Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

Première parution dans les CC 105 (printemps 2004) à 116 (hiver 2006)

Sommaire

Sommaire 1
I- Premiers temps 2
II- Mouvements de la Terre 5
III-Mécanique des mouvements des astres 11
IV-Les mouvements elliptiques 13
V- Les mouvements perturbés 20
VI- L'analyse de la lumière 23
VII- Les spectres enfin compris 28
VIII- Les étoiles mystérieuses. 33
IX- Les étoiles vivent 36
X- Les étoiles meurent aussi 42
XI- Des étoiles aux galaxies 45
XII - L'Univers 49

I- Premiers temps

Résumé : *Dans cette introduction, très brève, du cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique, nous décrivons quelques phénomènes observés, essentiellement à l'horizon, par les premiers astronomes. Nous découvrons ainsi comment le temps, qui règle notre vie et garde la mémoire des choses passées, s'est construit autour de ces phénomènes dont il nous faudra comprendre l'origine.*
Mots-clefs : histoire – planète – calendrier

Introduction

J'ai souhaité rédiger ce modeste cours en pensant surtout aux « commençans », comme écrivait Clairaut. En effet, tout ou presque a déjà été dit et écrit dans les Cahiers Clairaut depuis 25 ans. Aussi certains jeunes enseignants pensent qu'ils ont raté le départ du train. Alors il est tentant de refaire partir un train, de temps en temps. Même si les choses déjà vues sont redites et expliquées à nouveau, l'éclairage qu'on y apporte n'est jamais le même.

Il y a deux façons de comprendre un phénomène : « avec les mains », sans équations, ou avec des calculs. Les deux approches sont nécessaires, et les deux réclament une aptitude particulière. Cependant, dans ce cours, nous essaierons de privilégier la première méthode avec simplement un peu d'arithmétique quand cela sera utile pour une description plus quantitative.

J'espère ainsi que nous partagerons ensemble le plaisir qu'il y a à comprendre.

Astronomie et astrophysique

À une époque préhistorique perdue dans la nuit des temps, les premiers hommes ont certainement été frappés par la régularité de certains phénomènes célestes ou ont été intrigués par d'autres phénomènes se produisant de manière apparemment aléatoire. Ces ancêtres lointains faisaient de l'*astronomie*. Nous pouvons les imaginer contemplant un soleil couchant, repérant les étoiles fixes, les astres vagabonds que sont les planètes, la Lune, visiteuse régulière, le Soleil, source quotidienne de chaleur. Ils ont dû s'inquiéter quand, lors d'une éclipse de Lune, la nuit claire devenait brusquement obscure, ou pire, quand le Soleil disparaissait en pleine journée, lors d'une éclipse totale de Soleil. Ils ont dû admirer les arcs-en-ciel naissant après la pluie, le retour régulier des marées hautes pour les peuplades côtières et peut-être aussi les aurores polaires, visibles parfois à basse latitude. Ces observations ont certainement fait naître la curiosité : pourquoi tel phénomène se produit-il ?

Lentement, la construction logique d'une explication s'est fait jour. Comme toujours dans l'évolution des idées, les hommes ont commencé par y voir la manifestation d'une puissance surnaturelle. Ce n'est qu'avec les progrès de la physique que le lien s'est opéré, donnant naissance à l'*astrophysique*. L'origine est, là aussi, difficile à préciser. Les savants grecs, comme nous le verrons, plusieurs siècles avant le début de notre ère, faisaient déjà de l'astrophysique, en utilisant par exemple l'ombre de la Terre, un phénomène physique connu et expérimenté sur Terre, pour déterminer la distance de la Terre à la Lune.

Mais la grande avancée de l'astrophysique est certainement à faire coïncider avec l'analyse spectrale de la lumière. Ce sera l'objet des chapitres plus avancés.

Premiers vestiges

L'astronomie, qui étymologiquement signifie le classement des astres, se confond avec la science du temps. En effet, la première utilisation des connaissances tirées de l'observation des astres fut bien celle du réglage du rythme de la vie, autrement dit de la définition du temps.

Avant même de construire un calendrier découpant le temps en cycles précis, l'homme préhistorique a enregistré le nombre de retours du Soleil entre deux phénomènes. Après le Soleil, le phénomène qui se reproduit le plus rapidement et le plus régulièrement est le retour de la pleine lune. Tous les 29 ou 30 jours, la Lune apparaissait bien ronde et très lumineuse à l'homme préhistorique.

Des os gravés, vieux de 10 000 ou 30 000 ans et portant des entailles ou des marques régulières, ont été trouvés dans des sites préhistoriques comme celui d'Ishango au bord du lac Édouard en Afrique équatoriale ou celui de la grotte Blanchard (figure I-1), près d'Argenton-sur-Creuse au nord de Limoges. Était-ce déjà le décompte des jours ou des lunaisons ? Difficile à dire.

Figure I-1 : Os préhistoriques : en haut, os gravé d'Ishango ; en bas os de la grotte Blanchard. Était-ce le premier enregistrement des jours qui passent ? Photos wikimedia commons

La preuve la plus frappante vient peut-être de ce qu'on appelle la pierre de Knowth, en Irlande. C'est un véritable calendrier lunaire. Il est bien plus récent puisqu'il date vraisemblablement du III^{e} millénaire avant notre ère. Nous le redessinons à la figure I-2, d'après le livre de Parisot et Suagher [1].

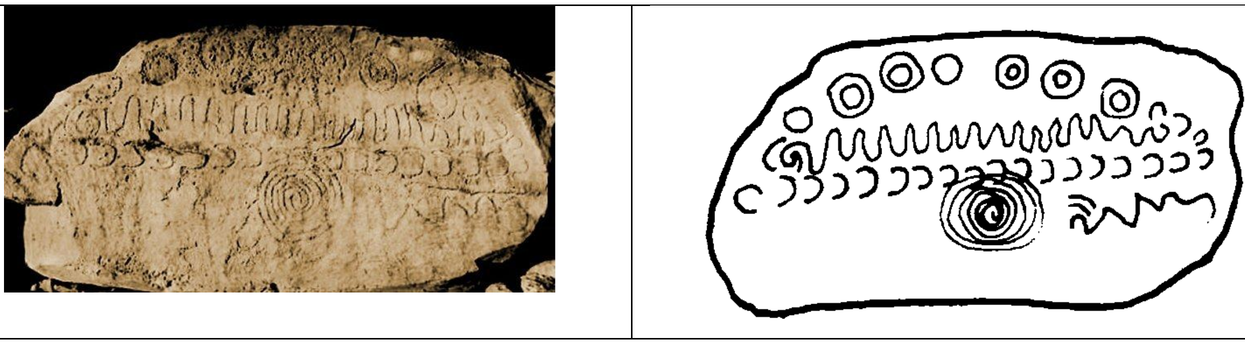


Figure I-2: Le calendrier lunaire de Knowth. Photo wikimedia commons

Hormis différents symboles difficiles à interpréter, on y trouve clairement la représentation de différentes phases de la Lune : pleine lune, premier quartier, dernier quartier. Ce qui est remarquable, c'est que le nombre de symboles représentant la Lune est de 29 !

Premiers instruments de mesure

Les chercheurs d'aujourd'hui ont recours à des instruments de mesure gigantesques, télescopes, détecteurs ou accélérateurs de particules, qui souvent dépassent ce qu'un individu seul peut réaliser. Mais les premiers instruments de mesures astronomiques étaient eux aussi colossaux, œuvre d'un peuple et non d'un homme seul. Il s'agissait de pierres énormes, les mégalithes, disposées de façon à rendre possible le repérage de directions privilégiées.

Ces observatoires sont par exemple celui de Carnac en Bretagne du Sud, près de la presqu'île de Quiberon en France ou celui de Stonehenge en Angleterre (figure I-3).

Le menhir dit le Géant de Manio à Carnac servait peut-être de point de mire. Depuis un autre lieu du site, il était possible de viser par exemple un lever du Soleil. Les premiers observateurs durent constater que le Soleil ne se levait pas toujours dans la même direction. L'hiver, quand les jours étaient courts à Carnac, le Soleil se levait au sud-est ; quand la durée du jour était plus longue, le Soleil se levait au nord-est. L'homme du XXI^{e} siècle sait-il encore que le Soleil ne se lève pas toujours exactement à l'est ?

Crédit image Wikipedia Commons

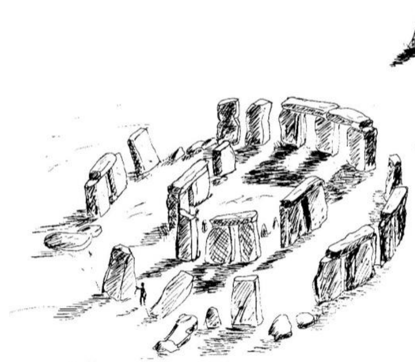


Figure I-3: Les restes du site de Stonehenge en Angleterre

À Stonehenge (figure I-3) c'est encore plus extraordinaire. Les mégalithes disposés en cercle étaient au nombre de 30. L'un d'eux, Heelstone, situé à l'écart, permettait de trouver, depuis le centre du cercle, une direction faisant un angle de 50 degrés par rapport au nord, en direction de l'est (figure I-4). Est-ce une direction privilégiée ?

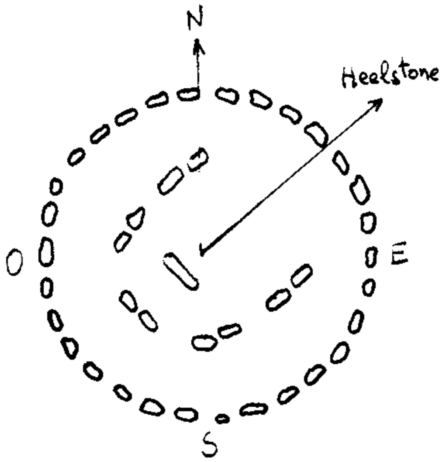


Figure I-4: Carte du site de Stonehenge en Angleterre.

En faisant une simulation avec un logiciel astronomique, on trouve que le 21 juin le Soleil coupe l'horizon du site à 4 h 46 min, heure locale (Royaume-Uni), la direction du Soleil étant de 49,6° par rapport au Nord. Il n'y a pas à se tromper, cette direction marquait le lever du Soleil le jour dit du solstice de juin, précisément le jour le plus long de l'année.

Les premières mesures astronomiques datent de cette époque, environ trente siècles avant notre ère. L'astronome était aussi un prêtre, car science et religion étaient intimement mêlées.

Premières mesures du temps

Les calendriers constituaient les premières mesures du temps qui passe. Presque tous les calendriers anciens sont basés sur les lunaisons, des cycles de 29 jours environ. Ces calendriers avaient pour but de structurer le temps en périodes bien définies. Ils permettaient aussi de prévoir le retour des saisons, des pluies, des crues, de la sécheresse qui revenaient régulièrement après un certain nombre de lunaisons. Cette connaissance était importante à une époque où l'homme vivait en contact direct avec la nature.

Les premières mesures du temps plus précises utilisaient le gnomon, simple bâton planté verticalement dans le sol. La direction et la longueur de l'ombre renseignent à la fois sur le moment de la journée et sur la saison. Ce nouveau moyen permettait de fractionner la journée en unités de temps plus petites, les heures *(voir « À propos des heures planétaires » Ch.H. Eyraud et P. Gagnaire dans CC n° 105 p. 6-9*). Les plus anciens cadrans solaires datent de plus d'un millénaire avant notre ère.

Ce temps, défini par la marche du Soleil, avait l'avantage d'être simple à obtenir, du moins quand il faisait beau. Il ne convenait pas pour toutes les situations. Ainsi, par exemple, pour laisser lors d'un procès le même temps de parole aux deux parties, les Grecs avaient perfectionné les clepsydres, sortes d'horloges à eau, qui fonctionnent comme un sablier dans lequel l'eau remplacerait le sable. Le principe était connu depuis des millénaires, mais les Grecs inventèrent un ingénieux système à flotteur pour assurer la régularité du débit. Sur ce principe, des horloges monumentales furent réalisées, comme celle qu'abritait la Tour des Vents, toujours visible à Athènes [2]. L'horloge était un instrument collectif. Elle le restera longtemps.

L'homme a pensé très tôt à utiliser son corps pour fournir les unités de longueur : le pouce, le pied, la coudée. Il en fut de même pour le temps. Galilée prenait son pouls comme chronomètre de précision. Une bonne mesure demandait une parfaite sérénité !

Cependant, les vrais gardiens du temps étaient les astronomes. Par leurs observations des levers et des couchers du Soleil, de la Lune ou des étoiles, ils pouvaient seuls fournir un temps quasiment absolu, reproductible sur des siècles. Un collègue astronome (P. Teerikorpi) me faisait remarquer que le début de l'observation astronomique fut dominé par l'observation à l'horizon. C'est au sol que l'on pouvait prendre des repères fixes, pour noter par exemple le moment où un astre se levait, ou pour noter les changements par rapport aux jours précédents. C'est ainsi que les Mésopotamiens prirent conscience du déplacement du Soleil par rapport aux étoiles. Ils avaient repéré des étoiles brillantes, la nuit, tout au long d'une année. Ces étoiles n'étaient pas observables en permanence à cause du Soleil. Quand il fait jour, le ciel est si lumineux qu'on ne voit pas les étoiles. Elles sont pourtant bien présentes. Mais elles ne brillent pas assez pour se détacher sur le ciel. Dès que le Soleil se lève, les étoiles disparaissent. Pourtant, un jour, une étoile brillante, qu'on ne voyait pas encore briller le matin, apparaît un peu avant le lever du Soleil. C'est ce qu'on appelle le lever héliaque d'une étoile. De jour en jour, elle gagnera un peu de temps sur le Soleil, en apparaissant un peu plus tôt encore. Quelques semaines plus tard, ce sera au tour d'une autre étoile brillante d'apparaître, et ainsi de suite. Ces dates de levers héliaques jalonnent le temps. Étant basées sur la position du Soleil par rapport au repère fixe des étoiles, elles sont en parfaite concordance avec les saisons.

C'est en effet le point primordial. Un calendrier doit être en accord avec les saisons. Or, en basant le calendrier sur un nombre entier de jours, il se produit une dérive, lente, mais perceptible. Des réajustements étaient nécessaires. Le calendrier julien, mis au point par l'astronome Sosigène et imposé par Jules César, était réajusté tous les quatre ans avec l'introduction d'une année de 366 jours au lieu de 365 jours. C'était une année dite bissextile. La durée moyenne d'une année était ainsi de 365,25 jours (addition moyenne d'un quart de jour par an). Eh bien ! Malgré cela, une dérive fut constatée au bout de quelques siècles. Une nouvelle règle fut mise au point sous les auspices du pape Grégoire XIII. Cette nouvelle règle pour définir les années bissextiles a donné naissance au calendrier grégorien, celui-là même que nous utilisons encore aujourd'hui. La définition des années bissextiles s'est compliquée *(voir «Évocation de l'année bissextile » dans le CC 104 p.22*). Ce calendrier n'est pourtant pas parfait, mais il faudra attendre 10 000 ans pour constater une dérive de quelques jours... Nous avons le temps de voir venir.

Nous comprenons qu'il ne puisse y avoir de calendrier parfait : les cycles fondamentaux (saisons, lunaisons, jours) n'ont pas des durées dans des proportions entières : il n'y a pas un nombre entier de jours dans une révolution de la Terre autour du Soleil, il n'y a pas un nombre entier de jours dans une révolution de la Lune autour de la Terre.

Premières énigmes

Tout au long de ce premier contact avec l'observation, nous avons rencontré plusieurs phénomènes curieux : l'alternance du jour et de la nuit, le retour des saisons chaudes ou froides sous nos latitudes, le changement au cours de l'année de la direction du lever ou du coucher du Soleil, les disparitions momentanées de la Lune, voire même du Soleil, et par-dessus tout, l'incroyable régularité de cette grande mécanique céleste. Saurions-nous expliquer ces phénomènes ?

Dans le prochain chapitre, nous découvrirons l'origine de ces phénomènes dont la compréhension s'est lentement et péniblement élaborée au cours des siècles passés.

Références

[1] Parisot J.-P., Suagher F., Calendriers et chronologie, 1996, Ed. Masson, (ISBN 2 225 852 251): Un livre très complet et très précis sur les multiples calendriers élaborés par les hommes.
[2] Rochat C., « La mesure du temps : du calendrier égyptien à l'horloge atomique » Ed. La compagnie du Livre (ISBN 284 155 046 X). Un livre surtout destiné aux enfants, mais plaisamment illustré.
Nous renvoyons le lecteur également aux ouvrages généraux de P. Couderc (PUF « Que-sais-je » n°203) et aux articles de M. Toulemonde (*« Le calendrier » dans CC n°42 ; « Le calendrier républicain » dans CC n° 45*).

II- Mouvements de la Terre

Résumé : *Dans ce chapitre, nous montrons comment la loi d'inertie de Galilée a jeté les bases d'une compréhension des deux mouvements principaux de la Terre : sa rotation et sa révolution autour du Soleil. Puis nous verrons comment les preuves de ces mouvements ont été données.*
Une expérience simple de visualisation est proposée qui permet de représenter les phénomènes observés.
Mots-clefs : cours - loi - terre - soleil - réalisation

Introduction

On dit que le rire est le propre de l'homme. Je crois qu'il y a une caractéristique encore plus spécifique de l'intelligence humaine ; c'est la curiosité. Quand l'être humain observe un phénomène, il cherche à en comprendre l'origine (ceci n'interdit pas de le faire en s'amusant).

Lors du premier chapitre, nous avons rencontré plusieurs phénomènes que les premiers hommes ont observés : les levers et les couchers du Soleil qui se produisent chaque jour dans une direction un peu différente de la veille, selon un cycle régulier. Le Soleil qui, selon les saisons, monte plus ou moins haut dans le ciel et nous éclaire plus ou moins longtemps. Les étoiles qui se décalent par rapport au Soleil (rappelez-vous les levers héliaques !). Nous allons commencer par analyser ces quelques phénomènes. Je suis sûr que vous aurez envie de les expliquer aux enfants après les avoir compris.

Que manquait-il aux observateurs anciens pour interpréter correctement ces observations, apparemment si simples ? Saurions-nous reconstituer la formidable démarche intellectuelle ?

Forme et dimension de la Terre

C'est par là qu'il faut commencer. Les astronomes grecs avaient imaginé déjà que la Terre était ronde. La contemplation du Soleil ou de la Lune pouvait suggérer que les corps célestes étaient sphériques. Mais les astronomes surent donner quelques bonnes raisons : par exemple, quand la Lune passe dans l'ombre de la Terre, le bord de l'ombre apparaît comme un arc de cercle. L'expérience des marins a dû jouer un rôle important. Il m'est arrivé d'observer un bateau à l'horizon et de ne voir que le haut de sa structure. Si la Terre avait été plate, j'aurais vu tout le bateau.

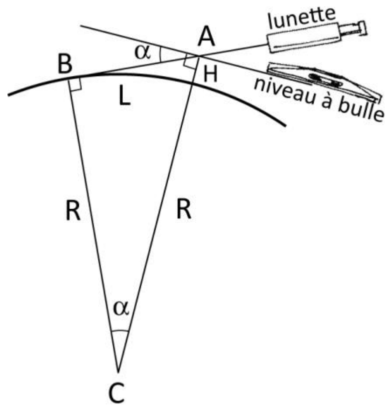
Quel est le rayon de la sphère terrestre ? Pour répondre à cette question demandons-nous à quelle distance de nous se trouve la ligne d'horizon que l'on voit d'une hauteur donnée ? Le petit encadré ci-après vous montre comment faire le calcul et donne une application numérique.

Le rayon de la Terre est d'environ 6 400 km. Les premières déterminations remontent à Ératosthène *(voir « Courrier des lecteurs » dans CC n° 106 p. 39-40, où il en est question).*

La loi d'inertie de Galilée

La Nature obéit à des lois. Ce n'est que très lentement que l'homme en a pris conscience. Ce n'était pas une tâche facile, car Dame Nature semble prendre un malin plaisir à nous faire croire ce qui n'est pas. Ainsi, sur Terre, vous devez produire une force pour déplacer un objet. Par exemple, il faut pousser un chariot pour le faire avancer. Pouvait-on imaginer que cette « loi » soit fausse ? C'était d'une telle évidence que tout homme de bon sens devait être prêt à jurer qu'une force était nécessaire pour entretenir un mouvement. Le physicien, R. Feynman rappelle dans un de ses cours qu'une théorie ancienne disait que les planètes tournaient, parce que « derrière elles il y avait des anges invisibles battant de leurs ailes et poussant les planètes ». Nous allons voir que la réalité est un peu différente.

Encadré 1 : Le rayon *R* de la Terre.
Un calcul simple montre que l'horizon vu depuis une hauteur *H* est à une distance *L,* telle que : $L^2 = 2RH$



$$AB \approx L$$

Théorème de Pythagore dans ABC

$$L^2 + R^2 = (R+H)^2$$
$$L^2 = R^2 + H^2 + 2RH - R^2$$

Or H^2 est très petit devant 2 RH

Donc $$L^2 \approx 2RH$$

L'angle α est mesurable, avec une lunette et un niveau à bulle. Or on a[1] : $L = R\ \alpha$, d'où le rayon de la Terre :

$$R = \frac{2H}{\alpha^2}$$

Dans ces relations α est mesuré en radians (rappel : 180° = π radians). Une expérience, faite à Brest par les élèves de l'École Navale[2], donne α = 0,27° pour H = 75 mètres. L'application numérique conduit à :

$$R = \frac{2 \times 75}{\left(0{,}27 \times (3{,}1416/180)\right)^2} \approx 6\,755\,500\ m$$

Revenons à notre chariot. Si je graisse les moyeux du chariot et si j'aplanis la route, l'expérience montre que la force nécessaire est plus faible[3]. Une loi universelle dépend-elle de la lubrification et de la qualité de la chaussée ? Non pas. Si j'imagine un chariot presque parfait, il pourra après une brève impulsion garder longtemps son mouvement. Un chariot parfait restera perpétuellement en mouvement. Il fallait faire abstraction des frottements inhérents à tous les déplacements habituels pour découvrir cette loi magnifique, la loi d'inertie, qui dit qu'un corps, en l'absence de toute perturbation extérieure, garde son mouvement rectiligne indéfiniment. C'est Galilée qui eut cette perspicacité. Je crois que c'est cette loi qui manquait pour interpréter les mouvements des astres. Les conséquences de cette loi sont immenses. Nous verrons un peu plus loin qu'une force extérieure peut ralentir,

[1] Cette relation est très importante, nous l'utiliserons souvent.
[2] Selon Maillard et Millet, « *Cosmographie* », 1952, (Hachette).
[3] Cette image est emprunté au petit livre admirable écrit par A. Einstein et L. Infeld : « l'évolution des idées en physique »".

accélérer ou dévier un corps en mouvement, mais nous avons déjà compris qu'elle n'est pas nécessaire pour entretenir ce mouvement.

