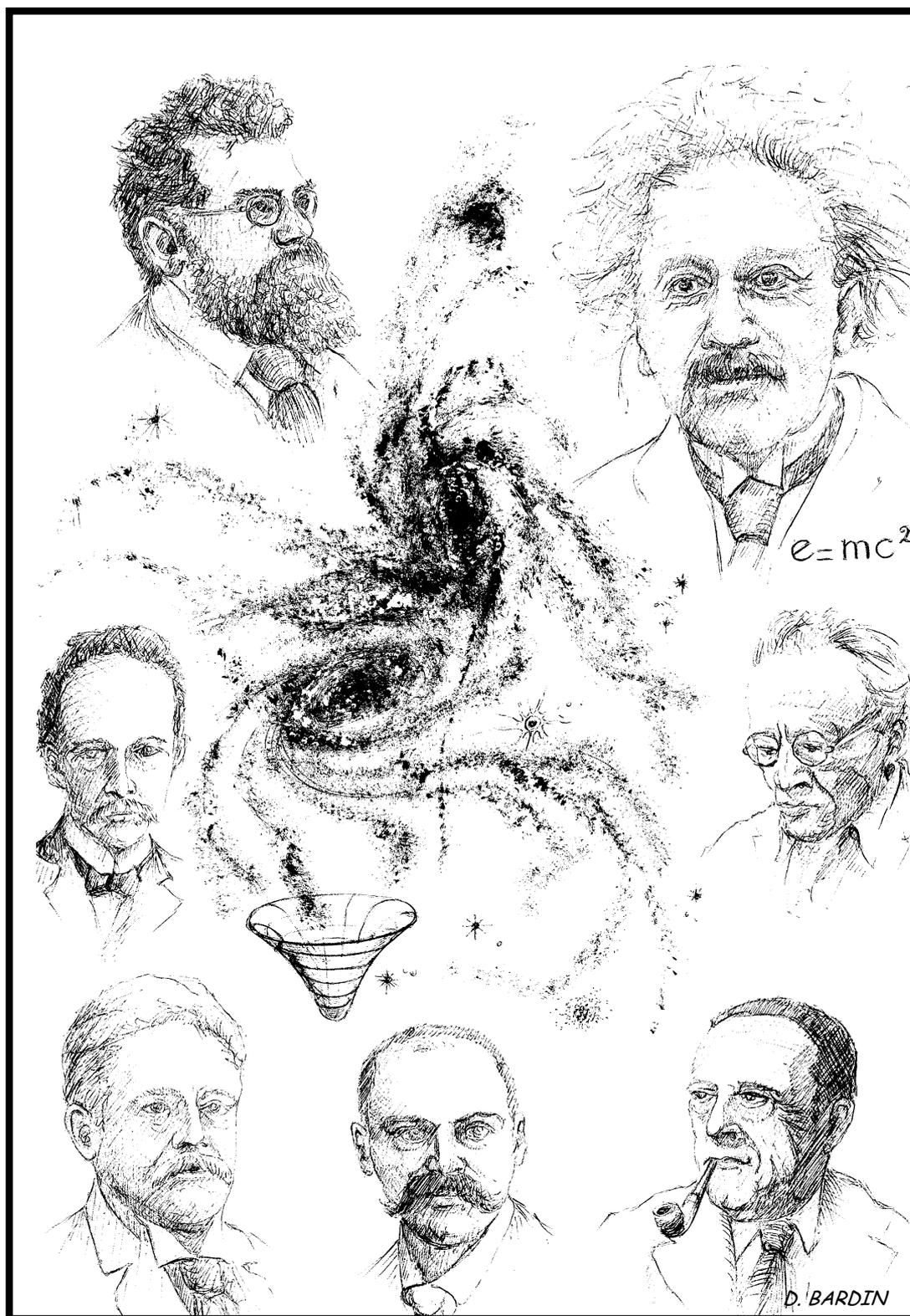


Les Cahiers Clairaut



numéro 112 - HIVER 2005

Comité de liaison enseignants astronomes

Le CLEA

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (écoles d'été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école primaire, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés. L'adresse est la suivante : C-L-E-A@yahoogroupes.fr.



Pour toute information s'adresser au siège du CLEA :

Laboratoire d'Astronomie, bât. 470

Université Paris Sud 91405 Orsay cedex

Tél./fax : 01 69 15 63 80

Adresse électronique :

CLEA : clea.astro@astro.u-psud.fr

Secrétaire : jean.a.ripert@wanadoo.fr

Le CLEA est présent sur internet à l'adresse :

<http://www.ac-nice.fr/clea>

Bureau du CLEA pour 2004

Présidents d'honneurs : Lucienne Gouguenheim,

Jean-Claude Pecker

Evry Schatzman

Gilbert Walusinski

Président : Georges Paturel

Trésorière : Béatrice Sandré

Trésorier Adjoint : Jacky Dupré

Rédacteur des Cahiers : Georges Paturel

Secrétaire : Jean Ripert

Secrétaire Adjointe : Cécile Ferrari

Responsable du site web : Francis Berthomieu

Rédacteurs Adjoints des Cahiers Clairaut

Daniel Bardin, Francis Berthomieu, Michel Bobin

Pierre Causeret, Frédéric Dahringer,

Charles-Henri Eyraud, Marie-Agnès Lahellec,

Christian Larcher, Chantal Petit, Jean Ripert,

Jean-Noël Terry, Daniel Toussaint

Associés de rédaction

Lucette Bottinelli, Jacky Dupré, Jean-Luc Fouquet,

Lucienne Gouguenheim, Colette Le Lay, Lucette Mayer

Philippe Merlin, Josée Sert

A PROPOS DE LA COUVERTURE

Deux galaxies entremêlées, en collision prochaine, sont distordues ; de plus, un "puit de gravitation", image relativiste bien connue, détourne quelques bras des spirales vers le bas. L'année 2005 célébrant l'essor de la physique en hommage à la publication du premier texte sur la Relativité en 1905, quelques portraits entourent le centre de l'image. Comme il était impossible de faire figurer "tous" les physiciens qui ont œuvré pour l'astronomie, il a fallu faire des choix. Qu'on veuille bien pardonner au dessinateur l'injustice de ces choix.

En partant d'Albert Einstein et en tournant dans le sens positif (à l'inverse des aiguilles des horloges), on trouve : Ludwig Boltzmann, Max Planck, Wilhelm Wien, Karl Schwarzschild, Edwin Powell Hubble, Erwin Schrödinger.

