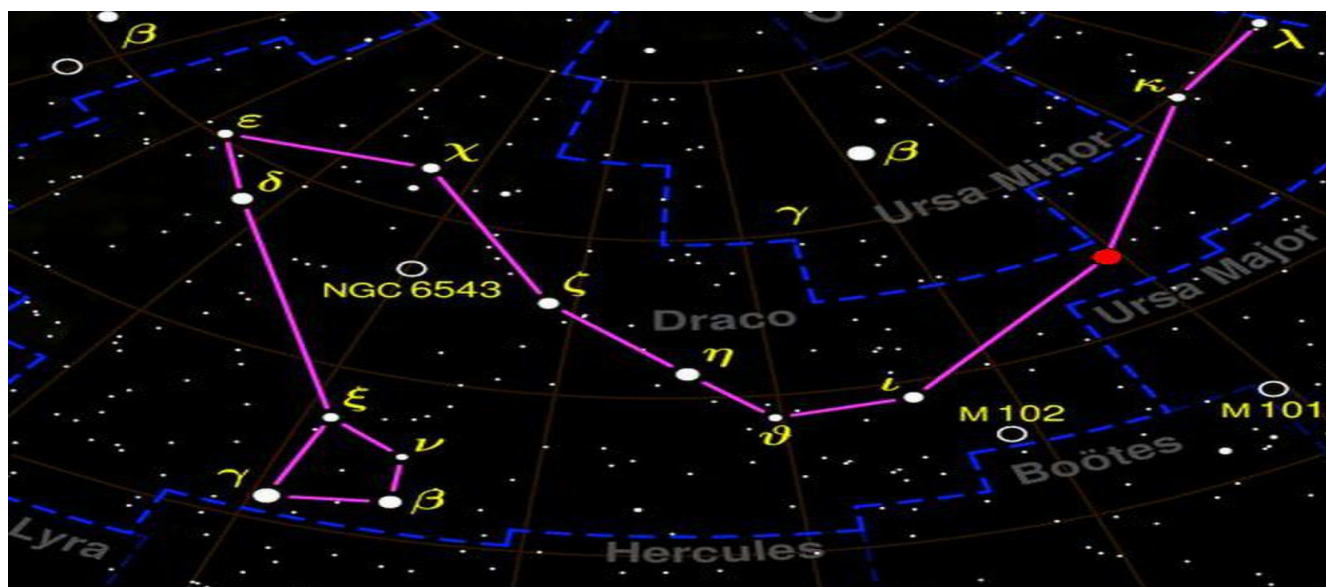
En plus de sa fille Nadia, Frank Drake laisse derrière lui Amahl Shakhashiri Drake, sa femme depuis 44 ans ; Leila Drake Fossek, sa fille ; Steve Drake, Richard Drake et Paul Drake, ses fils issus d'un précédent mariage ; Bob Drake, son frère ; ainsi qu'une nièce, un neveu et quatre petits-enfants.

[Michael Greshko](#)

Constellation de Novembre : Le Dragon



Alpha Dra « Etamin » est une géante bleue située à 220 a.l. de la Terre ; de magnitude apparente 3,6 et de luminosité 500 fois plus forte que celle du Soleil



En jaune : les galaxies

En orange : une nébuleuse planétaire

La constellation du Dragon est une très grande constellation de 1080 degrés carrés. Elle passe entre les 2 Ourses et encercle la Petite. Elles sont circumpolaires tout comme Cassiopée vue le mois dernier. Elle est donc visible tout au long de

l'année. Du Dragon on peut apercevoir un essaim d'étoiles filantes les Dragnides dont le pic se produit autour des 8-10 octobre. Ces poussières laissées par la comète 21P/Giacobini-Zinner, peuvent provoquer, certaines années, de véritables pluies de météores. Il y a 4800 ans l'une de ses étoiles, Thuban (Alpha dragonis) était l'étoile polaire, l'astre le plus proche du pôle nord céleste. De nos jours c'est Alpha (Polaris) de la Petite Ourse qui tient ce rôle.

Les astres à découvrir ...

Aux jumelles : le dragon abrite une multitude d'étoiles doubles et variables. Parmi les plus visibles les étoiles 16 et 17 du Dragon, un couple brillant et facile à dissocier. La nébuleuse de l'Œil de chat, NGC 6543 apparaît dans de puissantes jumelles comme un astre bleuâtre, entre les étoiles Delta et Dzêta. Mais il faut au moins un télescope de 200mm pour distinguer un peu mieux cette nébuleuse planétaire.