Si la Terre se déplace, tous les objets à sa surface suivent ce même mouvement. Ces objets par rapport à la Terre ne « ressentent » pas le déplacement. Dans son livre « De motu antiquiora », Galilée affirmait que le mouvement est comme rien. Nous ne ressentons pas le mouvement de la Terre. Pourtant sa vitesse est grande. Ne serait-ce que du fait de la rotation de la Terre, nous parcourons à l'équateur un tour (environ 40 000 km) en 24 heures, c'est-à-dire que notre vitesse est de 1 700 km/h environ, deux fois plus grande que celle des avions de lignes à réaction.[4]

Cette loi d'inertie se manifeste tous les jours de notre vie quotidienne. Prenez par exemple le cas d'un voyageur, circulant dans un train à vitesse constante sur une voie rectiligne. Si le voyageur tient ses clefs à la main, il pourrait affirmer : « c'est ma main qui communique la vitesse aux clefs, ce qui explique qu'elles me suivent et restent dans ma main ». Mais Galilée de suggérer : « lâchez vos clefs pour voir ce qui se passe quand votre main cesse d'agir sur les clefs ». Effectivement les clefs tombent aux pieds du voyageur. Elles l'ont accompagné dans son déplacement horizontal à grande vitesse. Mais le voyageur réplique que s'il fait la même expérience en se penchant à la fenêtre, les clefs tombent loin en arrière. Ce à quoi Galilée réplique à son tour (après avoir mis en garde notre voyageur : « e pericoloso sporgersi ») que c'est le frottement de l'air extérieur qui en est la cause. Pour savoir si Galilée avait raison, j'ai fait l'expérience suivante (figure II-1) : à bord d'un ferry, j'avais accès à la poupe. Le bateau avançait à grande vitesse, mais à l'arrière l'air était entraîné, le bateau jouant le rôle de pare-brise. Il n'y avait plus de frottement. J'ai sacrifié une pièce de monnaie en la lâchant du pont supérieur. La pièce est tombée « aux pieds du bateau » (si j'ose dire), quelque vingt mètres plus bas. Galilée avait raison.

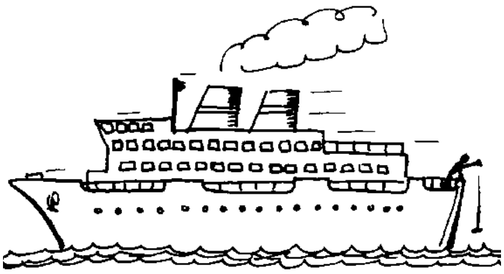


Figure II-1. Vérification de la loi d'inertie à bord d'un ferry. La pièce tombe à la verticale du bateau

Certes la loi d'inertie ne démontre pas que la Terre tourne sur elle-même ou qu'elle tourne autour du Soleil, mais au moins, il n'y a plus d'obstacle à considérer que la Terre puisse se déplacer ou tourner sur elle-même, à notre insu. Nous avons déjà fait un grand pas.

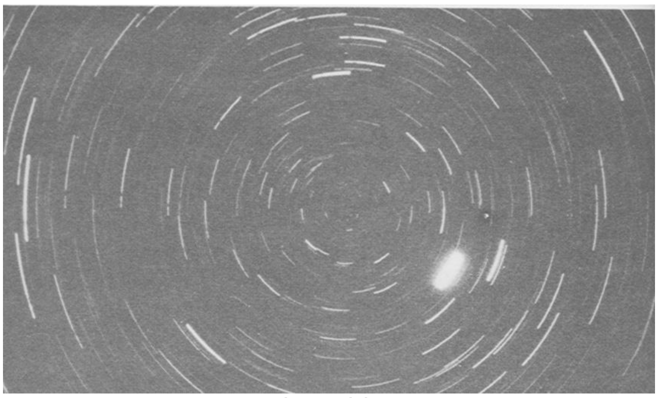
Rotation de la Terre sur elle-même

Nous ne ressentons pas les mouvements uniformes, ou quasi uniformes, comme celui que pourrait engendrer, à sa surface, une rotation de la Terre sur elle-même. Il n'est donc pas facile de mettre en évidence une telle rotation.

Héraclide avait proposé que le mouvement des étoiles au cours d'une nuit (figure II-2) résulte de la rotation de la Terre sur elle-même. Sans cela il fallait considérer que les étoiles lointaines effectuassent un immense cercle autour de nous. Aujourd'hui, sur la base de nos connaissances en physique nous pourrions rejeter cette dernière idée, car les étoiles lointaines devraient se déplacer plus vite que la lumière.

---

[4] Quand on parle de mouvement, c'est toujours dans un référentiel donné. Par exemple, le calcul de la vitesse d'une personne à l'équateur due à la rotation de la Terre est fait dans un référentiel géocentrique, référentiel dont l'origine est le centre de la Terre et dont les trois axes pointent vers des étoiles lointaines qui apparaissent fixes.
Dans un repère topocentrique, lié à l'observateur, la Terre est fixe. Mais dans un tel repère, comment comprendre qu'un satellite géostationnaire puisse rester immobile au-dessus de notre tête ? Certains référentiels sont plus pratiques que d'autres quand on veut expliquer les phénomènes. Les physiciens ont l'habitude d'utiliser des référentiels galiléens, fixes par rapport aux étoiles lointaines, dans lesquels les lois de la physique sont plus simples à écrire. Comme le disait Raymond Poincaré : « Il est plus commode de considérer que la Terre tourne ».



(photo CLEA : école d'été de Grasse 1980)

Figure II-2 : La rotation des étoiles autour d'un pôle céleste (ici le pôle Nord en une heure)

Les observations montrent que la plupart des corps célestes (Soleil, planètes) tournent sur eux-mêmes. La rotation est un phénomène général. Pourquoi la Terre devrait-elle échapper à la règle ?

Plus tard il y eut aussi la mesure de la forme de la Terre. Ces mesures laborieuses, faites par des moyens divers, montrèrent que la Terre n'était pas une sphère parfaite, mais qu'elle était aplatie, comme une rotation pouvait le provoquer. Plusieurs indices furent accumulés : tout d'abord Richer, envoyé à Cayenne entre 1671 et 1673 pour participer à la mesure de la distance Terre-Mars, constata que la période d'oscillation d'un même pendule y était plus grande qu'à Paris. Cette mesure fut interprétée plus tard comme résultant de la plus faible attraction effective à l'équateur (Cayenne est à 5° au nord de l'équateur), résultant de la plus grande distance au centre et de l'accélération centrifuge. Mais surtout, la mesure directe d'un même arc, en Équateur[5], par MM. de la Condamine & Bouguer, et en Laponie, par MM. Maupertuis & Clairaut, montra de manière irréfutable que la Terre est renflée à l'équateur. Ces mesures furent d'une extrême difficulté. Par triangulation géodésique il fallait mesurer une longueur de l'ordre de 330 kilomètres (environ 3 degrés en latitude), avec une précision de l'ordre de quelques mètres. Le rayon de la Terre est de 6 378 km à l'équateur et 6 357 km aux pôles. La Terre a la forme en fait un ellipsoïde.

Il y eut enfin la preuve donnée directement par le pendule de Foucault. Nous ne répéterons pas les explications que nous avions données dans un article précédent *(voir « Le pendule de Foucault » dans CC n° 101, p. 17-21*). Rappelons simplement que quand le pendule oscille librement, par exemple au pôle Nord, nulle force n'agit sur lui pour faire changer sa direction d'oscillation. Pourtant ce plan tourne lentement (figure II-3), preuve que c'est le support (en l'occurrence la Terre) qui tourne. Il a quand même fallu attendre le 19^{e} siècle pour avoir la preuve manifeste de la rotation de la Terre sur elle-même. Mais pourtant elle tourne !

La conclusion est que le mouvement diurne des astres est un mouvement apparent. C'est la Terre qui tourne sur elle-même.

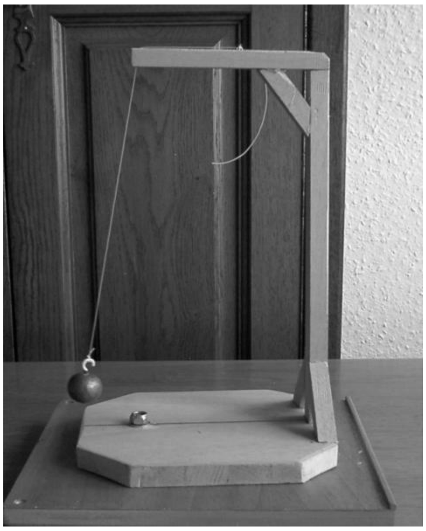


Figure II-3 : Un pendule monté sur une platine tournante permet de comprendre le principe du pendule de Foucault de manière saisissante. Quand la platine tourne, le pendule oscille toujours dans la même direction. Une personne placée sur la platine penserait que c'est le plan d'oscillation qui tourne.

[5] Citons le livre remarquable de Florence Trystram : le procès des étoiles, paru aux éditions Seghers. Ce livre raconte de manière captivante les aventures incroyables des scientifiques de l'expédition de La Condamine & Bouguer en Équateur de 1735 à 1744.

Révolution de la Terre autour du Soleil

Posons-nous donc la question importante : est-ce la Terre qui tourne autour du Soleil ou le Soleil qui tourne autour de la Terre ? Cette question a occupé les hommes pendant plusieurs siècles. Je vais peut-être vous surprendre en donnant de suite la réponse : ce n'est ni l'un ni l'autre ! Comment est-on arrivé à ce résultat surprenant ? Nous l'expliquerons dans le prochain chapitre après avoir parlé de la dynamique de Newton. Pour l'instant nous allons nous borner à expliquer comment on est arrivé à montrer que c'est, approximativement, la Terre qui tourne autour du Soleil.[6]

Aristarque de Samos émit l'idée, 280 ans avant J.-C., que la Terre tournait autour du Soleil *(voir « Aristarque de Samos » P. Lerich dans CC 106 p. 11-13)*. Aristarque affirma même que le Soleil était plus gros que le Péloponnèse, ce qui lui valut l'exil. Il a fallu attendre Copernic (1530) pour retrouver cette belle idée, sans plus de preuves que la simplification de la représentation. Aristote (300 ans av. J.-C.) donnait un argument très scientifique contre l'hypothèse de la révolution de la Terre autour du Soleil : quand un observateur se déplace avec la Terre, il change de point de visée. Les étoiles doivent donc apparaître à des positions différentes : quand vous marchez dans une forêt, les arbres semblent se déplacer les uns par rapport aux autres. On appelle cela un effet de parallaxe. Nous y reviendrons, car c'est un effet que l'on mettra à profit pour obtenir la distance des étoiles. Or les étoiles semblaient toujours à la même place. Aristote ignorait que les étoiles sont si distantes, que l'effet n'est pas mesurable à l'œil nu. Pour l'étoile la plus proche du Soleil (Proxima du Centaure) l'effet est inférieur à 1/4 000 degré. Même aujourd'hui, la mesure n'est pas facile.

La première preuve vint avec Galilée et l'observation des planètes. À l'époque les deux visions s'affrontaient : Terre ou Soleil immobile au centre de l'Univers. Les planètes tournaient-elles autour du Soleil ou de la Terre ? Quand Galilée pointa sa lunette vers Vénus il constata que la planète apparaissait parfois en croissant, comme la Lune. En revanche Mars était toujours complètement éclairé. De plus, Vénus, dite l'étoile du berger parce qu'elle est visible à l'aube ou au crépuscule, ne s'écartait jamais de plus de 46 degrés du Soleil. Tous ces faits s'accordent mieux avec le modèle qui place le Soleil au centre et qui suppose que la Terre tourne autour avec les autres planètes.

Même si tous les astronomes étaient déjà convaincus que la Terre tournait autour du Soleil, une preuve plus formelle vint en 1726. Bradley observa que les étoiles se déplaçaient sur de petites ellipses au cours d'une année. Ces ellipses avaient toutes un demi-grand axe de 0,005 5 degré. Était-ce le phénomène dont l'absence permettait à Aristote d'affirmer que la Terre était immobile ? Est-ce que cela signifiait alors que toutes les étoiles étaient à la même distance de nous, sur une « sphère des fixes » ? Non, le phénomène n'est pas dû à la parallaxe, bien trop faible. Eh puis ! Quand cela serait, faudrait-il ressusciter la sphère des fixes avec ses étoiles toutes à la même distance ? Impensable ! Quelle que soit l'interprétation, on ne pouvait plus imaginer la Terre immobile. Galilée a prouvé que rien n'interdisait que la Terre se meuve, Bradley a prouvé qu'elle se mouvait.

Le nouveau phénomène est ce qu'on appelle *l'aberration de la lumière*. La lumière nous arrive d'une étoile à 300 000 km/s. Si la Terre se déplace, la combinaison des vitesses produit une inclinaison apparente de la direction des rayons lumineux : quand vous courez sous une pluie verticale, vous devez incliner votre parapluie. La faible inclinaison est proportionnelle au rapport des vitesses (voir l'encadré 2).

Encadré 2 : L'aberration de la lumière. La preuve formelle de la révolution de la Terre autour du Soleil.
Quand le déplacement de la Terre est perpendiculaire à la ligne de visée d'une étoile, la composition des vitesses incline la ligne de visée dans le rapport des vitesses. Or, toutes les étoiles connaissent cet effet, preuve que la Terre, dans son déplacement, balaie toutes les directions possibles, c'est-à-dire qu'elle suit une orbite fermée.
Quand la vitesse de la lumière et la distance Terre-Soleil seront connues, les astronomes auront la preuve formelle du mouvement orbital de la Terre autour du Soleil, car la vitesse orbitale (30 km/s) déduite sera en accord parfait avec l'angle d'aberration mesuré :

$$angle = \frac{180}{3{,}1416} \times \frac{30}{300\,000} \approx 0{,}0057\ degrés$$

Plus tard encore, l'observation des petites ellipses de parallaxes, celles qu'aurait aimé voir Aristote, confirma de manière encore plus formelle que c'était bien la Terre qui tournait autour du Soleil.

Visualisation de ces mouvements

Quels effets produisent sur l'observation quotidienne les deux mouvements que nous venons de voir : la rotation de la Terre sur elle-même et sa révolution autour du Soleil ? Nous allons donner un moyen simple pour visualiser ce système compliqué. La Terre tourne d'ouest en est. Donc, un observateur qui considère son propre point de vue voit le ciel tourner autour du même axe, mais en sens contraire (d'est en ouest). Notons que, du fait de

[6] Pour les impatients, expliquons de suite que la Terre et le Soleil tournent autour du centre de gravité commun, situé très près du centre du Soleil. Nous verrons aussi que la définition d'un mouvement ne peut se faire que par rapport à un "référentiel".

l'inertie, cette direction est immuable (du moins en négligeant la précession qui fait décrire un cône à cet axe, en 26 000 ans).
De même, la Terre se déplace autour du Soleil en restant dans un plan qui, par inertie également, demeure immuable dans l'espace. Ce plan est très important. On l'appelle, *l'écliptique.* Donnons un fait d'observation que nous n'avons pas mentionné. L'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique. Il fait un petit angle de 23,5° environ.

Alors, construisons le petit système décrit ci-dessous. Il permettra de comprendre les observations. Prenons un ballon de chimie, rempli à moitié d'eau teintée. Ce ballon matérialisera le ciel, la surface de l'eau sera l'horizon de l'observateur, l'axe du goulot nous donnera l'axe de rotation « du ciel ».

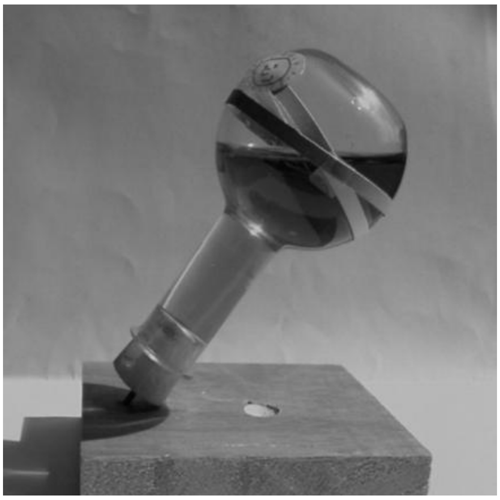


Figure II-5 : Un ballon de chimie pour comprendre le ciel. La surface du ballon représente le ciel. L'horizon de l'observateur est donné par la surface du liquide.

Quand je suis à un pôle, mon horizon est perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre. Pour obtenir cela je dois tenir le ballon verticalement (à l'envers ou à l'endroit). J'en profite pour placer un ruban de papier pour matérialiser l'équateur.
Je place ensuite un ruban (ici un ruban plus clair) pour matérialiser l'écliptique sur lequel le Soleil se déplacera lentement tout au long de l'année. L'angle de ces deux plans est de 23,5°. Remarquons que l'axe du ballon est fixe par rapport à l'écliptique et à l'équateur, comme nous le disions. Inclinons l'axe du ballon à 45° par rapport au plan de l'horizon. On aura ainsi la position qui correspond à la France. Cet angle s'appelle la latitude du lieu considéré. Repérons mentalement par rapport au socle : le nord, le sud, l'est et l'ouest dans le plan horizontal (surface de l'eau). Nous pourrions par exemple les tracer sur la planchette support.
Il ne nous reste plus qu'à prendre une gommette pour matérialiser la position du Soleil, un jour de l'année. Plaçons le Soleil sur un point quelconque de l'écliptique et faisons tourner le ballon autour de son axe, d'est en ouest. Nous verrons le Soleil se lever à l'horizon, à peu près vers l'est, et, après un demi-tour repasser sous l'horizon, à peu près vers l'ouest. Nous pouvons expérimenter plusieurs positions du Soleil. Quand il est aux intersections des deux bandes, il se lève exactement à l'est et se couche exactement à l'ouest. Il décrit le même arc au-dessus et au-dessous de l'horizon. Ce sont les équinoxes ; nuits et jours ont la même durée.
Plaçons le Soleil sur l'une des positions de l'écliptique, la plus écartée possible de l'équateur : sur l'une (celle de la figure 5) nous voyons le Soleil se lever au nord-est, monter très haut sur l'horizon et se coucher au nord-ouest en restant longtemps au-dessus de l'horizon. Les nuits sont courtes. Le Soleil chauffe longtemps et ses rayons sont presque perpendiculaires au sol. Il fait chaud. C'est le solstice d'été. Sur l'autre, diamétralement opposée à la première, nous voyons le Soleil se lever au sud-est, monter peu dans le ciel et se recoucher très vite au sud-ouest. C'est le solstice d'hiver, avec ses nuits longues et son Soleil rasant.

Vous pouvez expérimenter ce qui se passe au pôle Nord par exemple en plaçant le ballon verticalement. Vous verrez que le Soleil reste toujours au-dessus ou au-dessous de l'horizon (confondu avec l'équateur, d'ailleurs). Ce sont les longues nuits ou les journées polaires.
Vous pouvez vous mettre à l'équateur (axe horizontal). Les nuits ont la même durée que les jours, toute l'année. On n'est pas à l'équateur pour rien !
Noter qu'à l'équateur le Soleil se couche en suivant une trajectoire bien perpendiculaire à l'horizon. La nuit y tombe très vite, contrairement à ce qui se passe chez nous. Prenez le temps de jouer au ballon !

Lectures :

Pour en savoir plus, consultez le livre de P. Causeret et L. Sarrazin: « Les saisons et les mouvements de la Terre », aux éditions Belin - Pour la Science. Le livre est magnifiquement illustré et les schémas sont d'une grande clarté.

III-Mécanique des mouvements des astres

Résumé : *Dans ce chapitre, nous montrons comment les lois empiriques qui régissent le mouvement des astres, les lois de Kepler, ont été retrouvées sur la base d'une nouvelle loi, celle de l'attraction universelle, formulée par Newton.*
Mots-clefs : cours - loi – mécanique.

Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons vu comment s'est lentement élaborée la certitude, d'une part que la Terre tournait sur elle-même en un jour, et d'autre part, qu'elle avait un mouvement de révolution de 365,25 jours autour du Soleil. Nous avons saisi l'importance primordiale du principe d'inertie qui permettait de comprendre pourquoi un corps céleste, comme une planète, pouvait se mouvoir librement dans l'espace sans avoir besoin d'une force pour maintenir sa vitesse. Cela n'expliquait pas pourquoi la Terre, par exemple, tournait autour du Soleil ou pourquoi la Lune tournait autour de la Terre. Cela n'expliquait pas non plus quantitativement ces mouvements : les périodes de révolution des planètes étaient-elles reliées à d'autres grandeurs ? Y avait-il dans cette merveilleuse mécanique céleste des lois précises ? C'est ce que nous allons découvrir ensemble dans ce troisième chapitre du cours élémentaire.

Comme nous l'avions dit dans notre introduction générale, nous ne ferons pas de calculs compliqués, mais juste un peu d'arithmétique. Nous rappellerons les deux ou trois connaissances nécessaires dans des encadrés. Nous espérons ainsi que les personnes les plus réfractaires aux mathématiques pourront néanmoins suivre ces calculs et découvrir ainsi, au détour d'une explication, la magie de la compréhension quantitative.