Daniel Bardin

Dessin de couverture : Daniel Bardin

Les Cahiers Clairaut

Hiver 2005 n° 112

EDITORIAL

Dans ce numéro nous terminons le dossier sur "L'Année Mondiale de la Physique" avec un article difficile mais important pour la physique. Il s'agit du texte de la conférence que Pierre Cheinet, jeune chercheur à l'observatoire de Paris, nous a donnée lors de l'Assemblée Générale 2004.

En avons-nous fini avec la physique ? Que les physiciens se rassurent, nous aurons l'occasion de reparler de physique, si vous le souhaitez.

Je dis : "si vous le souhaitez", car nous donnons dans ce numéro un questionnaire (p39). Si vous y répondez, vos remarques et vos suggestions seront prises en compte, afin que les Cahiers Clairaut répondent aussi fidèlement que possible à votre attente. Donc, n'hésitez pas à nous donner votre avis.

Pierre Causeret nous fournit les éléments pour exploiter les éclipses partielles de Soleil et calculer la distance Terre Lune.

Bonne lecture !

La Rédaction

patu@obs.univ-lyon1.fr

Cours

Cours élémentaire d'astrophysique
V III- Les étoiles mystérieuses
G. Paturel p. 2

Avec nos élèves

Calcul de la distance de la Lune à partir de l'éclipse du 3 octobre 2005
P. Causeret p.5

Observations

L'éclipse du 29 mars 2006
P. Causeret p.7

Histoire

Autour du mot "Mars" III
-L'héritage linguistique.
J.-L. Dewez, O. Dargent p.9

Histoire

Histoire du périgée lunaire
P. Lerich p.12

Réflexions

Enseigner l'astronomie : une brève histoire du CLEA
C. Larcher p.15

Dossier AMP 2005

Mesure absolue de l'attraction terrestre par interférométrie atomique et application à la définition d'une nouvelle unité de masse
P. Cheinet p. 16

Einstein, une petite chronologie
J.-N. Terry p. 23

Relativités et mécanique quantique
G. Paturel p. 26

Avec nos élèves

Un logiciel de la NASA modélisant la trajectoire de satellites réels. Son utilisation en Sciences Physique en TS
M.-A. Lahellec p.29

Curiosité

La loi de Benford
Ph. Paturel p.32

RUBRIQUES FIXES

p.34

- *Remue-méninges*
- *Lecture pour la Marquise*
- *La vie associative*
- *Courrier des lecteurs*

COURS

Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique : VIII- Les étoiles mystérieuses.

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

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 cours précédent, cours 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 des Watts. 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. : $(3 \times 10^{10})(2 \times 10^{12}) = 6 \times 10^{22}$

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 milliard de milliard 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 1000 Joules par seconde. La puissance reçue est de 1000 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 1000 Watts. Si vous calculez le nombre de mètres carrés ($S=4\pi R^2$) vous trouvez $S=3 \times 10^{23} \text{m}^2$. Donc la puissance que doit fournir le Soleil pour envoyer toute cette énergie à tous ces mètres carrés à chaque seconde est de : $1000 \times 3 \times 10^{23} = 0,3 \times 10^{27}$, soit 0.3 milliard de milliards de milliards de Watts.

Les savants avaient compris que l'âge du Soleil et de la Terre, était de plusieurs milliards d'années.

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 2000 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 sa propre masse 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 $6,67 \cdot 10^{-11}$ (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.

Equivalence masse et énergie

Einstein a déduit une relation étonnante $E = m \cdot c^2$. 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.

Dans le précédent Cahier (CC 111), nous avons présenté une des démonstrations originales de cette relation emblématique. 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. $E = m \cdot c^2$ 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 1,00813 g par mole (une mole est un paquet de 6×10^{23} atomes vrais). Donc quatre atomes d'Hydrogène ont une masse de 4,03252 g (toujours par mole). Or un atome d'Hélium a une masse de 4,00389 g. Donc les quatre atomes d'Hydrogène donnent un atome d'Hélium et il reste 0,02862 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 :

$$\frac{0.02862 \times 10^{-3}}{6 \times 10^{23}} (3 \times 10^8)^2 = 4,3 \times 10^{-12} \text{ Joules}$$

Vous avez reconnu la relation $E=mc^2$, 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 1,00813 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 :

$$1/2 \frac{2 \times 10^{30}}{666 \times 10^9} = 1,5 \times 10^{18} \text{ secondes}$$

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 chauffe 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.

■

AVEC NOS ELEVES

Calcul de la distance de la Lune à partir de l'éclipse du 3 octobre 2005

Pierre Causeret, pierre.causeret@wanadoo.fr

Résumé : Une photo de l'éclipse partielle du 3 octobre et la connaissance du lieu où l'éclipse était centrale à la même heure permettent de calculer la distance de la Lune. Les conditions météo très moyennes en France n'ont pas toujours permis de faire les photos désirées. Le calcul qui suit utilise une photo faite à Caen à 9h08 TU.

Première observation



Photo René Cavaroz

A 11h08 (9h08 TU), l'éclipse était partielle à StContest à côté de Caen (49,21° N et 0,40° O).

Deuxième observation

D'après l'IMCCE, l'éclipse était centrale à la même heure à Bouira à côté d'Alger (36,37° N et 3,92° O). Malheureusement, nous n'avons de photo de l'éclipse depuis Alger, le ciel y était couvert.

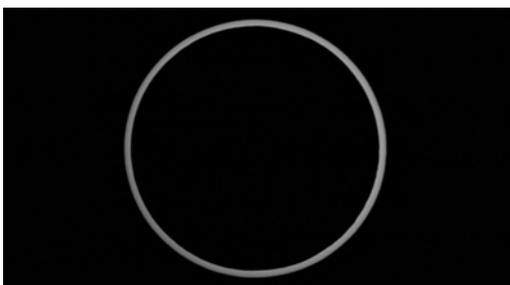


Photo Aurore Lasalle /

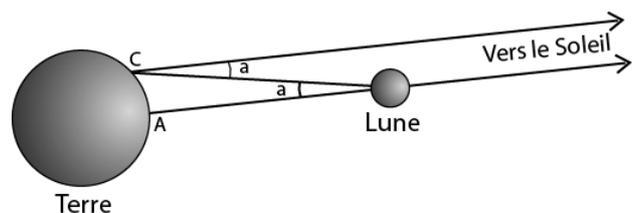
L'éclipse annulaire photographiée depuis Madrid

Principe

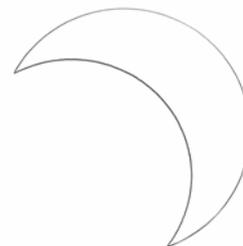
Vue depuis deux points éloignés de la Terre, la Lune n'a pas la même position par rapport au fond d'étoiles lointaines.