A la Lunette : 70 étoiles variables sont distribuées dans la constellation. La plus remarquable est l'étoile R, de type Mira, dont la magnitude passe de 7 à 13 en 246 jours. Une lunette de 60mm suffit pour repérer la galaxie spirale NGC 3147. Quant à la galaxie elliptique NGC 5866, elle se situe en bordure du Bouvier proche de l'étoile M 102 de magn. 5,2 .

Au 200 mm : NGC 5985 est une belle galaxie spirale vue du dessus. En photo ses bras fins laissent apparaître les différentes régions de rands nuages de gaz. Autre spirale NGC 5907 visible par la tranche.

Pour les spécialistes MrK 205 est une galaxie très particulière puisque c'est un quasar, une galaxie au noyau très énergétique. Située à 1 milliard d'années-lumière, c l'un des quasars les plus proches.

NGC 6643 est assez facile à observer parce qu'elle a un aspect assez tourmenté.

Enfin on aperçoit un regroupement de 7 galaxies dans un champ de 30', proches d'une étoile de magnitude 6,3.

Mythologie : selon les mythologies ce cortège sinueux d'étoiles représente un serpent ou un Dragon.

Chez les Grecs, il s'agit de Ladon, le gardien du jardin des Hespérides, dont Héraclès (Hercule) devait voler les pommes d'or. Sur la voute céleste, la tête du Dragon se trouve sous le pied du héros. Elle est formée par les 3 étoiles les plus lumineuses de la constellation.

Hespérides

Les **Hespérides**, les nymphes du couchant passent pour être les filles de Nix, ou de Zeus et de Thémis, ou encore de Phorcys et de Cété, ou enfin d'[Atlas](#) et d'Hespéris.

On en comptait ordinairement trois (Aéglé, Erytheïa, Hespéris) auxquelles Apollodore ajoute Aréthuse, mais on en figurait quelquefois sept voire onze. Elles habitaient une île voisine de l'Atlas, un jardin merveilleux, rempli de pommes d'or, et gardé par Ladon, dragon à cent têtes.



Suivant la tradition la plus répandue, [Héraclès](#) accomplit le [onzième de ses travaux](#) en tuant le dragon, en cueillant les pommes, et en les rapportant à [Eurysthée](#).

D'après d'autres versions, il reçut les pommes des mains des Hespérides, ou encore des mains d'Atlas, qui était allé cueillir les fruits d'or pendant qu'Héraclès portait le monde sur ses épaules.

On contait encore que [Busiris](#), roi d'Egypte, amoureux des Hespérides sur leur simple réputation, les fit enlever par des pirates; mais ceux-ci furent tués par Héraclès, à qui Atlas, en reconnaissance, fit don des pommes d'or.

On disait aussi qu'Héraclès apporta en dot à Zeus les pommes des Hespérides. C'est avec ces pommes qu'Eris sema la zizanie entre Héra, Aphrodite et Athéna.

Arts



Les Hespérides
(1877), Edward BURNE-JONES



Le jardin des Hespérides
c.1892, Frédéric [LEIGHTON](#)
© Lady Lever Art Gallery



Hercule chez les Hespérides

Rupert BUNNY

Filiation

Hespéris

Atlas

HESPERIDES

Époux* / amant

Enfants

Bibliographie

- Dictionnaires et encyclopédies Britannica, Larousse et Universalis.
 - Encyclopédie de la mythologie d'Arthur COTTERELL; (plusieurs éditions) Oxford 2000
 - Encyclopedia of Ancient Deities de Charles RUSSELL COULTER et Patricia Turner
 - Dictionnaire des mythologies en 2 volumes d'Yves BONNEFOY, Flammarion, Paris, 1999.
 - L'encyclopédie de la mythologie : Dieux, héros et croyances de Neil PHILIP, Editions Rouge et Or, 2010
 - Mythes et légendes; Editions de Lodi, Collectif 2006.
 - Mythes et mythologie de Félix GUIRAND et Joël SCHMIDT, Larousse, 1996.
 - Dictionnaire des symboles de Jean CHEVALIER et Alain GHEERBRANT, 1997
 - Dictionnaire de la fable de François NOEL
 - Dictionnaire critique de mythologie de Jean-Loïc LE QUELLEC et Bernard SERGENT
- Quelques [autres livres](#) pour approfondir ce sujet.