Les données d'observation

Il est très difficile de suivre chronologiquement l'évolution des idées, car à un même instant cohabitent des idées qui ne résisteront pas au couperet de l'expérience et celles qui s'imposeront comme « justes ». Ainsi, pour l'histoire qui nous occupe, la chose est assez flagrante. Kepler (1571-1630), à la suite de Copernic (1473-1543) et grâce aux excellentes mesures de son maître Tycho Brahé, avait élaboré ses trois lois expérimentales, que nous allons étudier. Et pourtant, trois ans après la mort de Kepler dont les lois auraient dû prouver la justesse du système héliocentrique, Galilée (1564-1642), le père de la physique, ce philosophe génial (*voir « Gallilée philosophe » P.Lerich dans CC n°107 p.5-7*), avait dû renoncer publiquement en 1633 au système héliocentrique. La science progresse rarement en ligne droite !

Kepler élabora trois lois sur la base des observations : l**a première,** selon laquelle les planètes décrivaient des ellipses (et non pas des cercles) dans leur mouvement de révolution ; la distance d'une planète au Soleil variait donc au cours de la révolution. **La deuxième**, la loi des aires, qui établissait que la distance de la planète au Soleil balayait toujours la même surface en des temps égaux, et ce pour n'importe quel point de l'orbite ; comme cette distance variait, il s'ensuivait que la vitesse orbitale d'une planète n'était pas constante. Enfin **la troisième loi**, celle qui va nous intéresser plus particulièrement et qui exprime la façon dont la période de révolution, *P*, est liée à la distance maximale, *R*, séparant la planète et le Soleil. Écrivons cette loi mathématiquement :

$$\frac{R^3}{P^2} = constante$$

Nous verrons plus tard que ces lois se retrouvent dans le mouvement de l'électron autour du noyau atomique et, mieux, nous comprendrons pourquoi. Mais n'anticipons pas sur la physique atomique.
Pour aller plus loin, en toute simplicité, nous supposerons que les trajectoires des planètes sont des cercles au lieu d'ellipses. Sans cela, il aurait fallu des développements mathématiques plus fastidieux. De ce fait, nous ne considérerons pas les deux premières lois de Kepler, qui justement posent que les trajectoires ne sont pas des cercles. Rassurez-vous cependant. L'écart à la circularité est très faible.

Et Newton vint…

Newton a compris un peu plus de choses que Galilée (et Kepler), mais il était conscient d'avoir vu plus loin pour être « monté sur les épaules de géant ». Il savait qu'une force n'était pas nécessaire pour entretenir le mouvement, mais qu'elle modifiait le mouvement. Plus précisément, une force fait changer la vitesse. En physique, un changement de vitesse s'appelle une accélération. Si la force s'exerce dans le même sens que la vitesse, la vitesse augmente ; si elle s'exerce dans une direction opposée, la vitesse diminue (on parle encore d'accélération, mais négative). Newton a donc écrit sa loi sous la forme suivante :

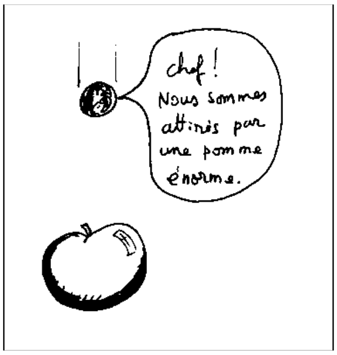
$$F = M.a$$

F est la force[7], *a* est l'accélération (c'est-à-dire le changement de vitesse pendant un intervalle de temps donné), *M* est une constante de proportionnalité qu'on appelle la masse. On sait d'expérience que plus un corps est « lourd » plus l'effort doit être grand pour le mettre en mouvement. Donc *M* sera sans doute proportionnelle au poids. En fait, le poids *P* peut être vu comme une force attirant un corps vers la Terre. La même loi s'écrit ainsi :

$$P = M.g$$

Où *g* est une accélération produite par la Terre. Les forces et les poids se mesurent en une unité qu'on appelle « newton » (N en abrégé), les masses se mesurent en « kilogramme » (kg en abrégé) et les accélérations se mesurent en mètre par seconde et par seconde, puisqu'elles mesurent combien de mètres par seconde un corps va gagner, ou perdre, par seconde.

D'où vient cette accélération *g* produite par la Terre ? Elle doit résulter d'une force entre le corps considéré et la Terre, puisque nous savons que les accélérations sont produites par des forces. Or ce corps peut être un morceau de la Terre elle-même. Si par la pensée je découpe un morceau de Terre de plus en plus gros pour constituer le corps, il arrivera un moment où le corps attiré sera plus gros que la Terre et toujours de même nature. Va-t-il attirer ce qui reste de la Terre ?



Newton a compris que l'attraction était réciproque. Cette idée lui est soi-disant venue en voyant tomber une pomme. La Terre attirait la pomme, mais la pomme attirait la Terre. Cette réciprocité des attractions a été traduite en termes mathématiques.

$$F_{pT} = -F_{Tp}$$

Cette expression signifie que l'attraction de la Terre sur la pomme est de même direction, de même norme que l'attraction de la pomme sur la Terre, mais de sens opposé. Mais comment s'exprime cette force ?
La mesure de cette force (ce qu'on appelle la norme de la force) est :

$$F_{pT} = G \frac{M_T M_P}{d^2}$$

G est une constante de proportionnalité et d la distance qui sépare les deux corps qui s'attirent. Si vous avez lu le Cahier Clairaut n° 105 *(« La balance de Cavendish » p.29-32)*, vous savez qu'il est possible de mesurer *G* avec la balance de Cavendish. La valeur de *G* n'était pas connue à l'époque de Newton. On peut se demander d'ailleurs, pourquoi Newton n'a pas réalisé cette expérience lui-même. La raison tient sans doute au fait que la balance de torsion n'était pas encore inventée. C'est Coulomb qui imagina cet instrument d'une sensibilité extrême et surtout exempt de frottement. Il n'avait pas non plus de cassette « audio » pour constituer le ruban de suspension comme nous l'avons fait.

Cette loi n'a pas été démontrée par Newton. Il l'a proposée et, comme les conséquences qu'il en a tirées s'accordaient avec les observations, la loi s'est trouvée vérifiée. Les astronomes comme Clairaut ont parfois douté de la justesse de cette loi. Mais finalement, la loi s'est révélée juste du moins jusqu'à l'avènement de la théorie de la relativité générale dont nous reparlerons en temps voulu.
Envisageons le cas où le mouvement est circulaire uniforme, centré sur le Soleil, où la force s'applique au corps dans une direction perpendiculaire à sa vitesse. La vitesse ne changera pas de valeur (de module), mais elle changera d'orientation. Pour l'instant nous avons presque ce qu'il nous faut pour interpréter les mouvements.

Force transversale

Nous allons donner une relation très utile, qui va nous permettre de retrouver de manière simple la troisième loi de Kepler. Cette relation exprime, de manière générale, l'accélération que subit une masse en

[7] On comprend intuitivement ce qu'est une force par l'effort que l'on fait. Une force possède les mêmes caractéristiques qu'un objet mathématique que l'on nomme un vecteur : direction, sens et longueur (ou norme). Les vecteurs seront notés en caractères gras.

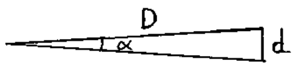
mouvement sous l'effet d'une force transversale (perpendiculaire à la direction de sa vitesse). L'expression de cette accélération est : $a = V^2/R$. La démonstration simplifiée est donnée l'encadré ci-dessous.
Si cette accélération est produite par une masse *M*, qui agit sur *m* par une force de Newton $F = GMm/R^2$, que va-t-il se passer ? Cette force va produire sur *m* une accélération GM/R^2, donc $GM/R^2 = V^2/R$, soit en simplifiant :

$$GM/R = V^2.$$

Si *V* est constant, *R* sera constant puisque *G* et *M* le sont. La masse *m* continuera perpétuellement à tourner autour de M, comme la Terre autour du Soleil, comme la Lune autour de la Terre.
Encore un petit effort et nous y sommes ! Si la masse *m* tourne autour de *M* à la vitesse *V*, le temps pour faire un tour, ce qu'on appelle la période de révolution *P*, est simplement $P=2\pi R/V$. On tire de là que $V^2=4\pi^2R^2/P^2$, qui, reporté dans notre précédente relation, donne :

$$\frac{R^3}{P^2} = \frac{G\,M}{4\,\pi^2}$$

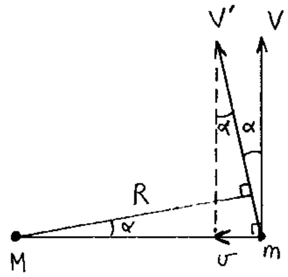
Encadré 1 : Accélération produite par une force transversale modifiant la direction d'un corps en mouvement
Nous allons appliquer une relation déjà signalée comme importante dans le chapitre précédent : $d/D = \alpha$ (en radians) si α est petit.



Imaginons un corps de masse *m* se déplaçant à la vitesse *V* en ligne droite. Faisons agir sur ce corps une force perpendiculaire à la direction de sa vitesse. La vitesse initiale va changer de direction pour devenir *V'*. Une petite composante *v* va donc apparaître, dirigée vers le centre *M*, point de concours des perpendiculaires aux directions de *V* et *V'*. L'accélération prise par *m* en direction de *M* est, par définition de l'accélération : $a = v/t$, t étant le temps supposé très court, pendant lequel l'action a lieu. En considérant le graphique ci-dessous, on voit que $v/V = \alpha$, c'est-à-dire $\alpha = a\,t/V$. Mais *m* se sera déplacé d'une longueur $V\,t$ sur un arc de rayon *R*. Donc $\alpha = V\,t/R$. En égalisant les deux expressions de α on trouve *a* l'accélération cherchée :

$$a = V^2/R.$$

Notons que t peut être choisi aussi petit que l'on veut pour que l'approximation soit correcte, puisqu'il n'intervient pas.



C'est bien la troisième loi de Kepler. Newton est ainsi parvenu, non seulement à retrouver la loi, mais à préciser l'expression de la constante : $GM/4\pi^2$. Certes Newton ne connaissait pas encore la valeur numérique de *G* comme nous l'avons dit plus haut, mais il venait de comprendre que cette constante faisait intervenir la masse du corps attirant (masse du Soleil quand on considère les planètes, ou la masse de la Terre, quand on considère la Lune).

Nous n'avons pas pris en compte le fait que les trajectoires sont des ellipses et que la vitesse le long de ces trajectoires n'est pas rigoureusement constante. Nous verrons dans le prochain chapitre que les conséquences pratiques sont pourtant sensibles.

IV-Les mouvements elliptiques

Résumé : *Dans ce chapitre, nous montrons comment Kepler a trouvé que les orbites des planètes n'étaient pas des cercles parfaits. Il fallait pour ce faire qu'il ait une grande confiance dans la qualité des mesures de son maître, Tycho Brahé. Pour utiliser les mesures originales, nous sommes amenés à définir les systèmes de coordonnées. Nous verrons ainsi que la vitesse de révolution de la Terre autour du Soleil n'est pas constante et que la définition du temps en est affectée.*
Mots-clefs : cours - loi – mécanique

Introduction

Qu'avons-nous appris lors des trois premiers chapitres ? Nous avons compris comment le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même et son mouvement de révolution autour du Soleil pouvaient expliquer l'alternance du jour et de la nuit avec un rapport entre le jour et la nuit dépendant de la saison. Nous avons compris que la saison chaude était due essentiellement à la durée d'ensoleillement et à la hauteur du Soleil par rapport à l'horizon. Nous sommes même allés plus loin ; grâce à Kepler, Galilée et Newton, nous avons été capables de comprendre l'origine de la relation qui lie la distance d'une planète à sa période de révolution. Il est donc possible de prévoir, en principe, la position des différentes planètes dans le ciel. Qu'avons-nous encore à apprendre pour expliquer les mouvements des astres ?

Le progrès, par l'exigence croissante qu'il engendre, nous pousse à approfondir encore nos connaissances. Plus la science progresse, plus le nombre de questions nouvelles augmente, car chaque nouvelle découverte ouvre la porte à de nouvelles interrogations. Nous pourrions nous contenter de ce que nous savons déjà. Cependant les observations méticuleuses de Tycho Brahé révélèrent à Kepler que la trajectoire d'une planète ne pouvait pas se représenter par un cercle. Ce fut une grande surprise pour l'époque, car le cercle était considéré comme une figure géométrique parfaite. Il fallait beaucoup d'audace pour abandonner cette vision. Mais les mesures l'imposaient. Nous allons essayer de nous en convaincre.

Mais avant, nous devons apprendre à mesurer la position des astres. Et pour cela nous devons parler de systèmes de coordonnées ; ensuite seulement nous pourrons revenir aux mesures de Tycho Brahé.

Système de coordonnées

La position d'un astre sur le ciel est définie de manière conventionnelle par ce qu'on appelle un système de coordonnées. Aujourd'hui la chose nous paraît naturelle. Cela n'a pourtant pas toujours été le cas.

Figure IV-1 *: la galaxie Messier31 repérée par la constellation d'Andromède et des Poissons*
(Ismaël Bouillaud, 1667 – reproduction libre inspirée de Introduction à la cosmologie *- Jean Heidmann, PUF, 1973)*

Les astronomes utilisaient les constellations, figures construites en réunissant les étoiles, par la pensée, pour constituer une forme imaginaire. Une histoire mythologique greffée sur ces formes donne une pauvre justification, mais un bon moyen mnémotechnique. Nous aurons l'occasion d'y revenir quand nous parlerons d'observation. La grande galaxie d'Andromède, Messier 31, était ainsi définie comme l'objet flou situé sous le bras d'Andromède, d'où son nom (figure IV-1).

Mais pour désigner un astre sans ambiguïté, il fallait une définition plus précise. Les planètes, objets errants comme l'étymologie nous le dit, ne sont jamais à la même place ; il fallait bien avoir recours à un moyen rationnel de repérage.

Les astres semblent piqués, tous à la même distance, sur la sphère céleste. Leur direction nous suffira pour définir leur position. Il s'agit donc de repérer un point sur une surface. De même que sur une feuille de papier (figure IV-2) il faut deux grandeurs (les deux coordonnées) pour trouver un point quelconque de la feuille, il nous faut deux coordonnées pour trouver un point quelconque de la sphère céleste. Sur une feuille de papier, on peut mesurer la position d'un point, par sa distance au bord gauche et sa distance au bas de la feuille.

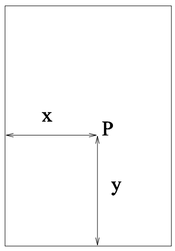


Figure IV-2 : *Repérage sur une surface : deux coordonnées, par exemple x et y, suffisent.*

Comment faire sur la sphère céleste ? C'est un peu plus compliqué (figure IV-3). Il faut d'abord se donner un plan de référence qui définit un grand cercle sur la sphère dont l'observateur occupe le centre. Nous pourrons mesurer l'angle entre le plan de référence et la direction de l'astre. On peut par exemple mesurer l'angle de 0 à +90° pour les points au-dessus du plan et de 0 à -90° pour les points au-dessous. Mais que signifie « au-dessus » ou « au-dessous ». Nous devons le définir en adoptant une convention. Nous définirons, selon la nature du plan, un nord, ou un zénith, enfin toute appellation qui définira un « au-dessus ». Dans ce qui suit, nous lui donnerons, le terme générique de direction du **pôle Nord**. De même, l'angle entre le plan de référence et la direction de l'astre sera désigné par **latitude**. Malheureusement, cela ne suffit pas encore. En effet, à une latitude donnée nous n'avons pas un seul point, mais une infinité de points formant un « petit » cercle, de même que sur une feuille de papier, à une distance donnée du bas de la feuille il y a une infinité de points.

Une façon de lever cette dernière ambiguïté est de définir précisément le point sur le petit cercle en comptant depuis une origine choisie arbitrairement. Mais le petit cercle n'est pas le même pour tous les astres. Cette difficulté est facilement levée si nous définissons un demi-plan origine, perpendiculaire au premier, passant par l'observateur et contenant l'astre à mesurer. Il nous suffit donc de mesurer la direction de ce demi-plan (de 0 à 360°) par rapport à l'un de ces demi-plans, arbitrairement choisi comme origine. Dans la suite, nous désignerons cet angle par le terme générique de **longitude.** Il est facile de voir que la définition du demi-plan origine peut se faire simplement en choisissant une direction origine dans le plan de référence, à partir de la position de l'observateur. Est-ce tout ce dont nous avons besoin pour définir un système de coordonnées ? Non. Nous devons encore définir le sens dans lequel nous compterons cette longitude**.** Ce dernier choix aurait pu être évité si nous avions adopté une convention disant par exemple que le sens de la longitude était défini à partir de la direction "dessus" du plan de référence (règle par exemple du bonhomme d'Ampère). Mais cette convention n'a pas été adoptée, car les systèmes de coordonnées ont été définis empiriquement sur des habitudes anciennes.

En résumé, définir un système de coordonnées revient à définir trois choses pour l'observateur : une direction du pôle Nord (cette position définira le plan de référence), une direction origine dans ce plan et un sens des angles par rapport à cette origine.

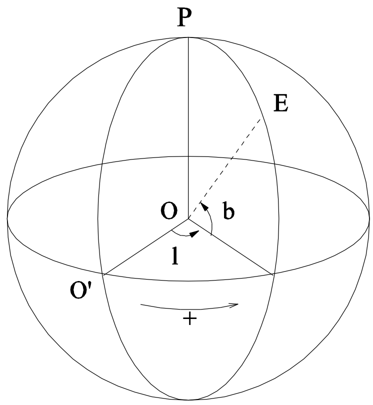


Figure IV-3 : *Les éléments définissant un système de coordonnées sur la sphère céleste*

Vous pensez sans doute que ce que nous venons de définir est la seule méthode possible. Sans doute c'est la méthode la plus logique. Pourtant certains astronomes ont utilisé une autre façon de repérer les astres sur le ciel.

Les différents systèmes de coordonnées

Il existe différents systèmes de coordonnées adaptés aux différentes études envisagées. Par exemple on peut définir les **coordonnées horizontales** à partir du plan de l'horizon de l'observateur et de la direction du sud, comme origine des longitudes (figure IV-3). Pourrait-on construire un catalogue dont les étoiles seraient repérées dans un tel système de coordonnées ? Évidemment non, car, les coordonnées ne seraient valables que pour ce lieu et pour l'instant d'observation.

Comment faire pour qu'un astre ait des coordonnées invariables, propres à être enregistrées dans un catalogue ? Tout d'abord, le plan de référence doit être lié à la Terre et être le même pour tous les observateurs : le plan de l'équateur terrestre remplit bien cette fonction. Il est unique et connu : c'est un plan perpendiculaire à la direction du pôle Nord, à peu près matérialisé par la direction de l'étoile Polaire. Maintenant, comment choisir l'origine des longitudes pour les rendre indépendantes du temps ? Cette direction doit, par définition, être dans le plan de l'équateur. Y a-t-il une direction remarquable ? Eh bien oui ! L'intersection du plan équatorial et du plan de l'écliptique définit une droite qui est fixe par rapport aux étoiles puisque les deux plans sont fixes[8] .

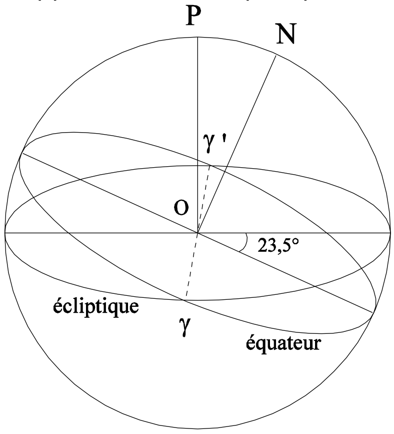


Figure IV-4 : *Intersection écliptique, équateur*

À partir de la position de l'observateur, cette droite définit deux directions (voir figure IV-4) : l'une 0γ' est dans la direction occupée par le Soleil lors de l'équinoxe d'automne, l'autre, 0γ, est la direction occupée par le Soleil à l'équinoxe de printemps. Nous avons déjà rencontré ces directions dans le deuxième chapitre. Laquelle de ces deux directions choisir comme origine des longitudes ? Par convention c'est la direction 0γ qui a été choisie. Comme 0γ est à la fois dans le plan de l'équateur et dans le plan de l'écliptique, cette direction nous servira d'origine pour les **coordonnées équatoriales** et également pour les **coordonnées écliptiques**. Dans le cas des coordonnées équatoriales, les « longitudes » s'appellent les **ascensions droites** et les « latitudes » les **déclinaisons**. Pour les coordonnées écliptiques, on parle tout simplement de longitudes et latitudes écliptiques. Dans ces deux systèmes, le « dessus » du plan de référence est donné par le pôle Nord terrestre. Les longitudes écliptiques et les ascensions droites sont toutes deux comptées dans le sens direct vues du pôle Nord [à préciser, car vu du pôle sud, c'est le sens indirect], le sens contraire des aiguilles d'une montre. Nous aurons l'occasion de revenir sur les coordonnées équatoriales dont l'utilisation est fondamentale pour le pointage des instruments d'observation.

Le point γ, origine des longitudes, est situé dans la constellation des Poissons, mais cette information ne suffit pas pour trouver sa position précisément, car il n'y a pas d'étoile dans cette direction. Dommage ! Ce point tourne en même temps que les étoiles, du fait de la rotation de la Terre. Vous allez sans doute dire que ce point décrit donc un tour en vingt-quatre heures de nos montres ? Je suis désolé de vous décevoir, mais ce n'est pas tout à fait exact. Et nous allons préciser cette nouvelle notion, très importante.

Temps solaire et temps sidéral

Nous définissons le temps à partir de la rotation de la Terre[9]. Comment fait-on ? Visons le Soleil, dans une direction donnée, en prenant un repère terrestre (par exemple avec les coordonnées horizontales). Du fait de la rotation de la Terre, le Soleil ne restera pas dans cette direction. Après une journée nous le retrouverons dans la même direction. Nous décrèterons qu'il s'est écoulé 24 heures « solaires » (basées sur le Soleil).