Sur le schéma ci-dessous, un observateur en A (Alger) voit la Lune devant le Soleil alors que pour un observateur en C (Caen), la direction de la Lune et la direction de cette étoile forment un angle a .

La mesure de cet angle et la connaissance de la distance entre les deux points d'observation vont permettre de déterminer la distance de la Lune.

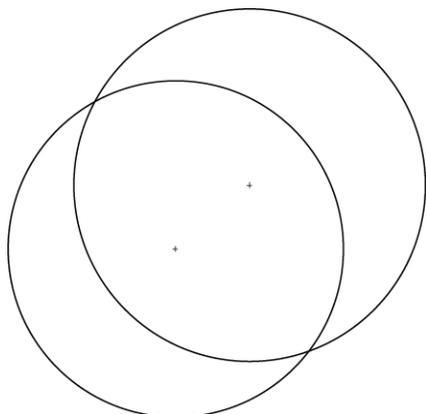


Calcul de l'angle a



On utilise la photo de l'éclipse prise à Caen. Elle a subi ici un traitement informatique (filtre contour). On cherche la distance angulaire entre le centre du disque Soleil et le centre du disque Lune. Il faut

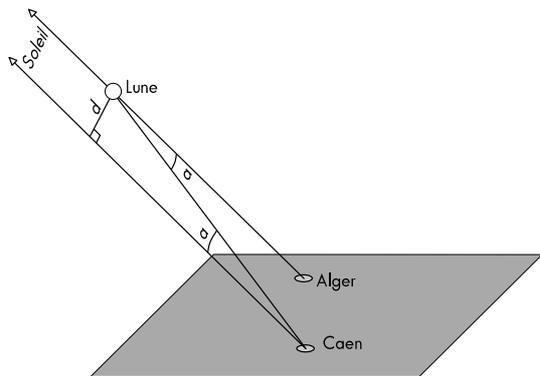
donc déjà tracer les deux disques. On peut trouver leur centre à l'intersection de médiatrices de cordes ou essayer avec un calque et des cercles de différents rayons. On obtient ainsi ces deux cercles.



Le diamètre du Soleil est de 53 mm sur l'image. Nous savons que le diamètre angulaire du Soleil était de $0,532^\circ$ ce jour-là, l'échelle est donc de $0,01^\circ/\text{mm}$. On mesure ensuite la distance en cm entre les deux centres, on obtient 15 mm donc $0,15^\circ$.

$$a \approx 0,15^\circ$$

Calcul de la distance d

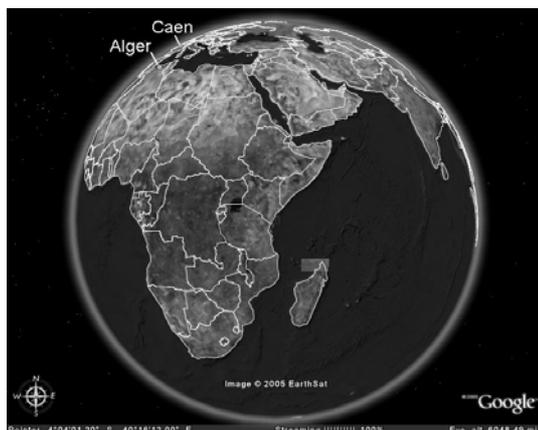


Pour trouver la distance de la Lune, il faut encore connaître la distance d entre les lignes de visée en direction du Soleil depuis Caen et Alger (parallèles sur le schéma). Plusieurs méthodes sont possibles.

On peut se servir d'une image de la Terre vue du Soleil le 3 octobre 2005 à 9h08 TU. On trouve ce type d'image sur le site suisse fourmilab (www.fourmilab.com/earthview/vplanet.html demander "view the Earth from the sun" puis entrer la date et l'heure). Fourmilab donne aussi les coordonnées du point se trouvant au centre ($4^\circ 4'S$ $40^\circ 16'E$).

La difficulté est de repérer Caen et Alger sur cette mappemonde. Je me suis alors servi de Google Earth dont beaucoup ont entendu parler et qui donne des images de la surface terrestre à partir de photos

satellitaires. J'ai fixé une étiquette précisément aux deux lieux d'observation connus par leurs coordonnées, j'ai ensuite demandé de viser le centre de l'image donnée par fourmilab et j'ai obtenu ceci :



On a donc ici la Terre vue du Soleil à l'heure de la photo (sans la Lune pour nous gêner). La distance d que l'on cherche doit être mesurée perpendiculairement à la ligne de visée Terre Soleil. C'est donc exactement la distance mesurée sur la carte.

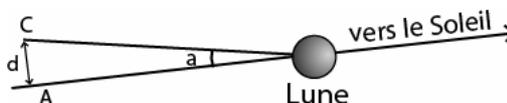
Le diamètre équatorial de la Terre est de 61 mm sur l'image pour 12756 km en réalité, ce qui donne une échelle de 209 km au mm.

La distance entre Caen et Alger mesurée sur l'image est de presque 5 mm soit 1000 km en réalité. Notons qu'il est plus facile d'utiliser l'image originale donnée par Google Earth puisque l'on peut travailler au pixel près. J'avais trouvé ainsi 990 km

$$d \approx 1000 \text{ km}$$

Distance de la Lune

On connaît a et d , il ne reste plus qu'à calculer la distance AL ou CL.



Avec une tangente, on obtient environ 382 000 km. On peut aussi le faire sans trigo, en assimilant le segment de longueur d à un arc de cercle centré sur L : le cercle complet mesure $1000/0,15 \times 360$ soit 2400000 km et on obtient le rayon en divisant par 2π . On trouve le même résultat : **Distance de la Lune : 382 000 km**

Ce jour-là, la Lune était située à 393 000 km, l'erreur est de 3%. Ce n'est pas si mal.