Sources antiques

- [Apollodore](#), Bibliothèque: II, 5 sqq ; II, 11
- [Diodore de Sicile](#): IV, 26
- [Hésiode](#), Théogonie: 215
- [Pausanias](#), Périégèse: V, 18, 4

LE SAVIEZ-VOUS ?

1) Le 11 novembre

Le 11 novembre 2004, le petit atterrisseur Philae se pose sur Chury, transporté par la sonde Rosetta à plus de 500 millions de kilomètres de la Terre. Il est largué sur la comète pour y effectuer des analyses en surface. Mais au moment de toucher le sol les harpons de Philae ne fonctionnent pas. Il rebondit deux fois avant de se coincer dans une crevasse, à environ 1 km du site d'atterrissage. Malgré cela, Philae parvient à envoyer quelques données à Rosetta avant que ses communications ne soient définitivement coupées, le 9 juillet 2015.



2) Le 16 novembre

Le 16 novembre 1974, un message à destination d'éventuels extraterrestres est émis par le radio télescope d'Arecibo. Il a été conçu par Frank Drake (1930-2022) avec l'aide de Carl Sagan (1934-1996). Il donne des informations sur la Terre et l'humanité et a pour destination l'amas d'Hercule situé à plus de 22000 années-lumière de la Terre.



3) Le 27 novembre

Le 27 novembre 2021, la sonde Solar Orbiter de l'ESA frôlait la Terre à 460 km pour une première manœuvre gravitationnelle, prélude à sa mission d'observation du Soleil. Depuis au fil des survols de Vénus, elle incline peu à peu son orbite par rapport au plan du système solaire, dans un but de dévoiler des régions inexplorées de la surface de notre étoile.



3) Le 28 novembre

Le 28 novembre 1964, la sonde américaine Mariner 4 décolle à destination de Mars. Elle réalisera le premier survol de la planète rouge en juillet 1965, avec l'envoi de photos vers la Terre. Le programme Mariner visait l'étude des planètes telluriques. Mariner 4 est son deuxième succès. En 1962, Mariner 2 avait réussi le survol de Vénus.



Ciel et Espace

ENIGME

Etoiles & Constellations

Mon premier peut réparer un squelette
Mon second prépare du cuir
Mon troisième peut coucher plusieurs personnes
Mon tout est un Centaure qui attaque un dangereux Scorpion

Envoyez vos solutions à :

andrebourdet@gmail.com

Solution de l'énigme précédente

Etoiles & Constellations

Mon premier est l'arme qui assassine mon troisième
Mon second est ce que fait mon premier à mon troisième
Mon troisième est un slave victime de mon premier
Mon tout est le gardien d'un gros animal nordique