[8] Toutefois, signalons qu'il y a un petit mouvement de N autour de P. C'est un mouvement de précession. Il en résulte que le point γ, qui sert d'origine, fait un tour de l'écliptique, dans le sens rétrograde, en... 26 000 ans (!). Ce qui est remarquable c'est que ce mouvement ait été découvert par Hipparque en l'an -128. Nous négligerons ce phénomène qui oblige à recalculer les coordonnées périodiquement (par exemple, tous les 50 ans).

[9] Ce n'est plus le cas aujourd'hui, car nos horloges atomiques sont plus régulières que ne l'est la rotation de la Terre.

Si au lieu de choisir le Soleil, nous avions fait la même chose avec une étoile autre que le Soleil, nous aurions défini 24 heures « sidérales » (basées sur une étoile). Ces 24 heures sidérales sont-elles égales aux 24 heures solaires ? La réponse est non, car pendant la mesure, la Terre a tourné autour du Soleil (figure IV-5) ; la direction initiale, repérée dans mes coordonnées horizontales aura changé, dans un repère attaché au Soleil (coordonnées écliptiques). La chose est facile à comprendre en examinant la figure ci-dessous.

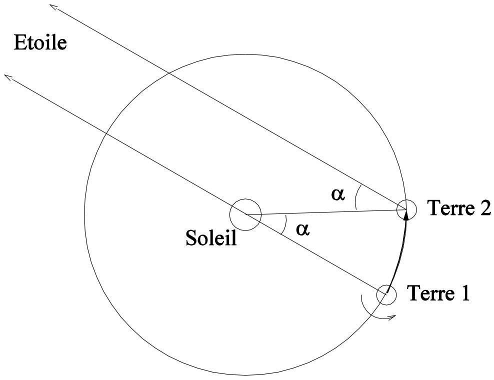


Figure IV-5 : *Relation entre temps sidéral et temps universel. Pour juger que la Terre a effectué un tour sur elle-même, il faut prendre une direction de référence (Soleil ou étoile). La durée dépend de ce choix à cause de sa révolution autour du Soleil*.

En une révolution complète (c'est-à-dire 365,25 jours) le temps solaire aura perdu un tour (24 heures) sur le temps sidéral. Le temps sidéral avance plus vite de 24/365,25 = 0,065 7 heure par jour, soit 3 min 56 s. Le point γ qui, redisons-le, est notre origine des longitudes écliptiques ou équatoriales fait un tour en 24 heures de temps sidéral. La position du point γ donne le temps sidéral. Inversement, une horloge donnant le temps sidéral nous permet à tout moment de connaître la position du point γ dans le ciel. Si vous visitez un observatoire traditionnel, vous y verrez deux horloges, aucune ne donne l'heure de votre montre : la première horloge donne le temps universel (temps solaire moyen à Greenwich) ; la deuxième donne le temps sidéral. Notez bien le mot « moyen ». Il cache une petite complication que nous ne tarderons pas à comprendre.

Nous avons tous les éléments nécessaires à la poursuite de notre étude des mouvements. Revenons donc à notre histoire, à Tycho Brahé et à Kepler.

Les mesures de Tycho Brahé

Tycho Brahé avait accumulé les observations de la planète Mars. Il avait ainsi les positions très précises à la minute d'angle près sur un laps de temps d'au moins dix ans. C'était un travail remarquable. Réussir à mesurer un angle d'un soixantième de degré n'est pas chose facile. Pour vous en convaincre, regardez votre rapporteur. Les plus petites divisions sont de un degré (parfois un demi-degré). C'est déjà très petit.

Tycho Brahé n'exploita pas ses données. Il les garda même jalousement sans les faire partager à son jeune et génial collègue Kepler. Peut-être avait-il compris quelle révolution se cachait dans ses données. Quand il mourut, Kepler hérita de ce trésor qu'il sut magnifiquement exploiter. C'est l'extrême confiance en la qualité des mesures de son maître qui permit à Kepler de se convaincre qu'il y avait quelque chose de nouveau. Comment procéda-t-il ?
Tycho Brahé avait enregistré les longitudes écliptiques de Mars. Le choix de coordonnées écliptiques était très naturel. En effet les planètes sont toutes très proches de ce plan. On peut dessiner sur une même feuille de papier, la trajectoire de la Terre, et la trajectoire de Mars, Le Soleil occupant le centre (puisque nous faisons, avec Kepler, l'hypothèse que le système du monde est héliocentrique).

Parmi toutes les mesures de Tycho Brahé, Kepler a pu trouver des paires de mesures faites à 687 jours d'intervalle. Pourquoi donc ? Depuis la Terre, on peut observer Mars et voir quand la planète revient à la même position par rapport aux étoiles. Mars est-elle donc revenue au même point de l'espace ? Non, car la Terre, n'étant plus à la même place, le point de vue a changé. Entre ces deux observations, il s'est écoulé un temps *S,* qu'on appelle la période **synodique**. Pour Mars cette période est de 780 jours. Comment trouver la vraie période, celle que nous mesurerions depuis une étoile extérieure et que l'on appelle pour cette raison, la période **sidérale** *P*. Le calcul n'est pas difficile. Nous avons déjà expliqué (*voir encadré dans CC n° 105 p. 26*) comment déterminer la période sidérale à partir de la période synodique, dans le cas d'une planète intérieure (planète plus proche du Soleil que ne l'est la Terre). Le calcul est assez semblable. Amusez-vous à le refaire et vous trouverez que :

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{365{,}25} - \frac{1}{S}$$

Avec S = 780 jours, vous trouverez que Mars revient exactement au même point de sa trajectoire après un temps $P = 687$ jours. Ce genre de calcul était familier à Kepler. C'est ce qui explique qu'il ait constitué des paires de mesures avec cet intervalle de temps. Nous reproduisons les mesures utilisées par Kepler[10].

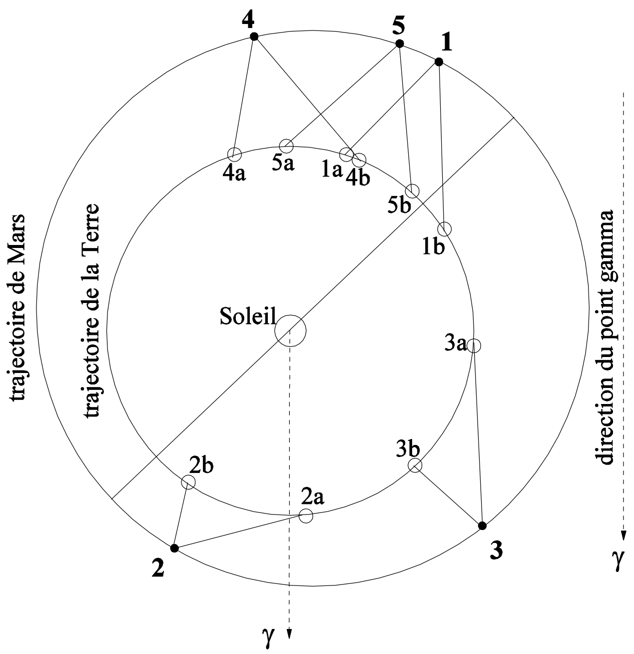


Figure IV-6 : *La construction de Kepler avec des paires de points.*

Tableau : *Longitudes écliptiques du Soleil et de Mars utilisées par Kepler.*

	date	L_{Soleil} (degrés)	l_{Mars} (degrés)
1a	17 fév. 1585	339,38	135,20
1b	05 jan. 1587	295,35	182,13
2a	19 sep. 1591	185,78	284,30
2b	06 aou.1593	143,43	346,93
3a	07 déc. 1593	265,88	3,07
3b	25 oct. 1595	221,70	49,70
4a	28 mar. 1587	16,83	168,20
4b	12 fév. 1589	333,70	218,80
5a	10 mar. 1585	359,68	131,80
5b	26 jan. 1587	316,10	184,70

Vous voyez sur la figure IV-6 que par ces observations Kepler a pu donner la position de Mars pour chacune des paires de mesures, en supposant la Terre se déplaçant régulièrement sur une orbite circulaire (ce qui est une bonne approximation, mais Kepler avait pu aussi tracer la forme de l'orbite terrestre). Avec la date on peut placer la Terre aux emplacements exacts sur son orbite autour du Soleil. Regardez, par exemple, le point 5a. Il correspond au 10 mars 1585, une dizaine de jours avant l'équinoxe de printemps. Vu depuis 5a le Soleil est presque dans la direction du point γ. La direction du Soleil vue depuis le point 2a (19 septembre) nous donne presque la direction du point γ '. En construisant les cinq positions de Mars pour les cinq paires de mesures, Kepler a vu que le Soleil n'était pas au centre de la trajectoire de Mars. L'excentricité (écart entre le centre réel et la position du Soleil, rapporté à la mesure du rayon maximal) est de 0,09, presque dix fois celle de la Terre. C'est ainsi que Kepler a pu faire l'hypothèse que la trajectoire de Mars était bien représentée par une ellipse. Il a constaté aussi que la vitesse de déplacement des planètes n'était pas constante. Quand la planète est loin du Soleil, sa vitesse est plus faible. Mais alors, me direz-vous, c'est aussi vrai pour la Terre et le temps, mesuré par la position du Soleil, va être affecté d'une variation traduisant les changements réguliers de vitesse de la Terre sur son orbite. Examinons cette question qui a un effet direct sur la mesure précise du temps.

[10] Mesures rassemblées par l'astronome O. Gingerich

L'équation du temps

Nous venons de comprendre que le mouvement apparent du Soleil n'est pas uniforme tout au long de l'année, car la Terre ne se déplace pas sur un cercle à une vitesse bien uniforme. On peut définir un **Soleil moyen** qui lui, aurait un mouvement uniforme. En hiver, les jours solaires vrais sont plus longs que les jours solaires moyens. En effet, le Soleil vrai avançant plus vite sur l'écliptique, il faut plus de temps pour que la rotation de la Terre sur elle-même nous fasse retrouver le Soleil au méridien[11].
L'été ce serait l'inverse. Le temps apparent devrait fluctuer par rapport au temps vrai selon une belle sinusoïde[12], bien symétrique (courbe en tirets sur la figure IV-8). Je dis « devrait »", car en fait un autre phénomène, aussi important, se superpose à celui-ci. Expliquons-le.

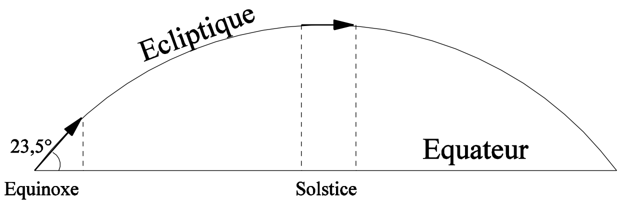


Figure IV-7 : *Effet de projection de la vitesse orbitale du Soleil sur l'équateur.*

C'est la rotation de la Terre sur elle-même qui fixe la durée de 24 heures. On gradue les heures sur l'équateur alors que tout au long de l'année le Soleil se déplace sur l'écliptique qui fait un angle de 23,5° avec l'équateur. Aux solstices (juin et décembre) le déplacement du Soleil sur l'écliptique est parallèle à l'équateur (revoir le ballon du deuxième chapitre). Aux équinoxes (mars et septembre) le mouvement apparent du Soleil est incliné de 23,5° sur l'équateur. Le déplacement apparent, étant la projection sur l'équateur, il sera variable (figure IV-7). Cet effet de projection produit un décalage lui aussi bien représenté par une sinusoïde (courbe en pointillés sur la figure IV-8), avec des maxima en mars et septembre (aux équinoxes) et des minima en juin et décembre (aux solstices). La fréquence de cette deuxième courbe est donc double de la première puisque deux fois par an l'effet de projection est le même.

La variation globale dont nous parlons peut paraître faible. Elle est de l'ordre de 15 minutes en plus ou en moins du temps moyen. Mais 15 minutes de temps correspondent à une erreur d'angle de 3,75 degrés. Vous voyez que ce n'est pas du tout négligeable quand on se pique de faire des mesures à la minute d'arc près.

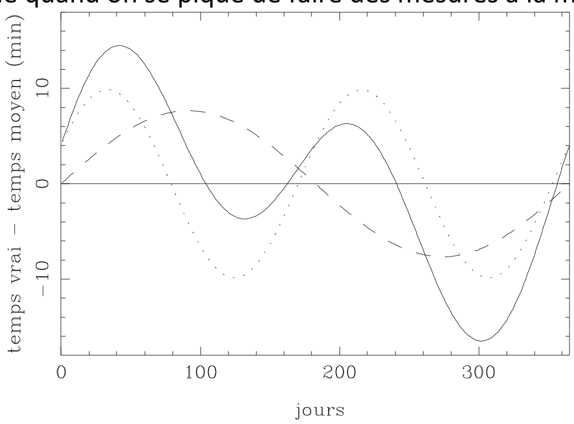


Figure IV-8 : *l'équation du temps résulte de la superposition de deux phénomènes approximativement sinusoïdaux : la variation de la vitesse orbitale de la Terre et l'effet de la projection de cette vitesse sur l'équateur.*

Donnons les équations approximatives des deux sinusoïdes qui composent l'équation du temps.
Pour l'effet de la variation de vitesse de la course apparente du Soleil on a l'écart :

$$\Delta t_1 = 7{,}66 \sin (0{,}017\,2\, j)$$

où j est le numéro du jour de l'année et où l'écart est donné en minute de temps. En réalité il faudrait compter depuis le 3 janvier, car c'est le 3 janvier que la Terre passe à son périhélie.
Pour l'effet de projection, l'écart est (en minute de temps) :

$$\Delta t_2 = -\,9{,}86 \sin (0{,}034\,4\, j - 2{,}714\,4)$$

Les variations globales entre le temps vrai et le temps moyen sont données par : $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$, c'est ce qu'on appelle l'équation du temps.

---

[11] NDLR : la Terre étant au plus près du Soleil le 4 janvier, sa vitesse de révolution est plus importante à cette époque.
[12] La loi de variation est un peu plus compliquée, mais en première approximation il s'agit effectivement d'une loi sinusoïdale.

Pour conclure avec les orbites elliptiques, nous donnons, dans l'encadré ci-dessous, les éléments qui permettent de définir complètement la trajectoire d'un astre par rapport à un plan de référence. Ceci s'applique à la définition de la trajectoire d'une planète par rapport à l'écliptique.
Quand ces éléments sont connus, il est possible de calculer la position de l'astre, à tout instant du jour et de la nuit. Nous verrons dans les pages qui suivent l'intérêt de la chose à propos du transit de Vénus.

Les éléments d'une orbite elliptique

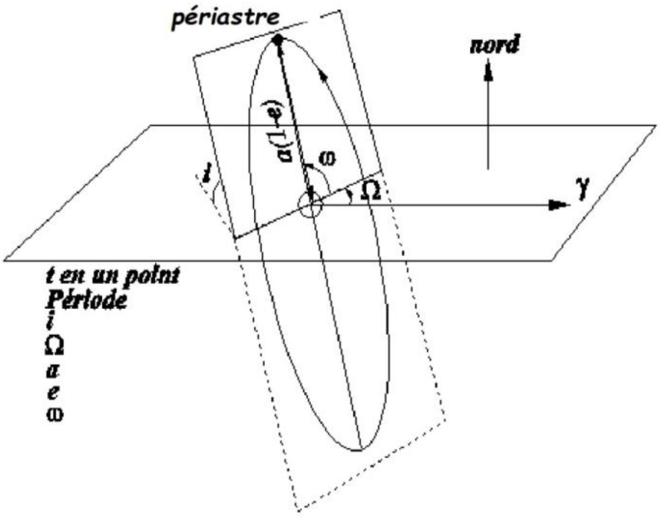
Quel est le nombre minimum de paramètres nécessaires pour définir parfaitement une trajectoire elliptique ? Avant de considérer le cas général, commençons par celui d'une trajectoire circulaire simple. La réponse est assez intuitive. Il faut définir le plan de la trajectoire, son centre, son rayon, la période de révolution et le temps de passage en un certain point quelconque de la trajectoire. Donc, une orbite circulaire est définie par cinq éléments.

Dans le cas d'une orbite elliptique, le rayon est remplacé par le demi-grand axe, le centre est remplacé par un foyer de l'ellipse. Mais il faut définir deux éléments supplémentaires : l'aplatissement de l'ellipse (par exemple le rapport de son demi-grand axe à son demi-petit axe) et la direction de son périastre. Notons que la direction de son grand axe n'est pas équivalente à la direction du périastre, car il resterait l'indétermination du choix d'un des deux foyers de l'ellipse. Au total sept éléments sont donc nécessaires. Différents choix sont possibles. Par exemple au lieu de définir l'aplatissement de l'ellipse *b/a* on peut définir son excentricité *e.* On rappelle en effet que

$$(b/a)^2 = 1 - e^2$$

Pour les orbites d'une planète, on choisit conventionnellement les sept éléments suivants :

a *Le demi-grand axe (par exemple en unité astronomique) ;*
b *Le demi petit axe ;*
e *L'excentricité, distance entre le centre et un foyer, divisés par le demi-grand axe ;*
i *L'inclinaison entre le plan de l'écliptique et le plan de la planète considérée ;*
Ω *Longitude écliptique du nœud ascendant (la direction du nœud ascendant est la direction définie sur la droite d'intersection du plan de l'écliptique et du plan de l'orbite de la planète, dans la direction où la planète passe de l'hémisphère écliptique sud à celui du nord) ;*
ω *L'angle entre la direction du nœud ascendant et la direction du périastre. Cet angle est mesuré dans le plan de l'orbite de la planète et est compté positivement dans le sens du mouvement ;*
T *Temps de passage au périhélie ;*
P *Période sidérale de révolution.*



V- 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 temps[13] .

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 reculeriez 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.

---

[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)**

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.

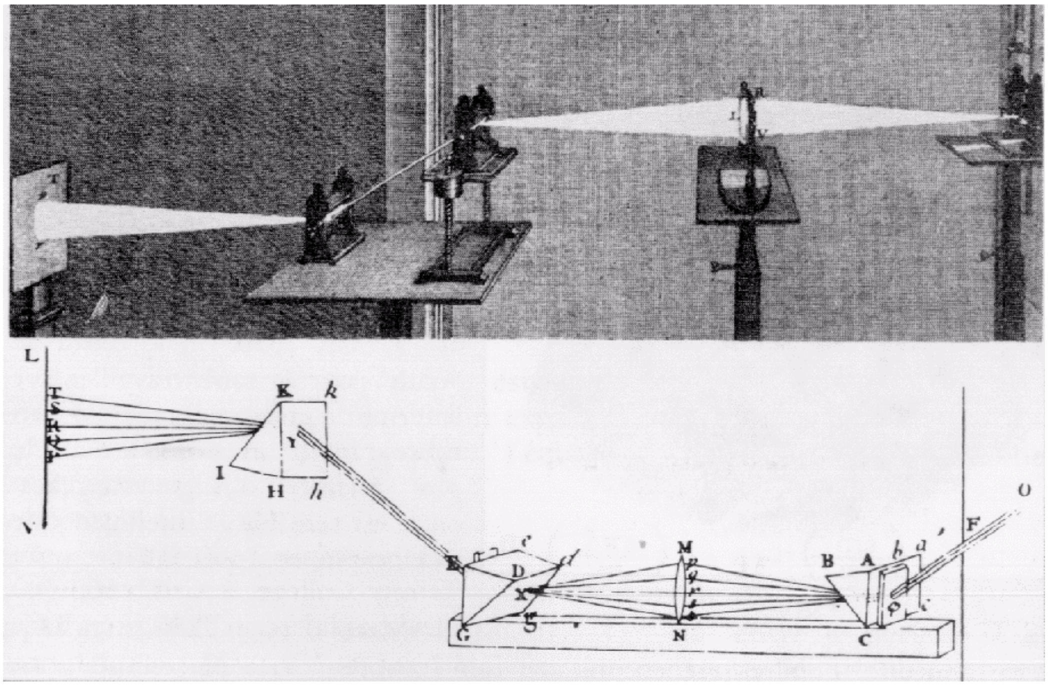


Figure VI-1 *: Décomposition et recomposition de la lumière par l'expérience de Newton.*

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 coloriés 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.

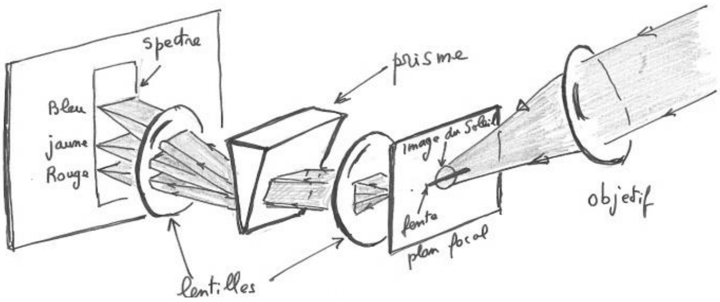


Figure VI-2 *: Spectroscope à fente*

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.

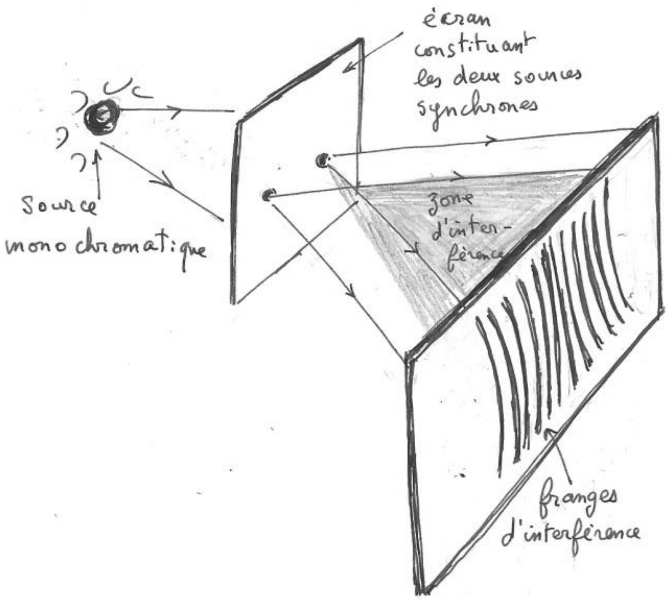


Figure VI-3 : *Les interférences prouvent qu'à la lumière peut être associée une onde.*

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 onde[14] 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 $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$, 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 Kirchoff.