■

OBSERVATIONS

L'éclipse du 29 mars 2006

Pierre Causeret, pierre.causeret@wanadoo.fr

Résumé : *Encore une éclipse partielle en France, 6 mois après celle du 3 octobre. Ce sera à nouveau l'occasion de faire de belles observations, de superbes photos ou de calculer la distance de la Lune.*

Le phénomène

Le mercredi 29 mars, l'éclipse sera totale pour les observateurs bien placés. En effet, la Lune sera particulièrement proche, passant au périégée la veille, à 359 000 km de la Terre, alors que le 3 octobre dernier, elle était située à 396 000 km.

La ligne de totalité partira du Brésil, traversera ensuite l'Afrique pour se terminer en Chine. Les meilleurs sites d'observation seront situés au Niger, au Tchad et en Libye, la durée de la totalité y étant supérieure à 4 minutes.

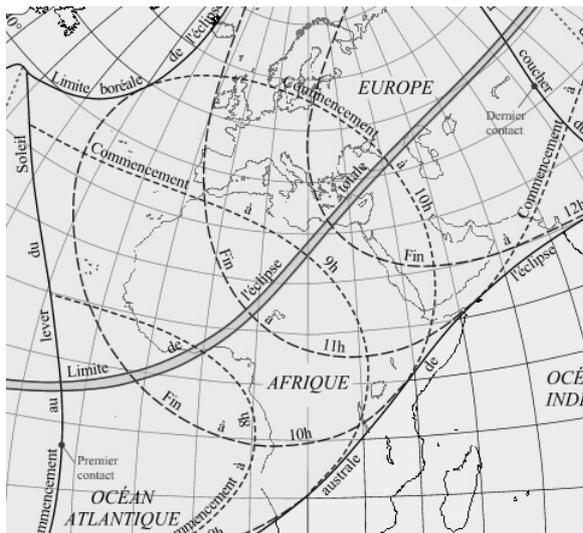
L'heure donnée pour le maximum de l'éclipse est 10h11. Cela correspond au moment où l'angle centre de la Lune – centre de la Terre – centre du Soleil est minimal. L'ombre de la Lune mesurera alors 184 km de large et se trouvera à la frontière du Tchad et de la Libye.

On trouvera tous les renseignements détaillés, horaires, carte de la zone centrale... sur le site de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides (www.imcce.fr, choisir éphémérides, éclipses de Soleil puis 29 mars 2006). Toutes les données présentées ici proviennent de l'IMCCE.

L'éclipse en France

Le maximum aura lieu peu après 10h20 dans l'ouest de la France et aux alentours de 10h40 dans l'est en Temps Universel. Comme nous serons à l'heure d'été depuis 3 jours, il sera donc plus de midi en heure légale. Ce peut être l'occasion d'organiser une observation à la sortie des cours.

Le Soleil sera éclipsé à moins de 20% en Bretagne (grandeur < 0,3) et jusqu'à 38% à Nice (grandeur 0,48). Le pourcentage donné est un rapport de surface (surface obscurcie du disque solaire / surface totale du disque) alors que la grandeur est un rapport de distances angulaires.



La zone de centralité traverse l'Afrique et la Turquie (carte extraite du site de l'IMCCE)

Ville	Début	Maxi'	%	Fin
Bordeaux	11h29	12h23	23,6	13h19
Lille	11h44	12h36	21,5	13h29
Lyon	11h33	12h31	30,3	13h31
Marseille	11h27	12h29	34,9	13h31
Nice	11h29	12h32	37,5	13h36
Paris	11h39	12h32	22,6	13h27
Rennes	11h37	12h27	18,5	13h18
Strasbourg	11h40	12h39	30,5	13h37
Toulouse	11h27	12h24	28,1	13h23

Les horaires de l'éclipse pour quelques villes de France donnés en heure légale.

Vous pouvez reprendre les activités proposées dans le précédent numéro des Cahiers Clairaut. Pour calculer la distance de la Lune, on pourra aussi utiliser la méthode décrite dans ce numéro en

prenant une photo à 10h11 TU sachant qu'à cette heure, l'éclipse est totale à 16°46'E 23°9'N.

Le 29 mars 2005 à 10h11 TU

Distance Terre Soleil : 149 400 000 km

Distance Terre Lune : 360 500 km

(données de centre à centre)

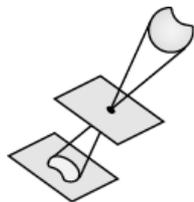
Comment observer l'éclipse

Manque d'informations, difficultés pour trouver des lunettes, divers problèmes ont empêché de nombreux élèves d'observer l'éclipse de Soleil du 3 octobre dernier. Nous avons la chance d'avoir à nouveau une éclipse partielle le 29 mars 2006. Ce serait dommage de priver nos élèves de ce spectacle gratuit. Voici donc les principaux moyens pour l'observer sans danger.

Les méthodes par projection

1. Le carton troué

Prenez une feuille épaisse ou un carton noir et percez-y un trou d'environ 1 mm de diamètre.



Placez votre feuille au Soleil, un petit rayon de lumière passera par le trou et si vous mettez une feuille blanche derrière à une cinquantaine de centimètres, vous obtiendrez en temps normal une petite tache lumineuse circulaire. Si vous faites l'expérience pendant l'éclipse, votre tache aura la forme du Soleil éclipsé.

2. Le tube en carton

Avec un tube en carton assez long (de 50 cm à 1 m), on peut construire une chambre noire : on ferme le tube d'un côté par un carton noir percé d'un trou de 1 mm environ, de l'autre par un papier calque.



On vise le Soleil sans le regarder, en utilisant l'ombre du tube, et on obtient une tache lumineuse sur le calque, c'est l'image du Soleil. Celle-ci est relativement petite, à peine 1 cm pour un tube de 1 m de long.

3. Derrière des jumelles ou une lunette

On utilise une paire de jumelles ou une lunette sur pied dirigée vers le Soleil. On met derrière l'oculaire une feuille



blanche sur laquelle se projette le Soleil.

C'est une méthode qui donne une bonne image, particulièrement pratique pour observer à plusieurs et sans aucun danger à condition que personne ne regarde à travers les jumelles ou la lunette sous peine de se brûler gravement les yeux. Il faut donc surveiller ce matériel en permanence. Sur le même principe, on trouve aussi des "solarscopes" ; leur avantage est qu'on ne peut pas y mettre l'œil à l'oculaire.