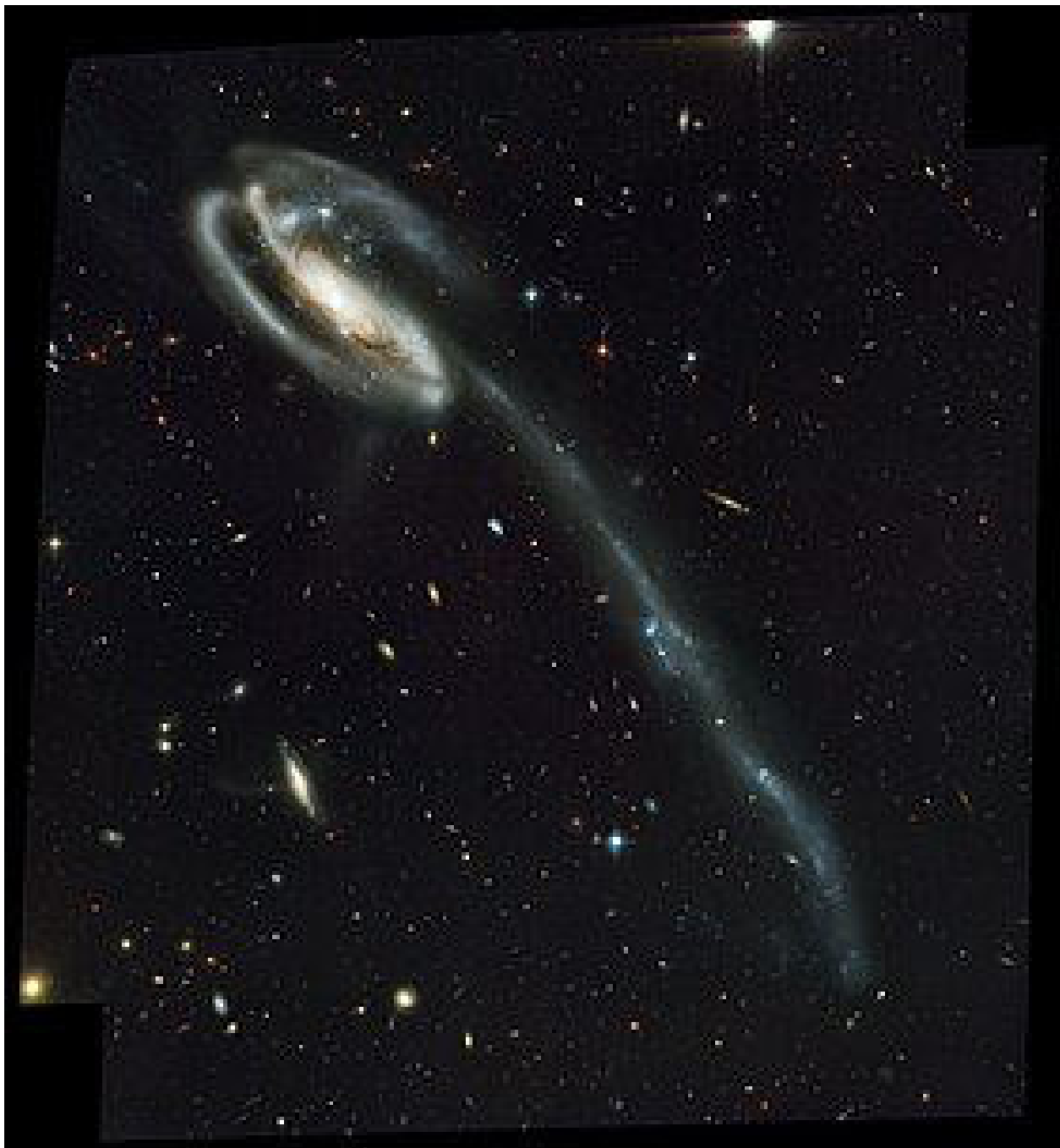
*Arc, parce que Arc tue Russe
Tu, parce que Arc tue Russe
Rus, parce que Arc tue Russe
Arcturus, le gardien de l'Ourse*