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

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

infinie, ce qui n'était pas raisonnable. C'était un échec complet des lois du rayonnement. Une catastrophe, surtout dans l'ultraviolet.

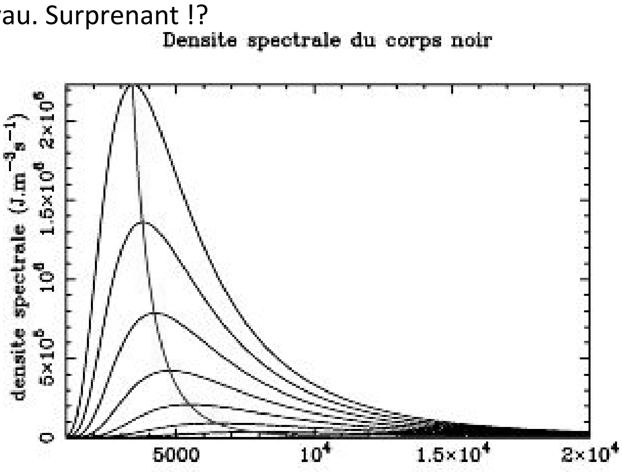
Le physicien Max Planck fit une hypothèse hardie. Il postula que les échanges d'énergie lors d'un rayonnement à la fréquence ν (rappelons que la fréquence est reliée à la longueur d'onde par la relation $\nu = c/\lambda$, où c est la vitesse de la lumière) ne pouvaient se faire que par *quantités finies 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 :

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

Où λ_{maxi} est la longueur d'onde du maximum exprimée en mètre et T est la température en kelvin[15]. 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 !?



Longueur d'onde (angstrom)

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 :

$$F = \frac{1}{4\,\pi\varepsilon_0}\,\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

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.

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

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.

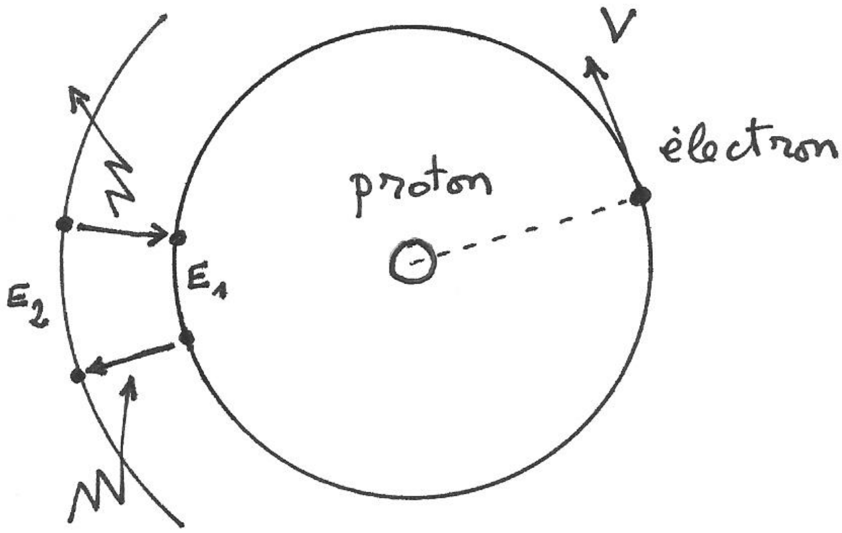
S'attaquer à ce problème devait être totalement décourageant. Pourtant, il devait bien y avoir une logique sous cette complexité. La force de Niels Bohr fut de s'attaquer au spectre du corps le plus simple : l'hydrogène. Il réussit à retrouver la relation empirique rencontrée lors du chapitre précédent :

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

où *n* et *p* sont des nombres entiers (satisfaisant à la condition $n < p$) et λ la longueur d'onde de la raie (*n,p*). Quant à *R, c'*est une constante empiriquement mesurée par Rydberg comme valant R = 0,010 967 8 pour des longueurs d'onde mesurées en nanomètres (nm)[16].
Le décor est planté. Nous allons refaire le calcul de Bohr. Je vous rassure, il n'y a que de l'arithmétique élémentaire, même si c'est un peu long. C'est ce que nous allons voir tout d'abord.

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 :

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2}$$

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

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

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

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 :

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

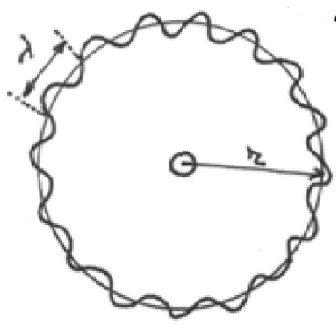
Jusqu'à présent il n'y a rien de nouveau. Mais Bohr va introduire maintenant l'hypothèse de Planck, du quantum d'action *h*. Il va écrire que le produit *m.V.r* ne peut prendre qu'un nombre entier (n) de fois la valeur de $h/2\pi$. C'est-à-dire :

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

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.



$2\pi\, r = n\,\lambda$

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 :

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

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 :

$$E_T = E_C + E_P = -\frac{e^2}{8\,\pi\,\varepsilon_0\,r}$$

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

$$E\,(niveau\;n) = -\frac{m\,e^4}{32\,\pi^2 {\varepsilon_0}^2\,h^2}\,\frac{1}{n^2}$$

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 :

$$\Delta E = -\frac{m\,e^4}{32\,\pi^2 {\varepsilon_0}^2\,h^2}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2}\right) = \frac{h\,c}{\lambda}$$

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

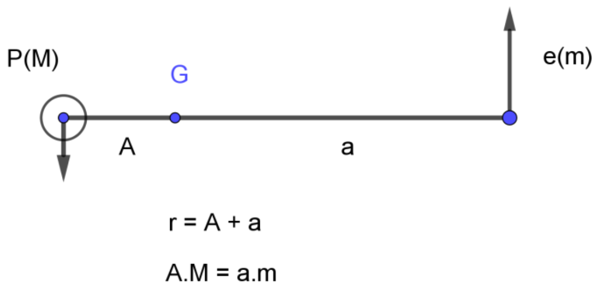
$$R = \frac{m\,e^4}{8\,{\varepsilon_0}^2\,h^3\,c}$$

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 :
$m = 9{,}109\,56\;10^{-31}\,kg$
$e = 1{,}602\,2\;10^{-19}\,C$
$\varepsilon_0 = 1/36\,\pi\;10^{-9} = 8{,}841\,94\;10^{-12}\,C^2\,m^{-2}\,N^{-1}$
$h = 6{,}626\,20\;10^{-34}\,J.s^{-1}$
$c = 2.997\,924\,58\;10^8\,m\,s^{-1}$

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 m^{-1}, les longueurs d'onde étant exprimées en mètre. Si nous les exprimons en nm, nous obtenons *R* = 0,011 004 3 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 hydrogénoïdes

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 hydrogénoïdes.

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 :

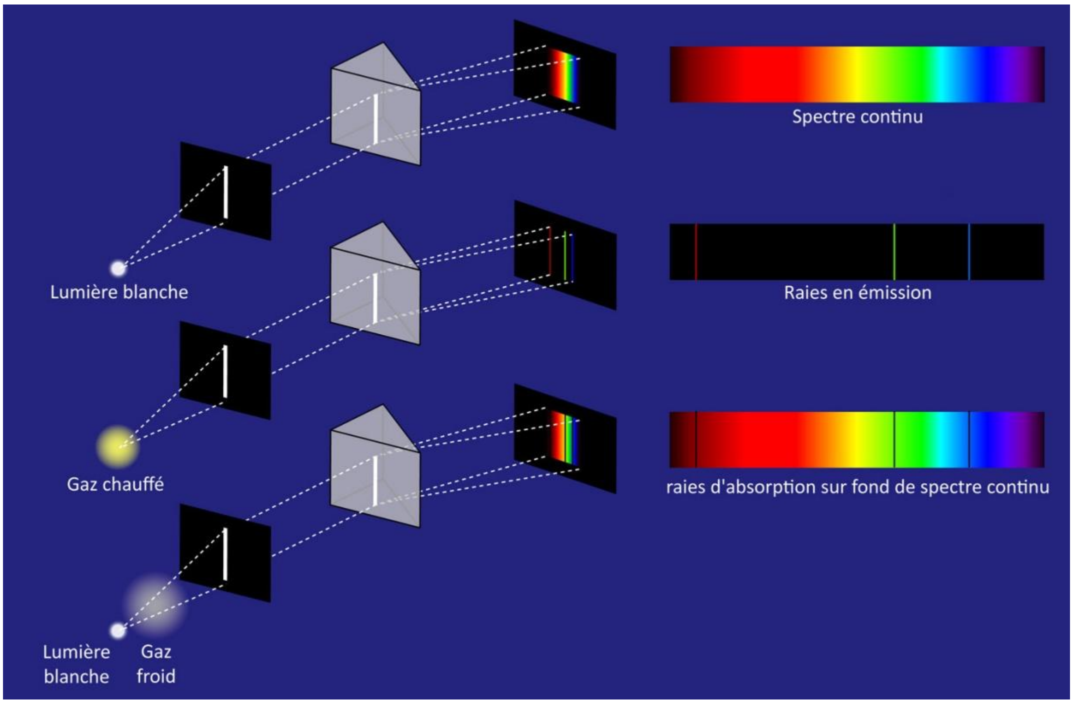
$$\lambda = \frac{h\,c}{\Delta\,E}$$

(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 !



VIII- Les étoiles mystérieuses.

Résumé : *Ce n'est que vers les années 1930, que l'on a compris d'où les étoiles tiraient leur énergie. Nous essayons de comprendre la démarche qui a conduit les astronomes à penser que seule l'énergie nucléaire pouvait expliquer le rayonnement des étoiles.*

Introduction

Lors du chapitre précédent, chapitre assez difficile si vous vous souvenez bien, nous avons montré comment les physiciens et les astronomes ont pu comprendre quantitativement les spectres stellaires.
Ces spectres portent une information extraordinaire sur la composition des astres et sur leurs mouvements. Mais un problème crucial se pose encore : d'où les étoiles tirent-elles leur énergie ?

Petit rappel sur les unités et sur les notations
Une puissance est une énergie par unité de temps. Une puissance est donc mesurée en joule par seconde. On appelle cette unité le watt. Une étoile envoie de l'énergie. En une seconde une étoile envoie une certaine quantité d'énergie dans toutes les directions. On dit qu'elle rayonne une certaine puissance. C'est sa luminosité.
Nous aurons à manipuler des nombres très grands. Nous les noterons avec les puissances de dix, comme nous l'avons fait souvent. 3×10^{26} signifie 3 suivi de 26 zéros. On a ainsi, par ex. : $(3 \times 10^{10})\ (2 \times 10^{12}) = 6 \times 10^{22}$

Les savants avaient compris que l'âge du Soleil et de la Terre était de plusieurs milliards d'années. Pour preuve, il y avait les fossiles, la salinité des mers, l'évolution géologique. Pendant tout ce temps, le Soleil rayonnait avec une puissance considérable. Il est facile de calculer cette puissance en mesurant l'énergie reçue sur Terre à chaque seconde pour une surface donnée. Connaissant la distance Terre-Soleil on peut calculer combien de mètres carrés sont ainsi "arrosés" d'énergie. Le résultat est spectaculaire : de l'ordre du milliard de milliards de milliards de watts. Cette mesure, assez simple à effectuer, a été proposée il y a bien longtemps dans les Cahiers Clairaut. Refaisons le calcul brièvement.

On peut mesurer que chaque mètre carré sur la Terre, bien exposé au Soleil, reçoit environ 1 000 joules par seconde. La puissance reçue est de 1 000 watts par mètre carré. C'est l'équivalent d'un bon radiateur électrique. On note au passage que sur un toit de maison il y a largement de quoi se chauffer. Or le Soleil est à 150 millions de kilomètres de la Terre. Donc, chaque mètre carré de la sphère de rayon R = 150 Mkm centrée sur le Soleil reçoit 1 000 watts. Si vous calculez le nombre de mètres carrés ($S = 4\pi R^2$) vous trouvez $S = 3 \times 10^{23}$ m^2. Donc la puissance que doit fournir le Soleil pour envoyer toute cette énergie à tous ces mètres carrés à chaque seconde est de : $1\,000 \times 3 \times 10^{23} = 0{,}3 \times 10^{27}$, soit 0,3 milliard de milliards de milliards de watts.

Si le Soleil brûlait un combustible comme le méthane, dans une combustion classique avec de l'oxygène, quelle serait sa durée de vie ? En adoptant approximativement une énergie de dix millions de joules par kilogramme, on trouve qu'une masse comme celle du Soleil (2×10^{30} kg) pourrait fournir les 3×10^{26} watts pendant 70 milliards de secondes, c'est-à-dire 2 000 ans. Ce n'est donc pas là l'origine de cette mystérieuse énergie.

Une autre solution fut imaginée par Helmholtz et Kelvin. Le Soleil s'effondrerait sur lui-même, transformant son énergie potentielle en chaleur, permettant ainsi au Soleil de rayonner. Le Soleil est si gros, qu'une faible contraction suffit à produire une puissance considérable.

Essayons de faire le calcul approximativement, pour voir si nous retrouvons les résultats de Helmholtz et Kelvin. L'énergie que libère une masse s'effondrant sous son propre poids peut se calculer. Le calcul n'est pas élémentaire, mais nous nous contenterons d'un simple ordre de grandeur. L'énergie gravitationnelle libérée est égale à $E = 2GM^2/R$. Nous ne démontrerons pas cette relation que nous admettrons telle quelle. M est la masse du Soleil, R son rayon actuel et G la constante de la gravitation. Nous rappelons que, si nous exprimons les masses en kilogrammes, les énergies en joules, les longueurs en mètres et les temps en secondes, G vaut $6{,}67\ 10^{-11}$ (en unités de ce système international). On trouve alors que pour le Soleil, l'énergie totale libérée depuis sa formation, par le simple fait de sa contraction gravitationnelle est de 8×10^{41} joules. Si je divise par la puissance rayonnée par le Soleil (en supposant qu'il a toujours rayonné de la même manière), je vais trouver le nombre de secondes de rayonnement. Nous avons dit que le Soleil rayonne 3×10^{26} watts, donc il a pu le faire ainsi pendant : $8 \times 10^{41}/(3 \times 10^{26}) = 3 \times 10^{15}$ secondes, c'est-à-dire : 95 millions d'années. Helmholtz et Kelvin avaient trouvé 100 millions d'années. C'est indiscutablement une source d'énergie importante, mais là encore, la durée de vie est très inférieure à ce qu'il faut pour expliquer le rayonnement de notre Soleil. Ce n'était donc pas la solution à cette énigmatique source d'énergie.

Équivalence masse et énergie

Einstein a énoncé une relation étonnante $E = m.c^2$. Cette relation montre l'équivalence entre énergie et masse. Si cette énergie peut se libérer, et nous verrons comment cela peut se faire naturellement, la masse est alors une source gigantesque d'énergie, propre peut-être à alimenter une étoile pendant des milliards d'années.

Nous avions présenté une des démonstrations originales de cette relation emblématique dans le n° 111 des CC (*voir « Démonstration de E = mc² » p. 29*). Elle ne faisait appel qu'à des notions qui existaient avant sa fameuse théorie de la relativité restreinte (aberration de la lumière, pression de radiation et conservation de la quantité de mouvement). D'ailleurs, lors de notre dernière Assemblée Générale à Rouen, notre ami R. Cavaroz, nous a signalé un fait intéressant : la célèbre relation avait déjà été établie par P. Langevin. L'idée était dans l'air, la masse est un formidable réservoir d'énergie : du concentré d'énergie. Calculons l'énergie d'un kilogramme. $E = m.c^2$ conduit à $E = 9 \times 10^{16}$ joules. C'est 10 milliards de fois plus d'énergie que ce que fournirait la même masse du mélange méthane+oxygène. Le Soleil pourrait vivre 20 000 milliards d'années en convertissant toute sa masse en énergie. Mais nous allons voir que toute la masse n'est pas convertie. Mais une toute petite fraction seulement de cette masse suffit amplement à faire vivre notre Soleil, confortablement.

Les réactions nucléaires

L'observation des spectres a montré aux astronomes que l'hydrogène, cet élément d'une grande simplicité (un électron tournant autour d'un proton), est présent partout. La masse volumique des étoiles (que les astronomes appellent abusivement la densité), montre que les étoiles sont essentiellement faites d'hydrogène et d'hélium avec des traces d'éléments chimiques plus lourds. Peut-on imaginer que l'hélium, qui a une masse environ quatre fois plus grande que celle d'un atome d'hydrogène, est fabriqué à partir de quatre atomes d'hydrogène. Si c'était ainsi, quel serait le bilan énergétique de cette fabrication. Absorberait-elle de l'énergie ou au contraire en libérerait-elle ? Essayons de le calculer.

La masse atomique d'un atome d'hydrogène est de 1,008 13 g par mole (une mole est un paquet de 6×10^{23} atomes vrais). Donc quatre atomes d'hydrogène ont une masse de 4,032 52 g (toujours par mole). Or un atome d'hélium a une masse de 4,003 89 g. Donc, les quatre atomes d'hydrogène donnent un atome d'hélium et il reste 0,028 62 g. Si cette petite différence de masse est convertie en énergie, à chaque fabrication d'un atome d'hélium, il se libère une énergie de :

$$\frac{0{,}028\,62 \times 10^{-3}}{6 \times 10^{23}} (3 \times 10^{8})^2 = 4{,}3 \times 10^{-12}\ joules$$

Vous avez reconnu la relation $E = m.c^2$, avec la masse convertie en kg par atome vrai et la vitesse de la lumière en m/s.
On peut se demander quelle masse d'hydrogène doit être convertie en hélium pour produire le rayonnement actuel du Soleil. Nous avons vu qu'à chaque seconde le Soleil fournit 4×10^{26} joules puisque sa puissance est de 4×10^{26} watts.
Ce n'est pas compliqué. Il faut fabriquer à chaque seconde $(4 \times 10^{26}) / (4 \times 10^{-12})$ atomes vrais d'hélium.
Et il faut donc convertir 4 fois plus d'atomes d'hydrogène, c'est-à-dire environ 4×10^{38} atomes d'hydrogène par seconde. Sachant que 6×10^{23} atomes d'hydrogène ont une masse de 1,008 13 g, on trouve aisément que le Soleil convertit, à chaque seconde, une masse de : 666 milliards de kilogrammes d'hydrogène (en gros 700 millions de tonnes par seconde) en hélium.
Cette valeur nous paraît énorme. Mais pour le Soleil, ce n'est presque rien, la masse du Soleil étant, rappelons-le, de 2×10^{30} kg. Nous allons calculer la durée de vie du Soleil si nous nous basons sur ce mécanisme de conversion hydrogène en hélium. Nous allons supposer que seulement la moitié de la masse du Soleil est transformée en hélium, car nous verrons plus tard que d'autres mécanismes entrent en jeu, qui vont modifier le déroulement simple du processus. Le calcul est simple :

$$\frac{1}{2} \times \frac{2 \times 10^{30}}{666 \times 10^{9}} \approx 1{,}5 \times 10^{18}\ s$$

C'est-à-dire environ 48 milliards d'années. On est totalement rassuré, notre Soleil a de la réserve pour briller encore longtemps comme aujourd'hui.

Comment convertir l'hydrogène en hélium

Le mécanisme que nous venons de voir a été proposé dans les années 1930. Vous notez au passage que la compréhension du rayonnement des étoiles est très récente, puisque les plus vieux de nos lecteurs sont nés quand on ne savait pas encore expliquer d'où provenait la mystérieuse énergie des étoiles.
Nous avons le mécanisme, mais il nous manque encore un détail. Comment cette transformation se fait-elle ? En effet, pour faire fusionner quatre atomes d'hydrogène ce n'est pas facile. Les noyaux de ces atomes sont des protons, chargés positivement. Quand les protons arrivent l'un près de l'autre ils se repoussent énergiquement. Quelle force peut bien les contraindre à fusionner ?
On peut dire que c'est le mécanisme de Helmholtz et Kelvin qui joue le rôle d'amorce. Le nuage d'hydrogène primordial se contracte sous l'effet de la gravitation. Une énergie considérable est libérée qui échauffe le gaz à un point tel que les protons acquièrent une grande vitesse d'agitation. Quand la température et les vitesses sont suffisantes, les protons peuvent fusionner. Les réactions nucléaires peuvent commencer. Ces réactions se produisent à quelques millions de degrés.

La gravitation devrait continuer de concentrer l'étoile, mais l'énergie générée au cœur de l'étoile naissante produit une pression qui freine et empêche la contraction. L'étoile est stable et la fusion se propage vers la périphérie, le cœur de l'étoile étant fait maintenant d'hélium.
Pour être un peu plus précis, la transformation hydrogène en hélium passe par des étapes intermédiaires, plus faciles à réaliser, mais le bilan est le même, quatre atomes d'hydrogène donnent un atome d'hélium. C'est le mécanisme que les hommes aimeraient pouvoir produire sur Terre de manière contrôlée, le fameux projet ITER. C'est bête, mais les hommes ont d'abord su exploiter ce mécanisme, de manière non contrôlée, pour faire des bombes, ce qu'on appelle les bombes « H ».

Le cœur des étoiles est très chaud, mais nous ne voyons que la partie superficielle, ce que l'on appelle l'atmosphère de l'étoile, dont la partie profonde et chaude est vue à travers les couches superficielles plus froides. Nous comprenons pourquoi des raies spectrales sont visibles.