Les filtres

1. Filtre sans instrument

On trouve dans le commerce trois types de filtres : les filtres en mylar (efficaces à condition de n'être ni froissés ni pliés), le polymère (plus résistant) et le verre de soudeur grade 14 (qui a l'avantage de pouvoir être utilisé de longues années).



Filtre en polymère fixé sur un carton percé.

Ces filtres peuvent être fixés sur un support en carton ou sur des lunettes... Il faut éviter tous les autres filtres non testés. On peut acheter des lunettes en mylar ou en poly-mère toutes faites ainsi que des verres de soudeur grade 14 collés sur support.

2. Filtre sur instrument

C'est la méthode qui donne les plus belles images mais c'est aussi la plus onéreuse. On utilise une lunette ou un télescope muni d'un filtre pleine ouverture pour le Soleil fixé solidement à l'entrée de l'instrument. Il est fortement déconseillé d'utiliser les petits filtres qui se vissent sur l'oculaire, ils peuvent chauffer et se fendre.



Adresses utiles

Solarscope : www.solarscope.com

Verre de soudeur n°14 fixé sur support

www.viseclipse.com

Association Retina France :

www.retina-france.asso.fr/eclipse.html

Filtres en polymère ou en mylar : On en trouve dans la plupart des magasins d'astronomie, chez de nombreux opticiens et sur Internet

■



L'observation de l'éclipse a été parfois gênée par les nuages et parfois par des directives trop frileuses. Ne perdons pas une occasion de former les élèves à la contemplation des phénomènes naturels en leur signalant, bien entendu, les précautions élémentaires de sécurité. Mais il faut aussi former les maîtres. GP.

HISTOIRE

Autour du mot MARS

Jean-Luc Dewez¹ et Olivier Dargent²

Résumé : *Après avoir examiné, dans un article précédent, l'origine du mot Mars, l'héritage mythologique et symbolique que nous en avons reçu, les auteurs discutent de l'héritage linguistique. Vous trouverez dans ce texte une multitude de références courantes à ce mot qui évoque la guerre et l'astronomie (science pourtant très pacifique)*

L'héritage linguistique

Le nom du dieu a laissé de nombreuses traces directes ou indirectes. Le nom de la planète a été abondamment utilisé par la science-fiction, souvent comme simple alibi, ou référence. La planète Mars est souvent présentée comme l'origine d'invasisseurs, depuis "La Guerre des Mondes"

jusqu'à "Mars attacks". Par simplification, un extra-terrestre supposé est vite appelé Martien. Ce n'est donc souvent qu'un mot sans grande signification.

Deux adjectifs spécialisés

Martien(ne)(s), relatif à la planète, se distingue bien de martial(e)(s), relatif à la guerre (cour martiale, loi

martiale) mais aussi, souvent, avec un sens restreint et positif : idée d'énergie, d'assurance, de détermination au combat, et non de violence effective.

Au fait, pourquoi écrire martien et pas marsien ? Toujours à cause du latin ! Le radical du nom Mars était en fait Mart- (il servait pour tous les autres cas de la déclinaison, sauf le nominatif), et les dérivés latins utilisaient le t. Notre prononciation, en revanche, dans ce cas comme dans beaucoup d'autres (séquence de phonèmes [tia] ou [tio] en latin), résulte d'une évolution phonétique qui fait qu'elle ne correspond plus à l'orthographe : le t se prononce s !

Noms communs

Mars pouvait être aussi un nom commun masculin pluriel : l'expression « Les mars » désignait toutes les céréales susceptibles d'être cultivées dès le mois de mars (avoine, orge, millet).

Un verbe auquel nous avons échappé ...

On s'est naguère posé la question de savoir s'il faudrait créer un dérivé "amarsir" sur le modèle d'alunir. On a heureusement préféré élargir le sens d'atterrir.

Périphrases classiques pour la guerre ou le métier militaire : Jeux de Mars, travaux de Mars, métier de Mars.

Un hasard linguistique amusant

Dans l'Iliade, "Arès-Mars" aidait le camp des Troyens (voir aussi Mythologie Romaine). Mais on retrouve curieusement les Troyens associés à ... la planète Mars ! En effet, en astronomie, les troyens sont des petits corps, normalement des astéroïdes, placés à proximité d'un des points de Lagrange (L4 ou L5) d'une planète, c'est-à-dire sur la même orbite qu'elle, mais 60° devant ou derrière. Dans le système solaire, Jupiter possède deux essaims de troyens, mais on a également pu repérer deux troyens de Mars.

Calendrier et dérivés

La date historique la plus célèbre pour le mois de mars : le 15 mars -44, Jules César fut assassiné au Sénat par des conjurés républicains. Avec César disparaissait un prestigieux imperator (c'est-à-dire généralissime, et nom empereur, ce que César n'a jamais été) : pour certains contemporains, c'était donc en quelque sorte un affront fait au dieu de la guerre, et les conjurés ne pouvaient qu'être châtiés ultérieurement par le dieu. Mars recevra en effet le

surnom d'Ultor (le Vengeur), sous le règne d'Auguste, pour célébrer la défaite des assassins de Jules César.

Mardi : "*Martialis dies*" jour de Mars, est à l'origine de notre mardi.

Mois de Mars : Mars était, logiquement, le premier mois de l'année dans le calendrier romain (voir Mythologie romaine), même s'il était consacré à Mercure et non à Mars : renouveau du printemps, mais aussi et surtout, reprise des opérations militaires. Les Romains se voyaient avant tout, du moins au cours des premiers siècles de leur histoire, comme des paysans-soldats, dont le modèle est resté le fameux Cincinnatus, passant et repassant de la charrue au glaive...

Il y aura peut-être un jour du blé de Mars (cultivé sur Mars), mais le blé de mars (sans majuscule) est celui qui est semé au mois de mars, le blé de printemps.

Comme Mars en Carême : locution ancienne, signifiant nécessairement, inévitablement : la période traditionnelle du carême (les quarante jours précédant Pâques) occupait toujours en partie le mois de mars.

Chat de Mars : Matou (ou tout ce qui peut y être comparé !) né en mars, donc particulièrement vigoureux et batailleur.

Un lièvre de Mars, c'est un lièvre rendu fou par le printemps : c'est un des personnages célèbres d'Alice au Pays des Merveilles.