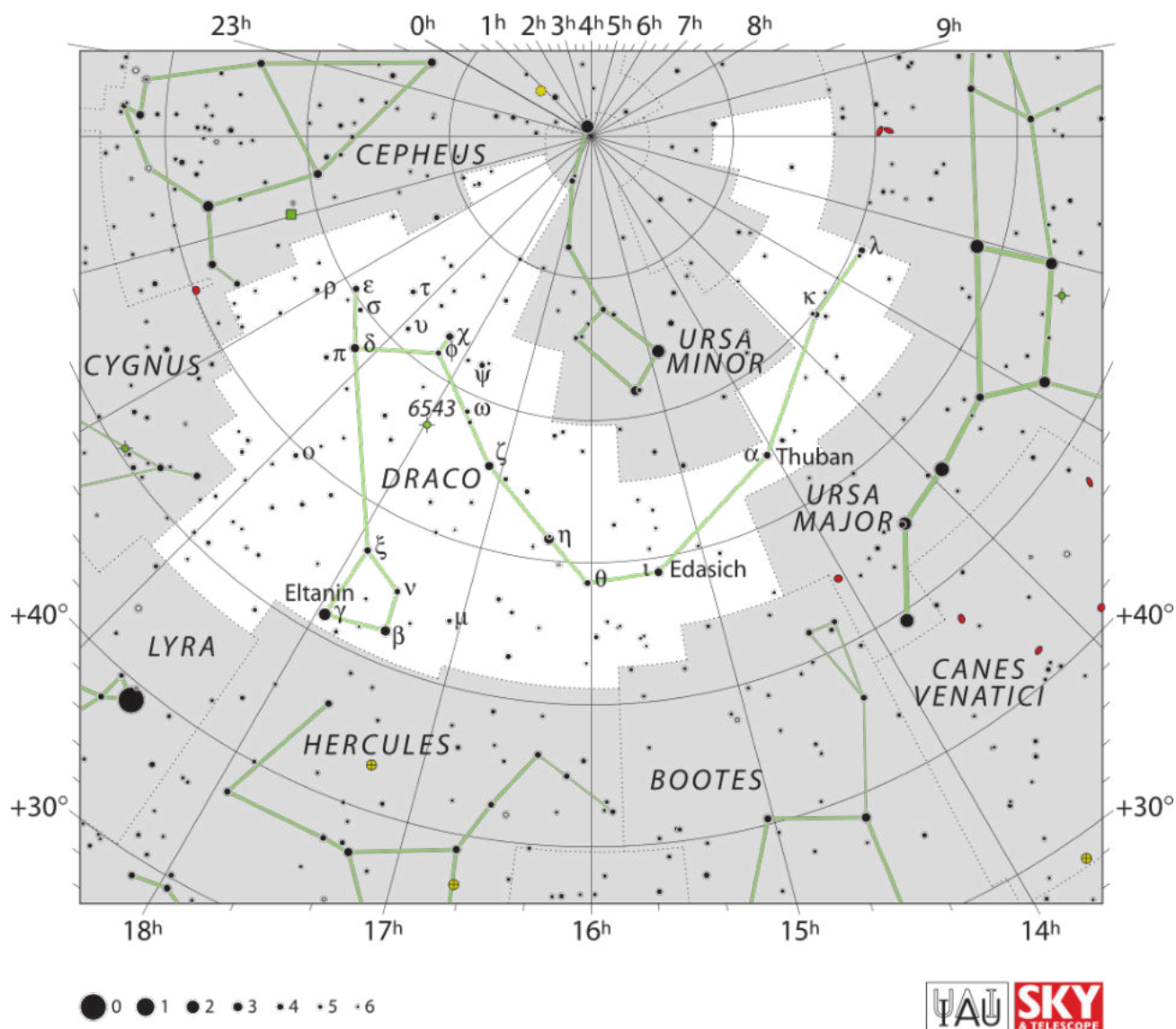
•

La galaxie du Têtard (ou UGC 10214)

La **galaxie du Têtard** (ou **UGC 10214**) est une galaxie spirale barrée particulière située dans la constellation du Dragon. Sa vitesse par rapport au fond diffus cosmologique est de $9\,349 \pm 3$ km/s, ce qui correspond à une distance de Hubble de $137,9 \pm 9,7$ Mpc (450 millions d'al)¹.

La classe de luminosité de UGC 10214 est III et elle présente une large raie HI¹. UGC 10214 figure dans l'atlas des galaxies particulières d'Halton Arp sou la cote Arp 188².





[Ascension droite \(\$\alpha\$ \)](#)

$16^{\text{h}} 06^{\text{m}} 03,9154^{\text{s}}$ ¹

[Déclinaison \(\$\delta\$ \)](#)

$+55^{\circ} 25' 31,639''$ ¹

[Magnitude apparente \(\$v\$ \)](#)

~ 14 ²

Dimensions apparentes (v)

$3,6' \times 0,8'$ ³

[Décalage vers le rouge](#)

Galaxie en interaction

UGC 10214 est célèbre pour sa morphologie particulière qui présente notamment un long panache d'étoiles et de gaz, semblant s'échapper de la galaxie et qui a valu son surnom. Cette longue trainée, que l'on appelle une queue de marée, s'étend sur environ 120 kpc (391 000 al) en direction de l'est et résulte du passage rapproché d'une petite galaxie naine « intruse » avec UGC 10214⁵. Lors de cette rencontre, il y a une centaine de millions d'années⁵, les forces de marée engendrées par le passage de la galaxie compagnon ont éjecté une grande quantité d'étoiles et de nuages de gaz, dispersés à présent autour de la galaxie spirale sur de vastes distances comme nous le montre la présence de la queue².