IX- Les étoiles vivent

Résumé : *Comment a-t-on pu comprendre l'évolution des étoiles, cette évolution qui s'échelonne sur des millions, voire des milliards d'années ? Les astronomes ne vivent pas assez vieux pour suivre la vie d'une étoile, mais les lois universelles de la physique permettent de combler cette impossibilité physique.*

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que la seule source d'énergie possible pour expliquer le rayonnement des étoiles était la fusion nucléaire. Mais en ayant compris cela, nous n'avons pas compris, dans le détail, le fonctionnement d'une étoile, car la réalité est très complexe. Il a fallu attendre l'avènement des premiers ordinateurs pour commencer à reproduire la complexité de la vie d'une étoile.
Dans ce chapitre nous allons essayer de comprendre les grandes lignes de l'évolution stellaire, avec un peu de physique.

Qu'y avait-il précisément à comprendre ? Vers les années 1912, deux astronomes, Hertzsprung et Russel, construisirent, indépendamment l'un de l'autre, un diagramme en portant, indirectement[17], la couleur des étoiles sur l'axe horizontal et la magnitude absolue sur l'axe vertical. Qu'est-ce donc que la magnitude d'une étoile et qu'est-ce donc que la couleur d'une étoile ?

Magnitude et magnitude

Commençons par définir la magnitude d'une étoile. Si vous ne savez pas ce qu'est une magnitude, vous ne pouvez pas l'inventer, car il s'agit d'une définition : la magnitude apparente d'une étoile est une mesure de son éclat apparent dans une échelle logarithmique. L'éclat apparent est l'énergie que vous envoie l'étoile par unité de temps (on appelle ça une puissance) et par unité de surface. En prenant le logarithme de cet éclat apparent, on définit une échelle logarithmique. Pour retrouver la classification ancienne, classification dans laquelle les étoiles les plus brillantes étaient dites de grandeur 1 et les étoiles faibles de grandeur 6 (ou plus), il fut proposé en 1856 par N.R. Pogson, que la magnitude apparente soit définie comme :

$$m = -2{,}5 \log E + cste$$

E est l'éclat apparent mesuré et C une constante arbitraire adoptée une fois pour toutes, selon les unités adoptées pour E. Le signe moins est fait, vous l'avez compris, pour que les étoiles d'éclat le plus important correspondent à la plus petite grandeur, car le logarithme est une fonction monotone croissante, comme disent les mathématiciens, plus *x* est grand plus *log x* l'est aussi.

Il est important de remarquer que cette magnitude apparente ne nous renseigne pas sur la luminosité intrinsèque d'une étoile, car deux étoiles peuvent avoir la même magnitude apparente et ne pas avoir la même luminosité si leurs distances sont différentes. Les astronomes ont inventé une nouvelle définition pour mesurer la luminosité intrinsèque d'une étoile. C'est la magnitude absolue *M*, qui, par définition, est la magnitude apparente qu'aurait l'étoile si elle était à une distance fixe de 10 parsecs (32,61 années de lumière). Comme l'éclat E varie comme l'inverse du carré de la distance, il est facile de montrer que :

$$m - M = 5\,log\,d - 5$$

d est la distance mesurée en parsec (1 pc = 3,26 a.l.). Vous voyez donc que, quand on connaît *m* – *M*, on connaît la distance. Cette quantité est appelée le *module de distance* et on la note souvent par la lettre grecque μ.
Nous avons supposé implicitement que *m* et *M* étaient définies sur l'ensemble du spectre lumineux (toutes les longueurs d'onde). En pratique, les mesures ne sont effectuées que sur un domaine du spectre. On caractérise ce domaine par une longueur effective λ. On définit donc une magnitude m_λ (ou M_λ) pour un domaine de longueur d'onde donné. Vous allez voir que ceci est important pour définir une couleur d'étoile.

[17] La vérité historique est un peu plus compliquée. L'astronome danois Hertzsprung s'était amusé à comparer la magnitude apparente des étoiles d'amas à leur couleur, alors que l'astronome américain Russell avait comparé, pour les étoiles du voisinage solaire, leur magnitude absolue à leur type spectral (une classification basée sur l'aspect des spectres).

Indice de couleur d'une étoile

L'indice de couleur (ou plus brièvement, la couleur) est définie en astrophysique comme la différence des magnitudes à deux longueurs d'onde différentes. Par exemple, les astronomes utilisent la couleur notée *B – V*, différence entre la magnitude apparente en "bleu" à la longueur d'onde approximative de 450 nm et la magnitude apparente dans le domaine "visible" à 550 nm. Mais on peut définir une infinité de couleurs. On utilise souvent la couleur *U - B*, différence des magnitudes en ultraviolet (350 nm) et en bleu (550 nm). En allant vers l'infrarouge on rencontre aussi l'indice de couleur *V- I* (visible à 550 nm moins infrarouge à 800 nm), etc.

Remarquons qu'une couleur est invariante avec la distance puisque l'effet de distance affecte les deux magnitudes de la même façon. La couleur est une propriété intrinsèque de l'étoile (après correction éventuellement de l'effet d'absorption par de la poussière interstellaire qui affecte plus un domaine de longueur d'onde qu'un autre).

Couleur et température effective

On peut assimiler les étoiles à des corps noirs parfaits et calculer la couleur *B – V* pour différentes températures en utilisant l'équation du corps noir donnée par la relation de Planck. Exprimée en magnitude à la longueur d'onde effective λ elle s'écrit (à une constante près) :

$$m = -2{,}5\,log\left[\frac{1}{\lambda^5}\left(exp\left(\frac{h\,c}{\lambda\,K\,T}\right)-1\right)^{-1}\right]$$

Avec h = 6,6626 10^{-34}, k = 1,38 10^{-23}, c = 2,99792 10^{8}, en unités S.I.. On fera le calcul pour T entre 2 000 K et 10 000 K, pour 450 nm (B) et 550 nm (V). Bien que la relation ne soit pas linéaire, elle est bien approximée par :

$$logT = 3{,}79 - 0{,}43\,(B - V)$$

La couleur B - V est approximativement une mesure de température effective.

Retour sur le diagramme HR

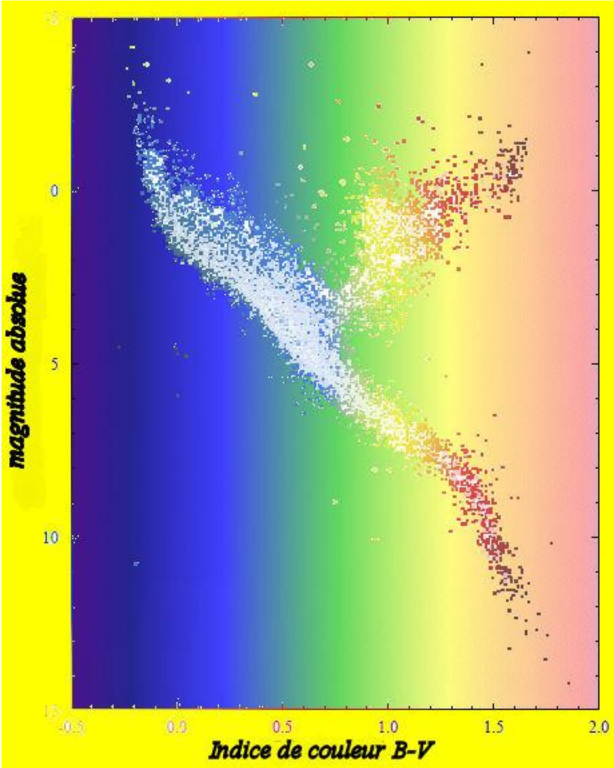
Maintenant que les bases ont été définies, revenons sur le diagramme de nos deux astronomes Hertzsprung et Russel. On parle généralement de diagramme HR, c'est plus simple à dire.

Tout d'abord, éclaircissons le point historique. Hertzsprung, le premier, avait tracé un diagramme en prenant la magnitude apparente des étoiles d'un amas en fonction de leur couleur. Comme, toutes les étoiles d'un amas sont à la même distance (vu de Lyon, tous les habitants de Paris sont à la même distance), la magnitude apparente est, à un terme constant près, une mesure de la magnitude absolue. Donc pour un amas, le diagramme était bien un diagramme magnitude absolue - couleur, à un décalage en ordonnée près.

Russel, lui, avait considéré les étoiles du voisinage solaire de magnitude absolue connue (par les estimations de distance et la magnitude apparente). Ces mêmes étoiles avaient été classées d'après les caractéristiques de leur spectre. Cette classification spectrale s'est révélée être une classification de température, donc de couleur *B - V* (voir encadré).

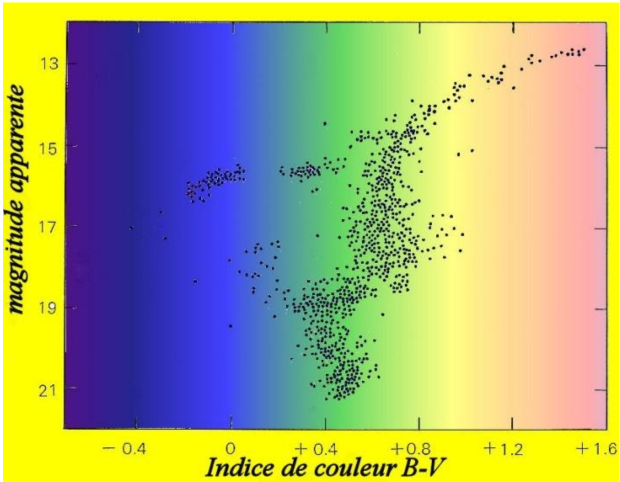
Finalement le diagramme HR est bien un diagramme Magnitude absolue - Couleur (ou Luminosité - Température).

Le problème se posait alors ainsi : pourquoi les étoiles du voisinage solaire ne se situent qu'en certaines régions du diagramme et pourquoi les étoiles d'amas obéissent à des distributions différentes ?



D'après ESA- HIPPARCOS

Diagramme HR pour les étoiles du voisinage solaire mesurées par le relevé HIPPARCOS.



D'après un diagramme de H. Arp

Diagramme HR typique pour les étoiles d'un amas.

Température intérieure

La première chose à vérifier est que la température intérieure d'une étoile est assez élevée pour permettre la fusion nucléaire des noyaux d'hydrogène. Vous vous rappelez en effet que c'est la seule source d'énergie capable d'expliquer la longévité d'une étoile.

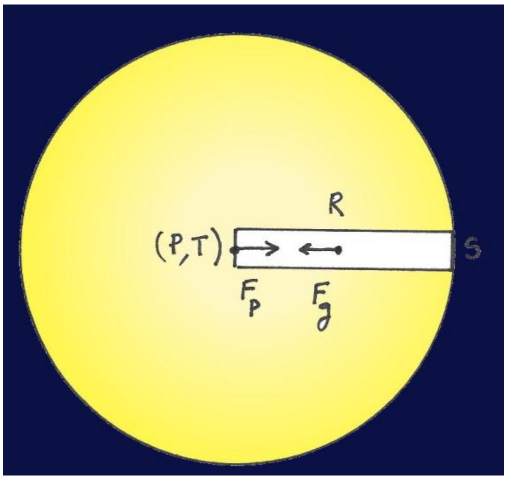
Nous empruntons la démonstration très simple à Martin Schwarzschild[18]. Quand je dis très simple, il faut normalement utiliser le calcul différentiel. Mais nous allons simplifier encore en essayant de ne pas trop dénaturer le calcul.

Nous allons considérer un volume cylindrique de section *S* et de masse *m*, qui s'étend du cœur de l'étoile à la périphérie (voir le schéma). Ce tube a pour longueur le rayon de l'étoile et son volume est v = *S.R*. Il est poussé vers l'extérieur de l'étoile par une force

$$F_p = P\ S$$

où *P* désigne la pression au centre de l'étoile. La pression sur l'autre face du cylindre est nulle.

[18] Fils de Karl Schwarzschild qui trouva la solution des équations d'Einstein dans le cas d'une symétrie centrale (cas applicable au Soleil).



Mais, chaque section du cylindre est attirée par toute la masse *M* qui est en direction du centre de l'étoile. En moyenne nous pourrons considérer que le cylindre est attiré par la moitié de la masse de l'étoile, M/2 (c'est une approximation simpliste, justifiée par le fait que la masse volumique doit être plus importante au centre qu'en surface). Nous allons désigner par ρ la masse volumique moyenne de l'étoile (masse divisée par volume) :

$$\rho \;=\; \frac{M}{\left({}^{4}/_{3}\right)\pi\, R^3} \;\approx\; \frac{M}{4\,R^3}$$

donc le cylindre est attiré vers le centre par une force gravitationnelle :

$$F_S \;=\; \frac{G\,M\,m}{(R/2)^2} = G\,\frac{(M/2)(S\,R\,\rho)}{(R/2)^2} \;=\; \frac{G\,S\,M^2}{2\,R^4}$$

L'étoile étant stable, cela signifie que les deux forces antagonistes sont égales en module *($F_p = F_g$).* On trouve alors immédiatement :

$$P \;=\; \frac{G\,M^2}{2\,R^4}$$

Nous pouvons estimer l'ordre de grandeur de la pression au centre d'une étoile. En prenant l'exemple du Soleil[19] ($M = 2 \times 10^{30}$ kg $R = 7 \times 10^{8}$ m).

On trouve que la pression au centre du Soleil est de $P = 6 \times 10^{14}$ N/m^2. Sur chaque mètre carré du centre du Soleil s'exerce une force de 600 000 milliards de newtons. C'est comme si, sur Terre, vous aviez une masse de 60 milliards de tonnes par mètre carré.

Bon, alors, et la température ! Il y a une loi de la physique, loi des gaz parfaits, qui dit que le produit de la pression par le volume d'une quantité de matière est proportionnel à la température absolue T de cette quantité de matière (la température absolue est celle de votre thermomètre, augmentée de 273 degrés. On la mesure en degrés kelvin, abrégés en K). On peut déduire de cette formulation une expression qui relie la pression, la masse volumique de la matière considérée et la masse μ_p d'une particule qui compose cette matière. Cette relation très classique en physique s'écrit (voir l'encadré) :

$$P \;=\; \frac{k}{\mu_P}\,\rho\,T$$

La constante de Boltzmann $k \approx 1{,}4\times10^{-23}$ dans le même système d'unité standard que précédemment μ_p est à peu près la masse d'un noyau d'hydrogène (un proton), mais il faut diviser par deux, car il y a aussi des électrons, en nombre égal, et qui ont une masse négligeable. En remplaçant dans l'expression précédente, la pression centrale et la masse volumique par leurs expressions vues plus haut, on tire l'expression de la température centrale :

$$T \;= 2\,P\,\frac{\mu_P}{k}\,\frac{R^3}{M}$$

En appliquant cette relation au Soleil et avec $\mu_p = 1{,}7 \times 10^{-27}$kg, on trouve $T = 25 \times 10^{6}$ K. C'est chaud, 25 millions de degrés. À cette température-là, il n'y a pas de problème pour réussir la fusion de l'hydrogène en hélium. C'est ainsi qu'on récupère une belle énergie, fort agréable sur la plage...

La loi des gaz parfaits

Expérimentalement on peut constater que le produit PV/T reste constant pour un gaz à la température T, à la pression P et de volume V. On sait par ailleurs (loi d'Avogadro) qu'un paquet de $N_o = 6 \times 10^{23}$ particules (ce qu'on appelle une mole) occupe un volume de 0,022 4 m^3 à la pression de 101 000 N.m^{-2} (les N.m^{-2} sont des pascals - abréviation Pa) et à la température de 0 °C = 273 K. On a donc pour les N_o particules (1 mole) :

[19] La constante de la gravitation universelle $G = 7\times10^{-11}$ dans le système des unités standards (m,kg,s).

$$\frac{PV}{T} = \frac{101\,000 \times 0{,}0224}{273} = 8{,}3\ N.m.K^{-1}.mole^{-1}$$

Notons que les "newton × mètre" = N.m sont des joules (abréviation J).

Par ailleurs, la masse de n moles de particules ayant une masse individuelle de μ_p est $n.N_o\mu_p$. Cette masse, divisée par le volume, définit la masse volumique :

$$\rho = \frac{n\ H_0\ \mu_P}{V}$$

En reportant cette expression dans notre première relation écrite pour n moles on trouve alors :

$$P = \frac{8{,}3}{N_0\ \mu_P}\ \rho\ T$$

La valeur $8{,}3/N_o = 1{,}38 \times 10^{-23}$ $J.K^{-1}$ se note k. C'est la constante de Boltzmann. Nous retrouvons bien l'expression utilisée dans le cours.

Ce n'est pas croyable où ça mène l'astronomie !

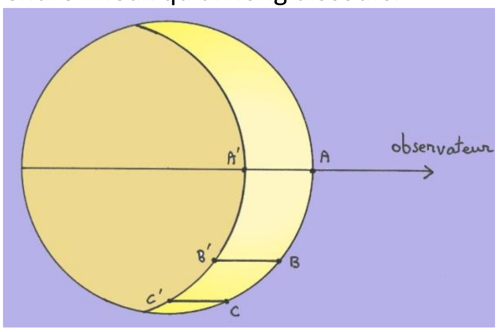
Preuve expérimentale

Nous avons trouvé que l'intérieur du Soleil est très chaud. La partie extérieure est bien plus froide, quelques milliers de degrés seulement ! On sait d'ailleurs mesurer cette température extérieure (*voir « Thermosecantzahéliomètre » dans CC n°6 page 3-11)*. On en conclut que la température augmente quand on s'enfonce dans les couches profondes. Peut-on le prouver expérimentalement ? Eh bien oui, et c'est très simple, même si on ne peut pas aller mesurer la température sur place. C'est l'observation de l'assombrissement du bord du Soleil.

L'astronome Foucault et son camarade d'étude Fizeau furent les premiers à photographier le Soleil en 1845 (*voir « Léon Foucault » J.N Terry dans CC n° 113 p.20-24)*. Il apparut clairement que le bord du Soleil était plus sombre.

Quelle était l'origine de cet assombrissement ?

Le schéma ci-dessous vous fera comprendre mieux qu'un long discours.



La profondeur optique d'où nous provient la lumière est à peu près constante AA' = BB' = CC'. Mais vous voyez sur le schéma que A' est plus profond que B', lui-même plus profond que C'. La lumière que nous observons au centre du Soleil provient, en moyenne, de régions plus chaudes.

Photo D. Bardin

Sur cette magnifique photo prise par Daniel Bardin lors du dernier passage de Vénus devant le Soleil, on devine bien l'assombrissement centre bord.

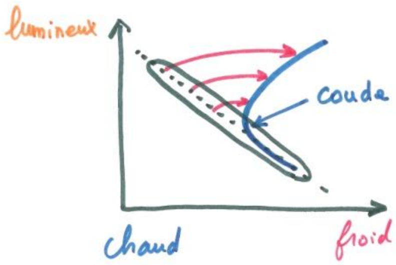
Formation des éléments

Nous sommes rassurés, car nous avons compris la source d'énergie des étoiles. Cette source est inépuisable... Pas exactement.

À partir de quatre atomes d'hydrogène, nous pouvons former un atome d'hélium. Cette réaction n'est pas directe. Elle passe par des étapes intermédiaires que nous ne détaillerons pas ici. Mais le résultat est que nous récupérons de l'énergie, de petites particules (neutrinos) et bien sûr de l'hélium. Quand le cœur de l'étoile ne sera composé que d'hélium les réactions se poursuivront vers la périphérie de l'étoile. Mais on peut imaginer que l'hélium à son tour puisse fusionner pour donner du carbone, que le carbone puisse fusionner pour donner de l'oxygène, etc. En principe ces mécanismes sont possibles, mais sous certaines conditions qui ne sont pas toujours satisfaites, selon la masse de l'étoile.

Peut-on tout calculer ? En principe oui. Les lois de la physique qui gouvernent la production d'énergie, son acheminement par rayonnement, par convection (brassage des différentes couches) ou conduction, ces lois sont connues, ou au moins bien représentées. Il n'y a pas moins de cinq équations différentielles à résoudre simultanément pour décrire l'évolution d'une étoile de masse et de composition chimique initiale données. Pour une description fine, il faut prendre en compte aussi les mouvements mécaniques et la perte de masse des étoiles. Vous concevez la complexité du problème. Avec l'avènement des ordinateurs, il a été possible de s'attaquer à ce gigantesque problème.

On découvre ainsi qu'une étoile comme le Soleil ne peut pas démarrer immédiatement les réactions nucléaires de fusion de l'hélium. Il faut d'abord que le cœur d'hélium se contracte pour augmenter la température à un niveau suffisant. Ce faisant, les couches externes seront soufflées et l'étoile va enfler pour devenir une étoile géante rouge (extérieur plus froid). Le point représentatif du Soleil, dans le diagramme HR dont nous parlions au début de l'article, se déplacera vers la droite (vers les étoiles froides) et vers le haut (vers les étoiles plus lumineuses). On découvre aussi que plus une étoile est massive plus tôt se fera ce passage de la zone principale du diagramme vers la zone des étoiles géantes.



L'âge des étoiles

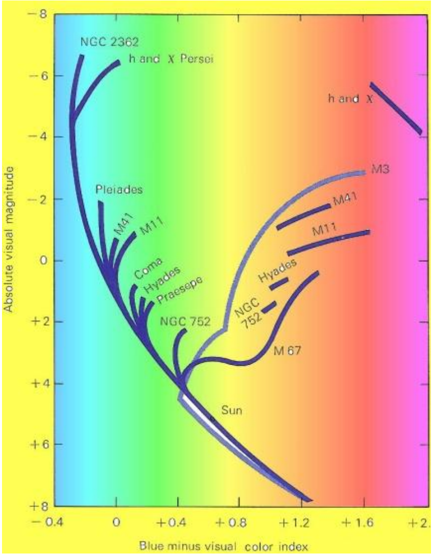
On commence à comprendre un peu le diagramme HR pour les étoiles du voisinage solaire. Toutes ces étoiles se sont formées par contraction d'un nuage primordial, mais elles n'ont pas commencé leur vie au même moment. Cependant, elles sont toutes arrivées dans la zone principale du diagramme HR pour y brûler leur hydrogène. Cette zone s'appelle la *séquence principale*. Là, elles y restent le temps d'épuiser leur combustible nucléaire. Pour les étoiles de faible masse, comme le Soleil, cette phase est très longue (quelques milliards d'années). Pour les étoiles massives, c'est plus court (enfin... quelques centaines de millions d'années tout de même). Pour les étoiles les plus massives, c'est très court, quelques millions d'années seulement.