Une bande dessinée récente reprend l'expression pour titre, par jeu de mots plus que par analogie : le personnage ainsi désigné est un fuyard qui porte un lourd secret en relation avec un séjour sur la planète Mars. Il doit donc courir comme un lièvre traqué.

Onomastique, prénoms et noms de personnes

Un des dix-huit prénoms masculins des Romains, Marcus, est un hommage à Mars (et c'est le seul se référant à un dieu !). Une des grandes familles de l'aristocratie était la gens Marcia. Autres variantes : Marius, Martinus. Ainsi nos Marc, Marcel, Martial, et même Martin, prénoms ou noms, avec leurs variantes, continuent-ils, souvent à leur insu ou sinon pour leur plus ou moins grand agrément, à honorer le dieu du combat sanglant !

Le nom de famille Mars n'est pas inhabituel, notamment dans les pays anglo-saxons, mais il peut avoir différentes origines, en particuliers écossaises. Toutes ne sont d'ailleurs pas connues, l'étymologie des noms propres, sans doute plus encore que celle des autres mots, a ses limites...

Saint Mars : ermite breton (vers 500, près de Vitré). Fête le 21 juin. Peut-être devait-il son nom au mois, ou à un lieu. Ne pas le confondre avec Saint Médard, évêque de Noyon au IX^{ème} siècle, né à Salency, dont le nom s'est parfois déformé en Mard ou Mars ! (ainsi dans Cinq-Mars)

Cinq-Mars : aristocrate français qui avait comploté contre Richelieu, décapité à 22 ans. Son destin tragique a inspiré le roman historique Cinq-Mars d'Alfred de Vigny (1826). Son nom venait de celui d'une localité (il était marquis de Cinq Mars, Eure et Loir) qui illustre bien les pièges de l'étymologie toponymique (voir le cas de Marseille) : elle s'était antérieurement appelée Saint-Mars, mais le Mars en question était en fait, suite à déformation, le saint picard Médard, dont le nom avait été contracté en Mard, puis Mars...

Mademoiselle Mars était le pseudonyme, le nom de scène, sous lequel s'est rendue célèbre l'actrice française, Anne Françoise Hippolyte Boutet (1779-1847). Incomparable pour les contemporains dans les rôles d'ingénues puis de coquettes de Molière et de Marivaux elle était entrée à la Comédie-Française en 1799, elle y resta jusqu'en 1838. Surtout, elle créa le rôle de Doña Sol dans Hernani de Victor Hugo (1830). Ses rapports avec Hugo ne furent pas faciles, ne serait-ce que parce qu'elle préférait le classicisme au romantisme. On dit aussi qu'elle fut l'actrice préférée de l'empereur Napoléon I^{er}. Celui-ci devait l'admirer aussi pour son nom, lui qui a tant sacrifié au dieu Mars ...

Toponymie, noms de lieux. Champ de Mars

À Rome : Champ de manœuvres militaires, extérieur au cœur de la cité, où les armes étaient interdites. Il servait aussi à certaines cérémonies en l'honneur du dieu.

À Paris : Espace créé sous Louis XV, face à l'École Militaire, pour les dix mille hommes qui formaient les troupes de la Maison du Roi (corps d'élite chargés de la sécurité directe du roi et de son entourage). Sous la Révolution, c'est là qu'ont été organisés la plupart des grands rassemblements et des grandes fêtes politiques, ce qui a fait dire plus tard à l'historien Jules Michelet : " Le Champ de Mars, voilà le seul monument qu'a laissé la Révolution !"

Sous la Révolution Française : En 1794, une tentative de création d'une école nationale d'officiers, si mal organisée et avec si peu de moyens qu'elle ne dura pas six mois.

Le salon de Mars était la première pièce du Grand Appartement de Louis XIV à Versailles. Il s'agissait de la Salle des Gardes. Son caractère guerrier et les sujets de la décoration, s'expliquent

donc par cette fonction, mais aussi par l'importance que Louis XIV attachait à son image de roi guerrier. Beaucoup de noms de lieux en France ou ailleurs contiennent l'élément Mars ou un équivalent. Il y a eu dans certains cas un lien avec un édifice nommé d'après le dieu ou une personne dont le nom en était tiré de la racine Mars (Marcus, Marcianus, etc.). Il s'agit aussi très souvent d'une racine celtique désignant plus prosaïquement une zone marécageuse.

Quant à la toponymie de la planète Mars, elle a pu être (et sans doute sera) alimentée par des inspirations diverses, mais la mythologie classique et le latin ont été très utilisés.

Étymologies trompeuses

Attention aux étymologies hasardeuses ou improvisées : Marsouins et Marsupiaux n'ont aucun rapport avec Mars !

Marseille, colonie grecque à l'origine, ne doit rien au dieu Mars. L'origine du nom grec, Massilia, est inconnue.

Quant à la Marseillaise, elle doit bien sûr son nom au fait que des volontaires marseillais l'ont fait connaître aux Parisiens en août 1792. Mais ce chant guerrier, martial par excellence (certains s'en plaindraient même aujourd'hui) a dû être nommé ainsi d'autant plus volontiers que le mot retrouvait ainsi une filiation d'adoption avec Mars dieu de la guerre, et c'est d'ailleurs sous ces auspices que sera remportée quelques semaines plus tard la décisive victoire de Valmy.

¹ Professeur de Lettres au lycée Marie Curie, Nogent-sur-Oise (60).

jldewez@wanadoo.fr

² Professeur de Sciences de la vie, de la Terre et de l'univers au lycée Marie Curie, Nogent-sur-Oise
olivier.dargent@free.fr

Groupe d'étude : Sous-Direction des Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Education, Ministère de l'Education Nationale.