La queue de marée d'UGC 10214 contient de nombreux amas stellaires abritant de jeunes étoiles bleues. L'âge de ces amas varie entre 3 et 10 millions d'années⁶. Au milieu de la queue se trouvent deux vastes nœuds d'étoiles, le plus grand ayant un rayon d'environ 161 pc (525 al)⁶, qui pourraient correspondre à des galaxies naines naissantes⁷. Le reste de la galaxie présente lui aussi une structure très perturbée comme le suggère le bras spiral sud à demi disloqué et au niveau duquel se trouve encore la petite galaxie responsable de ce chaos².

Supernova

La supernova SN 2008dq a été découverte dans UGC 10214 le 25 juin 2008 par J. Leja, W. Li et A. V. Filippenko de l'Université de Berkeley dans le cadre du programme LOTOSS de l'observatoire Lick⁸. D'une magnitude apparente de 18,3 au moment de sa découverte, elle était de type Ic⁹.

Notes et références

Notes

1er

2eDiamètre dans la bande POSS1 103a-O.

Références

1er

(en) « *Results for object UGC 10214 [archive]* », NASA/IPAC Extragalactic Database (consulté le 19 janvier 2024).

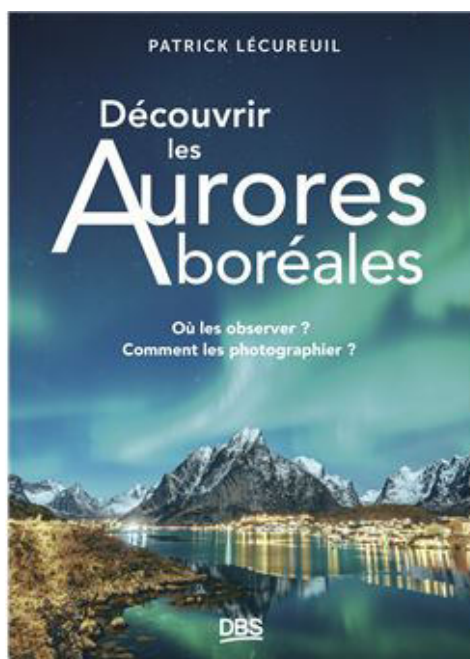
(en) Courtney Seligman, « *Celestial Atlas Table of Contents, PGC 5700 - 57499 [archive]* » (consulté le 19 janvier 2024).

« *Your NED Search Results, Distance Results for UGC 10214 [archive]* », sur ned.ipac.caltech.edu (consulté le 19 janvier 2024).

(en) « *UGC 10214 sur HyperLeda [archive]* » (consulté le 19 janvier 2024).

(en) H. C. Ford, H. D. Tran, M. Sirianni et G. D. Illingworth, « *ACS and Keck Observations of the Dwarf Galaxy that is Interacting with UGC 10214 ("The Tadpole")* », *Article*, vol. 201,[†]décembre 2002, p. 26.04 (lire en ligne [archive], consulté le 19 janvier 2024)

LIRE-VOIR-SORTIR



Partez à la recherche des aurores polaires, l'un des phénomènes physiques les plus spectaculaires et féériques qu'il nous soit permis d'observer sur Terre et dans l'espace !

Depuis la nuit des temps, les aurores polaires font rêver. Et nous sommes, chaque année, toujours plus nombreux à tenter de les découvrir. Liées à un cycle solaire particulièrement actif depuis 2 ans (le pic est autour de 2025), ces

De tous les phénomènes célestes, les aurores boréales sont l'un des plus féériques ! Liées à un cycle solaire particulièrement actif depuis deux ans, elles ont rarement été aussi intenses

et fréquentes à observer, même sous nos latitudes. Le ciel nocturne se drapait alors, sous nos regards émerveillés, en un jeu de lumières éphémère et mouvant qui éclipse la grande majorité des étoiles.

Destiné au grand public fasciné par les spectacles du ciel et aux astronomes amateurs, ce guide magnifiquement illustré permet de comprendre l'origine et les spécificités des aurores polaires. Il nous donne également tous les conseils indispensables pour partir à leur recherche, pour les observer et pour les photographier.

Une invitation au voyage, un rêve éveillé !

La caméra FRIPON



Le club est ouvert à tous (adultes et enfants).



http://www.fripon.org/IMG/jpg/stations/RT_FRBR04.jpg

Château d'eau

De Kersauz

Rue Guillemette le Barbier
56730 Saint Gildas de Rhuys

Renseignements :

Téléphone-répondeur : 09 53 52 85
63

Messagerie :

clubastrorhuys@gmail.com