Quand les étoiles quittent la séquence principale pour aller rejoindre la séquence des étoiles géantes, le processus est très rapide. C'est le cœur d'hélium qui se contracte d'abord (et nous avons vu dans le dernier chapitre que ce processus était rapide). Arrive ensuite la combustion de l'hélium, un second souffle pour les étoiles et une seconde pause dans le diagramme HR. On comprend donc pourquoi on n'observe pas d'étoiles sur toute la surface du diagramme. On n'observe les étoiles que là où elles demeurent assez longtemps.

Qu'en est-il du diagramme HR des amas d'étoiles ? Pourquoi un aspect différent du diagramme HR général ? La différence essentielle tient à ce que toutes les étoiles d'un amas naissent à peu près en même temps. Les étoiles demeurent physiquement proches les unes des autres. Si nous observons un diagramme d'amas qui vient juste de naître et qui n'a que quelques millions d'années, les étoiles sont toutes encore sur la séquence principale. C'est ce qu'on observe avec un amas jeune comme l'amas des Pléiades.

Si on prend un amas plus vieux, les étoiles massives auront déjà quitté la séquence principale, mais pas encore les étoiles peu massives. La séquence principale sera incurvée vers le haut. Si enfin on prend un amas très vieux, la courbure sera bien plus prononcée, seules les étoiles très peu massives seront encore sur la séquence principale. Nous venons de comprendre la diversité des diagrammes HR pour les amas stellaires.

Une conséquence importante est que la position du coude (voir le graphique) est un indicateur d'âge. On parvient, en comparant les diagrammes observés aux prévisions théoriques, à dater les amas. On trouve que les vieux amas ont plus de dix milliards d'années. Retenez bien ce résultat. Il aura une importance pour la suite de notre exploration.



D'après G. Abell, 1969

Diagramme HR pour différents amas stellaires.

Nous parlerons bientôt de la fin de la vie d'une étoile, fin calme ou catastrophique.

Bibliographie :
Schwarzschild M., 1958, Structure and Evolution of the stars, Dover
Bottinelli L., 1986, L'univers des étoiles, Gammaprim

X- Les étoiles meurent aussi

Résumé : *Encore un chapitre court ! Nous avons vu dans le dernier chapitre que les étoiles évoluaient. Nous allons voir dans celui-ci que les étoiles meurent aussi en donnant naissance à des objets fascinants : les pulsars, les supernovae, les trous noirs*.

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que les étoiles évoluent en transformant leur matière originelle, afin de produire de l'énergie. Nous avons compris comment les astronomes suivent cette évolution à l'aide du diagramme de Hertzsprung et Russel (dit diagramme HR). L'hydrogène se transforme en hélium, l'hélium peut se transformer en carbone, le carbone en oxygène, etc. Mais jusqu'où va se poursuivre cette transformation ? Ce processus permet-il de produire de l'énergie indéfiniment ? Comment va-t-il s'arrêter et comment les étoiles cesseront-elles de briller ? Voilà bien des questions auxquelles nous ne pourrions pas répondre sans le secours de la physique.

Pendant une durée de vie humaine, nous ne pouvons pas percevoir l'évolution complète pour une même étoile, de sa naissance à sa mort. Cependant, en observant des étoiles diverses, à différents stades de leur évolution il est possible de reconstituer le cheminement complet d'une étoile, de sa naissance à sa mort.

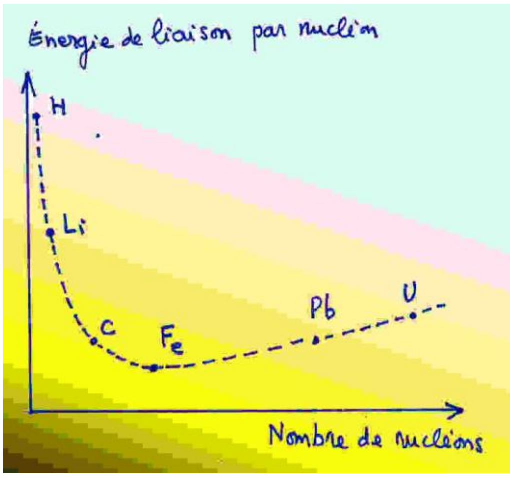
C'est un peu comme si un extraterrestre venait observer les humains que nous sommes pendant une heure. Il verrait des bébés naître, il verrait des enfants, des adolescents, des hommes d'âge mûr, des vieillards. Il pourrait, en s'aidant de sa logique et de sa connaissance de la matière vivante, reconstituer la vie typique d'un individu. Il pourrait commettre des erreurs en imaginant une phase « chien ». Mais il pourrait comprendre les grandes lignes de notre évolution individuelle.

La mort d'une étoile

Reste maintenant à aborder la partie la plus dramatique : la mort de l'étoile. Il y a plusieurs scénarios possibles, selon la masse de l'étoile.
Les plus petites étoiles s'éteindront lentement après avoir, dans un ultime sursaut de contraction centrale, soufflé les régions externes pour former les nébuleuses planétaires. Le centre continuera son effondrement jusqu'au stade de refroidissement ultime, sans pouvoir allumer de réactions nucléaires d'un ordre supérieur, faute de masse suffisante pour fournir la pression nécessaire. Ces objets froids iront mourir dans le cimetière des **naines blanches**, froides et peu lumineuses. C'est le retour à la case départ, dans le bas droit du diagramme HR.
Les étoiles les plus massives pourront allumer la fusion du carbone central en silicium (avec formation, au passage de néon et d'encore plus d'oxygène). Les cycles deviennent très courts. Le stade ultime de la fusion est celui qui forme du fer. En effet, au-delà, le processus ne fournit plus d'énergie, mais en consomme. On ne peut pas former des éléments plus lourds que le fer par le processus de fusion simple.

La limite du fer

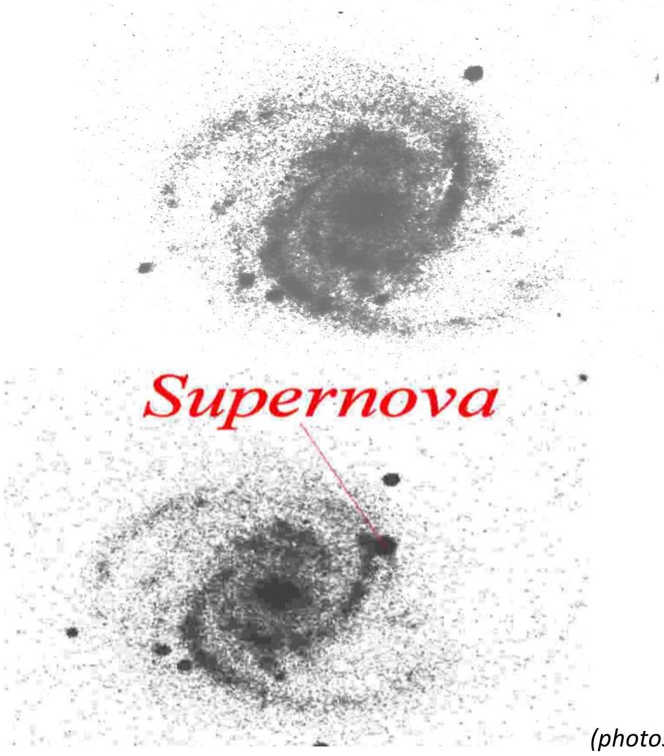
Regardez, c'est le graphique ci-dessous qui nous l'explique. Si on trace l'énergie qui lie une particule (proton ou neutron - ce qu'on appelle les nucléons) au noyau atomique en fonction du nombre total de particules de ce noyau, on constate qu'il y a un minimum situé au voisinage du fer (Fe).



On obtient donc de l'énergie soit en fusionnant des noyaux légers (ex. : hydrogène) soit en cassant des noyaux lourds (ex. : uranium). La seconde solution est plus facile (c'est la fission), mais le gain en énergie est moindre. Ça se voit sur la courbe. C'est ce qu'on réalise avec les bombes dites « atomiques » ou plus couramment avec les centrales nucléaires. L'autre solution (la fusion) est beaucoup plus difficile, mais beaucoup plus énergétique. Mais comment faire pour faire fusionner des noyaux qui se repoussent ? La solution est de leur communiquer des vitesses énormes en augmentant la température. Or pour l'instant on ne sait le faire qu'à partir du premier processus (fission) et sans être capable de contrôler la réaction. C'est ce qui a donné les bombes thermonucléaires, amorcées par des bombes

« atomiques ». Les chercheurs essayent bien de maîtriser ce second mécanisme, mais ça ne marche pas encore. Le jour où ce sera possible, l'énergie, pour les hommes et à leur échelle, sera quasiment illimitée. C'est ce que fait le Soleil. Mais lui a eu l'avantage de sa masse. L'énergie de sa contraction initiale a été suffisante pour amorcer le processus de fusion.
Dans la phase de fusion extrême, l'énergie produite et la vitesse de production sont telles que le phénomène est « explosif ». Une telle explosion constitue une **supernova**. L'étoile devient extrêmement lumineuse pendant quelques jours. La matière constitutive est éparpillée dans l'espace. Seul un cœur très dense subsiste.

Lors d'une telle explosion, il y a une grande surabondance d'énergie libérée et une partie peut servir à former des éléments plus lourds que le fer : par exemple, du plomb, de l'or, de l'uranium.



(photos G.P.)

Avant, après...

Il est amusant de penser que, si vous possédez de l'or, ou même du plomb, cette matière s'est presque exclusivement formée lors d'une explosion de supernova. Avouez que vous regardez votre alliance (ou votre plombage dentaire) avec plus de respect.

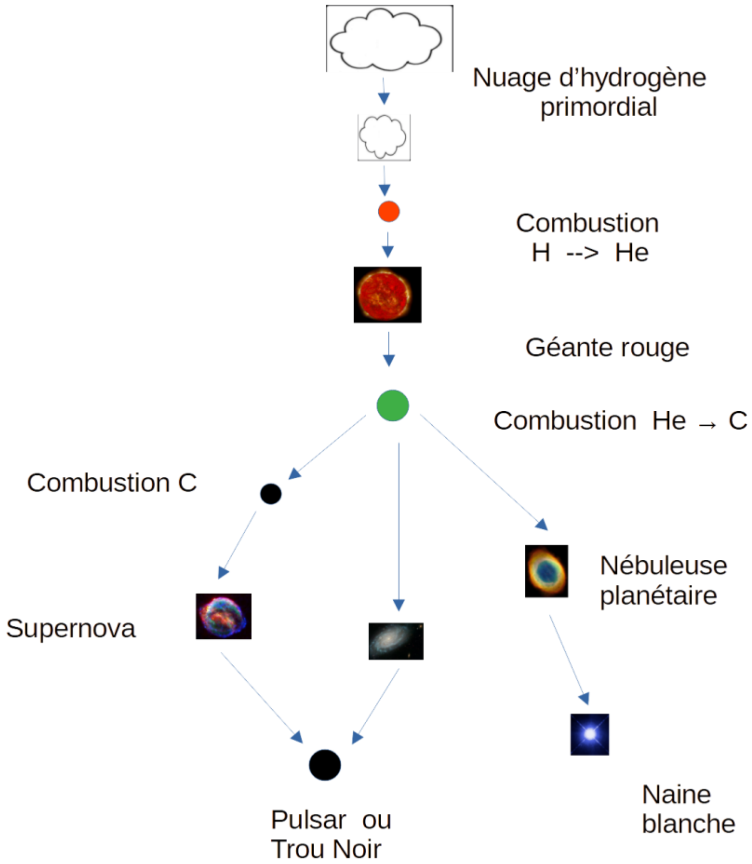
Pulsars et troublants trous noirs

Après l'explosion, le cœur se concentre jusqu'à atteindre une masse volumique inimaginable, jusqu'à un milliard de tonnes par centimètre cube. Pendant cette contraction la vitesse de rotation augmente, parfois jusqu'à un tour en une milliseconde. Cette augmentation de la vitesse de rotation lors d'une contraction est une loi de la physique, la loi de conservation du moment angulaire. Les patineurs l'utilisent lorsqu'ils serrent les bras le long du corps pour tourner plus rapidement. Ces astres en rotation rapide sont des **pulsars**. À cause du champ magnétique très intense qui règne à leur surface, les électrons relativistes émettent de la lumière ; c'est ce qu'on appelle l'émission synchrotron. Cette émission est orientée par les lignes du champ magnétique et, du fait de la rotation, nous recevons des impulsions radio, à chaque tour, avec une très grande régularité, comme celles provenant d'un phare maritime. Les premières détections firent croire aux astronomes qu'il pouvait s'agir de signaux d'êtres extraterrestres.

Mais il y a plus mystérieux encore. Les étoiles encore plus massives pourront poursuivre l'effondrement central et nous ne connaissons pas de mécanisme susceptible d'arrêter un tel effondrement. L'objet ainsi formé peut retenir par sa gravitation tous les corps. La vitesse de libération est supérieure à la vitesse de la lumière. Même la lumière ne peut s'échapper. Nous avons un **trou noir** ! Notez que ce n'est pas seulement la densité qui fait d'un corps un trou noir. C'est le rapport masse sur rayon. La conséquence peut être importante pour notre univers.
On peut se demander ce que devient la matière qui a été éparpillée dans l'espace après l'explosion d'une supernova. C'est très simple. La nature va la recycler. De nouvelles étoiles vont se condenser à partir de cette matière.

Nous résumons dans un diagramme général les différents types d'évolution stellaire. On s'aperçoit que la description de l'évolution stellaire fait appel aux lois très générales de la physique (atomique, nucléaire, quantique). Seule la phase trou noir est encore énigmatique.

On comprend que les astrophysiciens aient été tentés très tôt par des simulations numériques. En partant d'un simple nuage d'hydrogène, on lui applique les lois de la physique et on regarde comment il évolue. C'est ainsi que l'on a pu comprendre l'évolution des étoiles, de leur naissance jusqu'à leur mort.



Les étoiles les moins massives finissent leur vie en naines blanches alors que les étoiles les plus massives finissent en pulsars, voire même en trous noirs, après avoir explosé en supernovae. Quel chemin parcouru depuis leur naissance à partir de la contraction de la matière originelle !

Finissons-en avec le Soleil

Notre Soleil est une petite étoile, une étoile dite « naine ». Il ne connaîtra pas la fin catastrophique des *supernovae*, mais il va connaître la phase d'expansion de toute géante rouge et il englobera toutes les planètes qui l'entourent. Nous mourrons donc grillés ! Il ne nous reste que quelques milliards d'années pour trouver une solution. Le plus simple sera, sans doute, d'aller voir ailleurs...

XI- Des étoiles aux galaxies

Résumé : *Voici un chapitre facile, sans calculs, sur l'histoire de la découverte des galaxies.*

Introduction

Au début du siècle dernier, vers les années 1920, l'image que les astronomes donnaient de l'Univers était très différente de ce que nous savons aujourd'hui. Certes, on avait dépassé la conception antique selon laquelle tout l'Univers était limité à notre Système solaire. Les étoiles commençaient à livrer leur mystère. Leur source d'énergie était identifiée, même si le détail de leur formation et de leur évolution n'était pas encore compris[20].

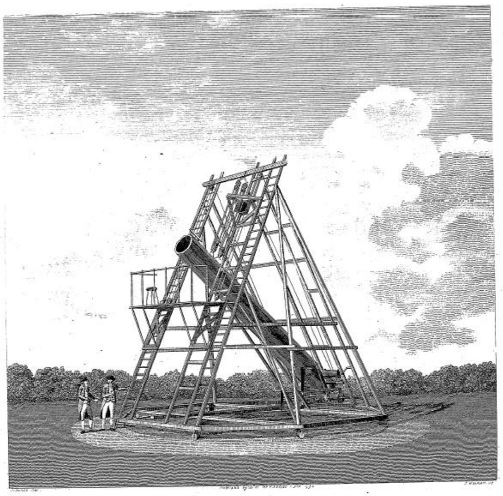
[20] C'est en 1938 que les réactions nucléaires précises seront découvertes par Bethe et il faudra attendre les calculateurs des années 1960 pour faire les premiers modèles précis.

Les étoiles sont-elles les briques de l'Univers ?

Les astronomes avaient donc compris que notre Soleil n'était qu'une étoile parmi d'autres. Une étoile bien quelconque d'ailleurs, une étoile naine. Bon, admettons. Depuis Galilée et sa célèbre lunette astronomique (c'est-à-dire, depuis 1610 environ), on savait que la traînée laiteuse qui barrait le ciel était composée d'étoiles. Elles y étaient si serrées que le ciel devenait laiteux, d'où le nom de Voie lactée.
Quand nous regardons la Voie lactée, nous n'avons pas vraiment l'impression que notre Soleil en fait partie. Pas plus que les étoiles que l'on voit de part et d'autre de ce chemin laiteux. Et pourtant les astronomes vont montrer que toutes ces étoiles, Soleil compris, forment un objet unique, notre Galaxie. C'est William Herschel qui, le premier, comprit cela.

Image Wikimedia, libre de droits *William Herschel (1738-1822)*

Venu tard à l'astronomie, William Herschel fit de nombreuses découvertes, dont celle de la planète Uranus. Il découvrit aussi le rayonnement infrarouge. C'était également un compositeur de musique dont les œuvres pour l'orgue rappellent un peu la musique de J.S. Bach.



Cliché, libre de droits, communiqué par A. Bremond
Le télescope de 20 pieds de distance focale construit par W. Herschel.

La découverte n'a pas été facile. Herschel, un des premiers, avait recensé les étoiles entourant le Soleil. En supposant que toutes avaient la même luminosité, il estima leurs distances relatives par la mesure de leur éclat apparent. Il cartographia ainsi la forme de la distribution apparente des étoiles qui nous entourent. Que pensez-vous qu'il trouva? Il trouva que ce n'était plus la Terre qui occupait le centre de l'Univers, mais le Soleil.

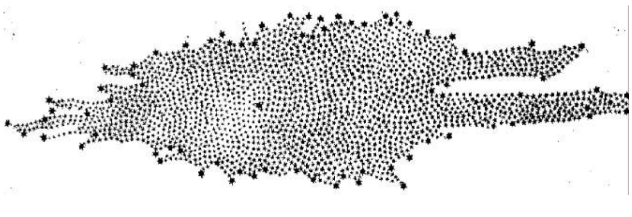


Image Wikimedia, libre de droits
Notre Voie lactée vue par Herschel. Le Soleil est presqu'au centre.[21]

[21] Ce dessin est maintenant attribué à Caroline Herschel, sœur de William Herschel

Mais ce résultat était faux. En effet, dans le brouillard d'étoiles qui forme notre Galaxie, le regard porte à une distance limitée. En regardant autour de soi, on a l'impression d'occuper le centre. Il semblait même que notre Galaxie d'étoiles était l'Univers. Les étoiles apparaissaient alors comme les briques de l'Univers.
William Herschel et son fils John firent un travail remarquable. Ils recensèrent dans le ciel un très grand nombre de nébuleuses, objets flous de constitution mystérieuse. Ce relevé conduisit à la publication du *« General Catalogue* », augmenté plus tard par Dreyer sous le nom de « *New General Catalogue* ». Tous les objets de ce catalogue étaient désignés par leur numéro NGC. La diversité et la nature de ces objets étaient tout aussi nébuleuses que leur aspect. Nous allons voir bientôt que ce catalogue allait se révéler de première importance. Mais il fallait encore améliorer la description de notre Voie lactée.

Un astronome américain, H. Shapley, ancien reporter spécialisé dans les affaires criminelles[22], refit en 1918, ce que Herschel avait fait, mais il eut la chance, ou l'idée brillante, de ne pas prendre les étoiles comme traceurs, mais des amas d'étoiles, plus précisément, des amas globulaires. Ces amas de quelque 100 000 étoiles étaient plus lumineux qu'une étoile individuelle, ils devaient donc être détectables plus profondément. Mais la chance, qui sourit aux esprits éclairés, fit que ces amas globulaires n'étaient pas répartis dans le plan de la Voie lactée, mais dans une sorte de halo sphérique.

Harlow Shapley (1885 - 1972)

Shapley dressa la distribution des amas et il constata que notre Soleil n'était pas au centre de cette distribution, mais plutôt sur un bord, à environ 30 000 al du centre. Nous reproduisons ci-après la figure originale publiée par cet astronome.

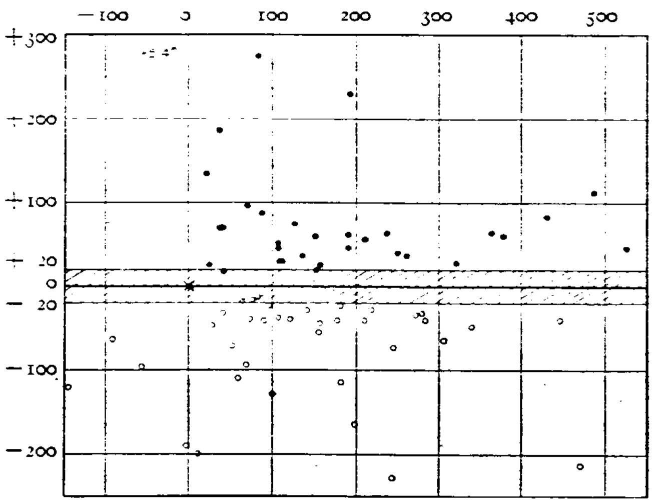


FIG. 4.—Projection of the positions of globular clusters on a plane perpendicular to the Galaxy, illustrating (1) the absence of clusters from the mid-galactic region, (2) their symmetrical arrangement with respect to the Galaxy, (3) the eccentric position of the sun (the cross) with respect to the center of the system of clusters. The ordinates are distances from the galactic plane, $R \sin \beta$; the abscissae are projected distances in the direction of the center, $R \cos \beta \cos (\lambda - 325°)$. The unit of distance is 100 parsecs: the side of a square is accordingly 10,000 parsecs. On this scale the actual diameter of the clusters is about one-fifth the diameter of the circles and dots. The cluster N.G.C. 4147 is outside the boundary of the diagram, as indicated by the arrow.