HISTOIRE

Histoire du périégée lunaire

Pierre Lerich

Résumé : *Le mouvement du périégée lunaire a été, pendant un demi-siècle, le pire casse-tête de l'astronomie. Newton lui-même déclarait que ce problème lui donnait des migraines et qu'il ne voulait plus s'en occuper ; mais il n'a jamais cessé d'y réfléchir et semble être arrivé très près de la solution. Les efforts des plus grands mathématiciens du XVIIIème siècle (Clairaut, d'Alembert, Euler) ont fini par triompher de ce défi astronomique.*

D'un périégée au suivant, la Lune peut accomplir beaucoup plus ou beaucoup moins qu'une révolution. Par exemple, elle peut parcourir 370° ou 350° . La succession des périégées est si capricieuse qu'il est impossible, sur une demi-douzaine de périégées observés, de mettre en évidence une quelconque régularité. La tentation est grande de considérer cette succession comme aléatoire. Pourtant, au bout de vingt ou trente lunaisons, un mouvement moyen apparaît : environ 363° entre un périégée et le suivant, mais les écarts, autour de cette moyenne sont considérables. Le problème de Newton n'était pas de trouver ce mouvement moyen, qui était connu depuis longtemps par l'observation sur une longue durée (au périégée, le diamètre apparent est maximum), mais d'expliquer ce mouvement par la gravitation, comme il l'avait fait pour plusieurs autres mouvements célestes (mouvement rétrograde de la ligne des nœuds, variation lunaire, précession des équinoxes, etc...).

Une section entière des PRINCIPIA est consacrée à ce problème : comment une petite variation de l'exposant -2 de la gravitation entraîne nécessairement une avance ou un retard du périégée et inversement, un mouvement quelconque du périégée prouve que l'attraction subie n'est pas strictement proportionnelle à l'inverse du carré de la distance. Une petite force «étrangère» doit nécessairement s'ajouter à la force principale ou s'en retrancher et perturber le système. Dans le cas du système Terre-Lune, le Soleil diminue la « pesanteur » de la Lune vers la Terre d'une petite fraction ($1/357$ en moyenne), ce qui doit nécessairement entraîner une avance du périégée. La

Lune est un peu «paresseuse» pour revenir à sa distance initiale de la Terre, il lui faut donc un peu plus d'une révolution. Newton applique donc sa méthode à la Lune et trouve une avance du périégée d'environ $1,5^\circ$ à chaque révolution, au lieu des 3° qu'il espérait trouver. Pourtant, la méthode est convaincante. Le lecteur moderne, après avoir suivi pas à pas tout le raisonnement sans trouver aucun point douteux ou obscur et après avoir refait le calcul final qui est très simple, trouve le même résultat, environ la moitié de ce qu'il faudrait trouver. Ce résultat n'est pas non plus complètement faux, car il est du même ordre de grandeur (la moitié, ce n'est pas si mal) et il est dans le bon sens. Un mouvement rétrograde aurait été beaucoup plus décourageant. Il va de soi que Newton n'était pas satisfait : il a continué de travailler la question de temps en temps, parmi beaucoup d'autres occupations.

Comment se peut-il qu'un raisonnement sérieux donne un résultat faux, alors que Newton avait résolu de façon satisfaisante d'autres problèmes tout aussi difficiles (par exemple, le mouvement rétrograde des nœuds) ?

Il y avait là un grand mystère, le périégée lunaire apparaissant comme un cas particulier réfractaire aux méthodes habituelles. La Loi du carré inverse fut même suspectée : elle comportait peut être certaines exceptions ? Peut être fallait-il, dans le cas de la Lune, ajouter à la loi ordinaire une petite quantité inversement proportionnelle au cube de la distance ? Cette proposition de Clairaut permettait d'obtenir un résultat satisfaisant, conforme aux observations. On conservait la méthode de Newton,

mais on modifiait l'exposant de la gravitation. Cela ressemblait un peu à une manipulation. Clairaut lui-même avait des doutes et continuait de chercher dans une toute autre direction. C'était l'époque (1^{ère} moitié du XVIII^{ème} siècle) de l'explosion du calcul différentiel et intégral, à laquelle Newton avait puissamment contribué, tout en affichant sa préférence pour les méthodes géométriques. Plutôt que raisonner sur une figure, on pouvait aussi poser une équation rassemblant les forces, les masses et les positions des astres à un instant donné et calculer l'évolution ultérieure du système. C'est en rejetant la géométrie et en perfectionnant le calcul que Clairaut et d'Alembert obtinrent des résultats assez satisfaisants. L'idée était d'ailleurs dans l'air du temps. La géométrie c'était le passé, le calcul c'était l'avenir. Cependant, Newton n'avait pas tort non plus quand il disait qu'avec la géométrie, on ne perd jamais de vue l'objet dont on s'occupe, alors que le calcul se développe selon ses propres règles, efficaces mais peu attrayantes selon lui.

Il reste à comprendre pourquoi le calcul a réussi là où la géométrie avait échoué. Dans beaucoup de problèmes astronomiques, une certaine cause produit un certain effet, lequel à son tour modifie quelque peu la cause. Cette cause modifiée produit un effet supplémentaire (on parle alors d'un effet « du second ordre ») qui, de nouveau, modifie encore un peu la cause et cet échange entre la cause et l'effet se poursuit à l'infini, les termes ajoutés étant de plus en plus petits. Selon la précision désirée, on ajoute plus ou moins de termes à ce développement. Dans le cas du périhélie lunaire, l'avance du périhélie dépend de la distance angulaire entre le Soleil et ce périhélie. Quand le Soleil traverse la ligne des apsides, le périhélie avance rapidement (0,3° par jour environ) et tend à suivre le Soleil comme s'il essayait vainement de le rattraper. Cette avance rapide dans le même sens tend à prolonger la cause de cette rapidité. Inversement, quand le Soleil passe par la perpendiculaire à la ligne des apsides, environ trois mois plus tard, le périhélie rétrograde d'environ 0,2° par jour comme s'il essayait de fuir le Soleil, et ce mouvement rétrograde tend à abrégier la cause de cette rétrogradation. Ce rapport complexe entre le Soleil et le périhélie lunaire est entièrement contenu dans l'équation différentielle qui définit le mouvement. Il faut résoudre cette équation (l'intégrer) pour connaître le déplacement total du périhélie au bout d'un temps donné. En considérant seulement la diminution moyenne de l'attraction terrestre sur la Lune, Newton simplifiait beaucoup le problème puisqu'il supposait un mouvement régulier du périhélie, alors que ce mouvement est

alternativement direct et rétrograde avec des vitesses différentes pendant des temps différents et, finalement, une prédominance du mouvement direct. Newton avait parfaitement compris tout cela, comme on peut le constater dans la magistrale section XI des PRINCIPIA. Mais quelle figure géométrique serait capable de traduire ce mouvement alternativement direct et rétrograde ? Par quelle construction pourrait-on tirer de cette figure un mouvement moyen ? Newton a, sans doute, espéré que la force moyenne donnerait un déplacement moyen du périhélie plus ou moins conforme aux observations. Mais, dans ce cas précis, cette moyenne « élémentaire » n'a que peu de rapport avec la vraie moyenne résultant du mouvement alterné. Celle-ci n'a rien d'intuitif ni de prévisible a priori, elle résulte d'un calcul difficile et très long si l'on désire un résultat précis. La géométrie ne permettait pas d'explorer toute la complexité du problème. La méthode de Newton était trop simple, réduite à une cause et un effet, comme s'il n'y avait pas de rétroaction de l'effet sur la cause. Or, c'est justement dans le cas du périhélie lunaire que cette rétroaction est la plus forte, responsable de la moitié environ du mouvement total. D'où le résultat peu satisfaisant trouvé par Newton : la moitié du mouvement réel.