[22] Comme Tintin (dont il a un peu la physionomie).

Astrophysical Journal 48, 1918

Il remarque que les amas globulaires ne sont pas particulièrement localisés dans le plan de la Voie lactée, qu'ils sont distribués de manière symétrique et que le Soleil n'est pas au centre de cette distribution. D'après son article, le Soleil serait à environ 20 000 pc du centre de notre Galaxie. Le diamètre de notre galaxie serait environ de 50 000 pc, soit environ 163 000 années-lumière.

Les nébuleuses extragalactiques

Le problème suivant s'est posé : est-ce que les taches floues, visibles sur les photographies astronomiques sont des nébuleuses internes à notre Galaxie, ou sont-elles d'autres galaxies, extérieures à la nôtre ? Des univers-îles comme on le disait à l'époque !

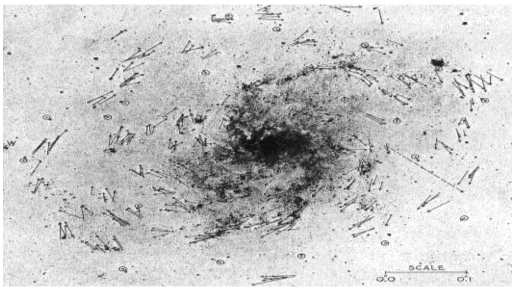
Quelques astronomes, comme H.D. Curtis et K. Lundmark, pensent que ces nébuleuses sont "extragalactiques", hors de notre Galaxie. L'observation de novae, ces étoiles qui subissent des sursauts d'éclat dus à la réalimentation en hydrogène par une étoile voisine, place la grande nébuleuse d'Andromède en dehors de notre Galaxie.

Mais un argument imparable va montrer le contraire (je vous préviens de suite pour le cas où vous cesseriez la lecture ici, cet argument imparable s'est révélé faux).

L'argument imparable

Van Maanen était un spécialiste reconnu pour la mesure de mouvements propres. Si on observe une étoile sur deux clichés pris à de nombreuses années d'intervalle, il est possible de voir un déplacement angulaire, très faible, de quelques étoiles. C'est le mouvement propre.

Naturellement, un tel mouvement n'est pas détectable pour les objets distants. C'est pour la même raison que vous voyez les avions à réaction se déplacer tout doucement dans le ciel, alors que, s'ils passaient plus près de vous, leur grande vitesse réelle serait évidente.



Astrophysical Journal 63, 1926

Les mesures erronées de mouvement propre des étoiles de quelques nébuleuses spirales forcèrent, pour un temps, à les considérer comme faisant partie de notre Voie lactée.

Or Van Maanen mesura des déplacements pour des étoiles des bras spiraux de quelques nébuleuses, comme[23]: M33, M101 ou M51. Les vitesses angulaires étaient telles que si ces nébuleuses avaient été en dehors de notre Galaxie, leur vitesse réelle aurait été plus grande que la vitesse de la lumière. Donc, nécessairement, les nébuleuses devaient être dans notre Galaxie. Le débat semblait clos.

Mais Lundmark reprit les mesures de Van Maanen et, bien qu'il ne voulût pas critiquer trop ostensiblement celui-ci, il ne confirma pas les résultats. On peut s'interroger sur l'origine des erreurs de Van Maanen. Nous ne le ferons pas ici, mais nous en reparlerons peut-être dans un autre contexte, même si ce genre de recherche a seulement un intérêt académique.

La confirmation des galaxies

La confirmation de l'existence de nébuleuses extragalactiques (les galaxies) est venue des travaux de E. Hubble.

[23] Objets du catalogue de Messier

NASA & MtWilson observatory
Hubble guide le télescope Schmidt du Mt Palomar à l'aide de la "raquette", en suivant une étoile du champ dans le "chercheur".

Grâce au nouveau télescope du Mont Wilson, Hubble put détecter des étoiles variables céphéides. Ces étoiles obéissent à une relation Période-Luminosité, découverte en 1913, par Henrietta Leavitt. La simple mesure de la période de variation donne la luminosité moyenne. De la comparaison avec l'éclat apparent on peut déduire la distance (*voir « Distances par les céphéides, dans le CC n° 115 p. 9-11*). C'est ainsi que Hubble a pu obtenir la distance des nébuleuses, M33, M31 et de quelques autres.

On comprit alors que notre Univers étaitp euplé d'innombrables galaxies, semblables à la nôtre. Cette découverte, pressentie par plusieurs astronomes, comme Lundmark ou Curtis, était enfin la preuve attendue et l'aboutissement de cette longue quête pour décrire notre Univers.
Dans le prochain et dernier chapitre, nous aborderons l'étude de l'Univers, pris dans son ensemble. Nous estimerons le nombre de galaxies de notre Univers.

XII - L'Univers

Résumé : *Ce dernier chapitre nous permet d'aborder le problème de l'Univers considéré dans son ensemble. À mon sens, ce chapitre est d'une grande importance, car il nous permet de prendre conscience de la place de l'homme dans l'Univers. Le résultat égratignera probablement notre orgueil. Mais peu importe, l'homme cultivé et honnête devrait faire sienne cette réalité. Attention, la lecture de cet article est dangereuse. Âmes sensibles s'abstenir !*

Introduction

Ce chapitre présente l'Univers, notre Univers, tel qu'il nous apparaît à travers les observations astronomiques. L'interprétation de ces observations sera expliquée, mais il ne faut pas perdre de vue que la physique, et partant, l'astrophysique, ne donnent que des modèles. L'une comme l'autre ne répondent pas au pourquoi originel, mais se contentent de décrire le comment qui en résulte.

Dans le chapitre précédent, nous avions compris que l'Univers était peuplé de galaxies, semblables à la nôtre, elles-mêmes peuplées de milliards d'étoiles semblables à notre Soleil. Était-il possible d'aller plus loin, de trouver des lois régissant l'Univers ? Ces lois, comme celles de la mécanique, nous rendraient-elles possibles des prédictions, comme celles qui nous permettent de prévoir les conjonctions des planètes, le retour de certaines comètes, ou celles qui nous permettent d'interpréter les étoiles nouvelles (supernovæ) et rendent plausible le schéma d'évolution des étoiles ?

L'univers de Newton

Newton a consacré un peu de temps à imaginer la gravitation à l'échelle de l'Univers. Selon lui, l'attraction gravitationnelle entre tous les corps, universelle et instantanée, imposait que l'Univers soit infini. Sans cela tous les corps se seraient rassemblés au centre de l'Univers, sous l'effet de cette attraction. Avec un Univers infini, chaque corps est attiré dans chaque direction de la même manière et reste donc immobile. Mais un univers infini ne posait pas que des problèmes philosophiques (qu'est-ce que l'infini ?). En effet, dans un univers homogène, le nombre d'étoiles croissant comme le cube de la distance et l'éclat apparent ne décroissant que comme le carré de la distance, l'augmentation du nombre d'étoiles faisait plus que compenser la perte d'éclat. Le ciel aurait dû être aussi brillant que la surface d'une étoile, prédiction évidemment non confirmée. On peut aussi comprendre ce résultat en disant que, quelle que soit la direction de notre regard, dans un univers infini, la visée s'arrête nécessairement à la surface d'une étoile.

Nous verrons un peu plus loin dans ce cours, comment ce paradoxe, qu'on appelle le paradoxe d'Olbers, peut être levé aujourd'hui.

La loi de Hubble

1917, de Sitter avait trouvé, pour l'Univers, des solutions aux équations de la relativité générale proposée par Einstein et déjà auréolée de succès dans le Système solaire. Les solutions de de Sitter montraient que l'Univers était instable. Il ne pouvait être qu'en expansion ou en contraction. Certes, le modèle décrit considérait que l'Univers était vide de matière, dont notre seule présence témoignait du contraire... mais bon, admettons.

1925, Hubble venait de prouver que certaines des nébuleuses visibles sur les clichés astronomiques étaient des galaxies distantes, semblables à notre Voie lactée.

Plusieurs astronomes, dont Slipher et Lundmark, avaient bien noté une corrélation entre la distance probable de ces galaxies et leur vitesse, mesurée par le décalage des raies spectrales. Plus les galaxies étaient lointaines et plus elles nous fuyaient rapidement. Selon Lundmark, la vitesse semblait atteindre une valeur maximale. Il représenta la variation par une courbe qui s'infléchissait pour atteindre cette valeur maximale.

Dans le même temps, les théoriciens cherchaient une solution des équations d'Einstein, sans adopter comme de Sitter, l'hypothèse d'un Univers vide de matière. Tolman y parvint. Il publia son résultat dans la revue Astrophysical Journal (ApJ 69, 245). Son résultat était que la vitesse devait être simplement proportionnelle à la distance *D* :

$$\frac{\Delta\,\lambda}{\lambda} = K\,D$$

$\Delta\lambda/\lambda$ est le décalage spectral relatif, égal selon la loi de Doppler-Fizeau, à la vitesse de fuite de la galaxie considérée, divisée par la vitesse de la lumière c[24]. Pour cette galaxie, *D* est sa distance à l'observateur. *K* est la constante de proportionnalité. Tolman, dans le texte de son article, semble avoir été guidé par des résultats expérimentaux qui laissaient prévoir une telle relation, mais il ne cite pas ses sources.

Nous étions en 1929. Or, et ce point est important, Hubble avait publié un article dans cette même revue. Il est probable qu'il aura vu le résultat de Tolman. L'histoire ne le dit pas, toujours est-il que dans les semaines qui suivirent, Hubble publia un article où il montrait que les observations, en l'occurrence celles de Slipher (mais il ne cite pas non plus ses sources[25]) corroboraient parfaitement la loi de proportionnalité trouvée par Tolman. La loi de Hubble s'écrit donc simplement :

$$V = H\,\times D$$

Cette loi était la première loi générale applicable à l'Univers, dans son ensemble. Les galaxies, ces briques de l'Univers, peuvent donc être vues comme des particules libres se déplaçant selon les lignes d'espace-temps de la relativité générale.

Les équations les plus générales proposées par Einstein contenaient un terme (la constante cosmologique) dont le rôle était de gommer toute évolution, pour forcer l'Univers à être statique, selon un *a priori* de l'époque. Quand l'expansion fut observée par les astronomes, Einstein déclara que l'addition de la constante cosmologique pour permettre à l'Univers d'être statique, était « *la plus grosse erreur de sa vie* ». Avec plus de nuances, il écrira plus tard : *« La découverte de l'expansion des nébuleuses extragalactiques justifie le passage de la théorie à des solutions dynamiques de la structure de l'espace, une voie qui ne devait apparaître auparavant que comme une issue nécessitée par l'insuffisance de la théorie ».*

La constante cosmologique a été alors considérée comme nulle, car elle n'était plus nécessaire. Il faut cependant signaler que l'addition de cette constante par Einstein n'était pas totalement arbitraire. En effet, les équations ainsi modifiées satisfaisaient toujours aux postulats qui présidaient à la relativité générale. Elles étaient donc plus générales. On peut simplement dire que Einstein a apporté cette modification pour une mauvaise raison, mais la modification était justifiée et ce d'autant plus que des mesures récentes tendent à réhabiliter cette constante, non pas pour rendre l'Univers statique, mais au contraire pour expliquer une accélération de l'expansion. Nous reviendrons sur cette question à la fin de ce chapitre.

---

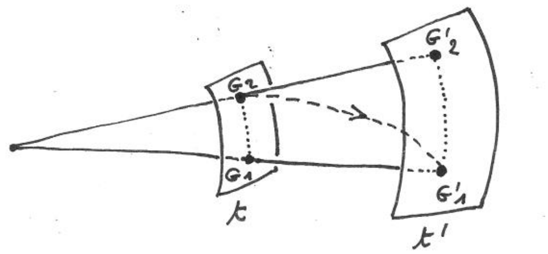
[24] Rappelons la relation de Doppler-Fizeau :

[25] $\Delta\lambda/\lambda = V/c$ Selon l'étude faite par A. Brémond.

Un modèle géométrique

L'Univers pouvait donc être décrit par les équations de la relativité générale. L'expansion générale de l'Univers, qui constituait la preuve évidente d'une évolution, obligeait à envisager que l'Univers ait eu un début et peut-être une fin.

Pour expliquer ces nouvelles observations, nous allons d'abord décrire l'Univers par un modèle très simple. L'Univers réel observable est à quatre dimensions. L'espace et le temps ne peuvent plus être considérés indépendamment l'un de l'autre. Pour visualiser un tel univers, ce n'est pas facile. Aussi ferons-nous une supposition simplificatrice : nous enlèverons une dimension d'espace.



Nous serons alors dans un monde plat possédant une longueur, une largeur et un temps. Le schéma ci-dessus représente l'Univers à deux instants t et t'. L'Univers est plat. Deux galaxies G1 et G2 sont figurées à l'instant t. Elles sont devenues G1' et G2' à l'instant t' quand l'Univers s'est expansé. Notons au passage que, si nous avions un grand nombre de galaxies, chacune d'elles aurait l'impression de voir les autres la fuir. Chacune se croirait au centre de ce gigantesque mouvement de fuite. On comprend que ce n'est qu'une illusion de plus que nous réservait la Nature.

Écrivons la vitesse qui résulte de l'expansion, en supposant que toutes les distances augmentent dans toutes les directions proportionnellement à un certain facteur d'échelle R, ce qui peut s'écrire : *D = K.R*, où K est la constante de proportionnalité et R le facteur d'échelle. La vitesse relative des deux galaxies est égale à l'accroissement de distance divisé par l'accroissement de temps :

$$V = \frac{D - D'}{t - t'} = K\,\frac{R - R'}{t - t'} = \frac{D}{R} \times \frac{R - R'}{t - t'}$$

La variation de R avec le temps est parfois notée $\dot{R}$ comme en mécanique rationnelle. La vitesse s'écrit alors :

$$V = H \times D$$

On reconnaît la loi de Hubble avec pour constante de Hubble :

$$H = \frac{\dot{R}}{R}$$

Mais alors, la constante de Hubble n'est pas une constante ?

Eh bien non ! Mais nous pouvons calculer sa valeur observable aujourd'hui (*voir « Mesure de distances » dans CC n° 116 p.15-18*). Nous adopterons *H* = 65(km/s)/Mpc.

L'âge de l'Univers

Le problème que l'on peut se poser est le suivant : comment le facteur d'échelle *R* varie-t-il avec le temps ?

Dans un premier temps, nous pouvons choisir la relation la plus simple possible. Par exemple une relation linéaire : *R = a.t + b*, où *a* et *b* sont des constantes inconnues.

Nous allons adopter une convention pour définir l'origine du temps. Nous dirons par exemple que *R = 0* pour *t = 0*. Vous voyez alors que cette convention conduit à *b = 0*.

En considérant alors deux instants *t* et *t'*, on calcule aisément : .

$$\dot{R} = \frac{R - R'}{t - t'}$$

On trouve alors :

$$\dot{R} = a$$

D'où nous déduisons :

$$H = \frac{1}{t}$$

La constante de Hubble est donc variable ! Elle varie comme l'inverse du temps. L'inverse de la constante de Hubble que nous observons aujourd'hui donne le « *temps de Hubble* ». L'âge de l'Univers est peut-être plus petit. En effet la relation entre R et t que suggèrent les équations de la relativité appliquée à la cosmologie n'est pas $R = a.t$ mais plutôt

$$R = a\,t^{2/3}$$

On trouve alors que l'âge de l'Univers est :

$$t = \frac{2}{3\,H}$$

Avec ce modèle et H = 65 (km/s)/Mpc on trouve que l'âge de l'Univers, en milliards d'années est à peu près de t = 10 milliards d'années. Il suffit de convertir les Mégaparsecs en kilomètres et les secondes en milliards d'années. C'est long, mais facile !

Regardons le plus loin possible

Dans notre modèle géométrique simple, quand nous observons une galaxie lointaine, quelle que soit sa direction, nous la voyons sur une nappe du passé, plus contractée que la nappe dans laquelle nous sommes aujourd'hui, car la lumière a eu besoin d'un temps important pour arriver jusqu'à nous et pendant ce temps l'Univers s'est dilaté. Quelle que soit la direction, notre regard plongera dans le passé et arrivera sur un univers plus condensé et donc plus chaud (comme pour un gaz que l'on comprimerait, la température augmente quand le volume diminue). Où que nous regardions, nous devrions voir le rayonnement de l'Univers primordial. Ce rayonnement a été observé. Il s'agit d'un corps émissif en équilibre (corps noir) à la température de 3 kelvins environ. En réalité, ce rayonnement était bien plus chaud dans l'Univers primordial, si chaud (3 700 kelvins), que les protons et les électrons ne pouvaient pas rester attachés les uns aux autres. Ce n'est qu'après s'être dilaté que l'Univers est devenu plus froid et que les protons et les électrons ont pu se combiner.

Avant cette combinaison, l'Univers était donc baigné d'électrons libres qui absorbaient les ondes électromagnétiques et les ré-émettaient dans toutes les directions. L'Univers n'était pas plus transparent qu'un brouillard qui diffuse la lumière. Ce n'est qu'à partir de cette combinaison que l'Univers est devenu transparent et que l'on a pu voir les premiers objets, les premières galaxies.

Combien y a-t-il de galaxies dans l'Univers observable ?

On pourrait penser que ce calcul est impossible. Pourtant nous allons essayer, au moins pour avoir une idée.
Introduisons tout d'abord la courbe de complétude. Si nous comptons toutes les galaxies d'éclat supérieur à une limite donnée (c'est-à-dire de magnitude apparente inférieure à une valeur limite) et que nous portions sur un graphique le logarithme du nombre trouvé en fonction de la magnitude limite, nous obtenons une courbe linéaire qui s'infléchit à une certaine magnitude, dite magnitude de complétude. La pente de la partie linéaire vaut à peu près 0,6.
La démonstration est assez simple même si la démonstration rigoureuse est assez subtile. Le nombre de galaxies N augmente comme le cube de la distance d, si la répartition est homogène. En notation logarithmique nous obtenons :

$$Log\,N = 3\,logd + cste$$

Or nous avons vu dans le cours numéro IX la relation qui lie la magnitude apparente à la distance et à la magnitude absolue en mégaparsecs:

$$m - M = 5\,log\,d + 25$$

Dans cette expression, d est en mégaparsecs. En combinant les deux relations, on trouve :

$$\log N = 0{,}6\,m - 0{,}6\,M + cste$$

Quelle que soit la magnitude absolue, la pente de la relation $log\,N = f(m)$ est de 0,6. Si on considère toutes les magnitudes absolues possibles, les galaxies les plus lumineuses, comme les plus faibles, le résultat sera le même.
Si on fait l'essai avec la base de données HYPERLEDA (*voir « La mesure des distances » CC n° 116 p.18*) on trouve que jusqu'à la magnitude m = 18 il y a environ 700 000 galaxies[26].
La relation de complétude a donc pour expression :

---

[26] Il faut faire la requête suivante : ***select*** count(*) **where** objtype='G' and bt<18. Le résultat était 743 784 galaxies au moment de l'écriture, il est de 771 997 aujourd'hui (janvier 2023).

$$log(700\,000) = 0{,}6 \times 18 + C$$

D'où : C = - 4,955.
Or, notre regard porte environ jusqu'à 10 milliards d'années-lumière. Combien de galaxies sont présentes dans ce volume ?
10 milliards d'années de lumière, c'est-à-dire 3 milliards de parsecs, ou 3 000 Mpc. Si nous reprenons la définition des magnitudes, nous pouvons calculer la magnitude apparente des plus faibles galaxies (*M* = - 15), à cette distance :

$$m = M + 5\,log\ (3\,000) + 25 = 27{,}4\,mag$$

Si nous observons toutes les galaxies plus brillantes que *m* = 27,4, la courbe de complétude précédente nous donne le nombre attendu :

$$log\,N = 0{,}6 \times 27{,}4 - 4{,}955 = 11{,}48$$

d'où *: N* = 300 milliards de galaxies, environ. Dans la réalité, la pente est souvent un peu inférieure à 0,6, comme si les galaxies se raréfiaient avec la distance. C'est une façon de lever le paradoxe de Olbers que nous présentions plus haut.

Ce calcul ne donne qu'une estimation très incertaine, mais elle a le mérite de nous montrer que l'Univers observable est extrêmement riche. Si on se rappelle qu'une galaxie peut contenir quelques centaines de milliards d'étoiles, on se trouve bien minuscule dans cet Univers.
Oserait-on dire maintenant que l'Univers est fait pour l'homme ? L'homme, petit microbe, sur une petite planète, orbitant autour d'une petite étoile, au milieu des 300 milliards d'étoiles semblables, membres d'une petite galaxie, elle-même perdue au milieu de milliards de galaxies semblables, dans un petit univers...

Oserait-on dire que la Terre est le seul endroit de l'Univers abritant de la matière vivante ? On ne peut s'empêcher de penser à Giordano Bruno, brûlé comme hérétique pour avoir dit que d'autres étoiles devaient abriter la vie. La découverte des galaxies conforte sa position.

On peut aussi se poser la question de savoir si la matière vivante ne serait pas une étape dans l'évolution de la matière (pas nécessairement l'aboutissement de l'évolution).
Nos conceptions philosophiques, voire religieuses, ne peuvent pas sortir indemnes d'une telle prise de conscience. Je vous avais prévenu, cette lecture était dangereuse.

Remerciements :
Je remercie tous ceux qui ont participé à ce regroupement d'articles.
Un grand merci tout particulièrement à P. Causeret, V. Hauguel, J.-M. Vienney, C. Lecoutre et G. Lecoutre.