Cependant, dans les papiers et brouillons rassemblés après la mort de Newton, on a trouvé une équation différentielle qui permettait d'approcher à 10 % près la solution du problème, cette fois par le calcul et non plus par la géométrie. Si Newton avait vécu encore quelques années de plus (il est mort à 85 ans) il aurait peut-être développé cette nouvelle méthode pour l'introduire dans les PRINCIPIA qu'il avait l'habitude de corriger et de modifier d'une édition à l'autre. Mais il a fallu encore un siècle, même après les progrès décisifs apportés par Clairaut et d'Alembert, pour obtenir un mouvement moyen du périhélie vraiment satisfaisant et conforme aux observations.

La géométrie est tout de même bien utile pour visualiser les résultats du calcul. On trouve ainsi, dans l'Astronomie Générale de DANJON (Ed. Blanchard, réimp. 1986), une excellente représentation graphique du mouvement du périhélie lunaire due à Euler, contemporain de Clairaut et de d'Alembert, qui a représenté sur la même figure le mouvement du périhélie et la variation de l'excentricité qui en est inséparable. Cette figure, qui rappelle un peu les épicycles de l'antiquité, montre très bien le mouvement alterné du périhélie et son avance moyenne, mais elle ne pouvait être tracée que grâce aux résultats donnés par le calcul. Euler n'a pas cherché à situer ce phénomène par

rapport au Soleil. Si on veut visualiser le mouvement du périhélie par rapport au Soleil, on peut imaginer ce petit scénario. Supposons l'orbite lunaire immobile dans l'espace, le Soleil tournant autour d'elle en un an. La règle est simple : le Soleil repousse le grand axe et attire le petit axe. Considérons le Soleil 45° (ou 45 jours environ) avant son passage devant le périhélie. Celui-ci, d'abord immobile, commence à avancer, repoussé par le Soleil. Comme il se met en mouvement assez lentement, le Soleil le rattrape et dès qu'il le dépasse, il commence à le freiner en continuant de le repousser, cette fois vers l'arrière jusqu'à l'immobiliser. Ayant alors dépassé le périhélie de 45° , le Soleil commence à attirer le petit axe et l'ellipse se remet en mouvement, mais cette fois dans le sens rétrograde. Le Soleil passe en face du petit axe et freine son mouvement rétrograde puisqu'il l'attire toujours. Au moment où le petit axe s'arrête, le Soleil commence à repousser l'autre

extrémité du grand axe (l'apogée). L'ellipse repart dans le sens direct et tout le processus recommence indéfiniment.

On peut aussi, en utilisant une éphéméride, visualiser les longitudes des périhélie successifs en les portant sur un graphe (longitudes en ordonnée, temps en abscisse ou simplement révolutions lunaires prises comme unités de temps). Les périhélie successifs dessinent une courbe en dents de scie dont les segments montants sont plus longs que les segments descendants. L'ensemble de la courbe monte donc lentement et on retrouve ainsi l'avance moyenne du périhélie de 3° environ par révolution. Cinq ou six périhélie donnaient l'impression d'une succession aléatoire. Il en faut une vingtaine (soit environ 18 mois) pour visualiser trois périodes de la courbe (trois dents de la scie) et apprécier la belle régularité du phénomène. ■

Au fil des perles des enseignants et des astronomes

L'éclipse du 3 octobre dernier nous a fourni quelques perles. La première avait été imaginée comme une fiction dans le dessin que nous vous présentons à la page 9. Mais, Eric Josselin nous a appris, lors de l'Assemblée Générale de Rouen, que cette fiction avait été bien réelle. Un élève lui avait effectivement demandé s'il pourrait regarder le Soleil quand l'éclipse serait finie. La réalité égale la fiction !

Une autre perle, sur le même sujet, nous a été rapportée par Liliane Vilas, également lors de l'AG. Liliane voulait intervenir dans une classe, le matin de l'éclipse, pour montrer le phénomène aux enfants. Elle en a parlé à l'institutrice de la classe qui lui a répondu : "Ce lundi matin nous sommes très occupés. Pourriez vous venir plutôt l'après-midi".

Cette réflexion est à rapprocher de celle d'une courtisane de la cour de Louis XIV, qui, ayant manqué l'observation d'une éclipse avait déclaré à ses amies : "je connais bien l'astronome, il nous la montrera".

Quelques bonnes nouvelles pour 2006

Lors de l'Assemblée Générale de Rouen, il a été décidé de **baisser les prix** des anciens numéros des Cahiers Clairaut (voir page 36). Les diapositives seront aussi assez largement distribuées car nous sommes en train de passer aux images numériques (toute la collection des diapositives a été numérisée).

Avec l'abonnement 2006 vous recevrez le CDROM des archives des Cahiers Clairaut. Plus de 100 numéros sur un seul CD ! Vous pourrez y retrouver les premiers articles dans leur format original.

Les prochains Cahiers Clairaut devraient être **publiés en couleur**. Nous pourrions ainsi publier des photos en couleurs et rendre textes et graphiques plus lisibles.

Pour faciliter la tâche de notre nouveau trésorier, nous vous demandons de renouveler votre abonnement avant l'équinoxe de printemps (mars). Vous bénéficierez alors d'**un abonnement à prix réduit**.

Enseigner l'astronomie : Une brève histoire du CLEA

C. Larcher,

Le CLEA (comité de liaison enseignants astronomes) est une association qui réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement. Ils focalisent leur action sur la formation des enseignants et la réalisation de matériel pédagogique.

La création du CLEA

Le CLEA a été créé pour répondre à une requête formulée par la Commission « Enseignement de l'Astronomie » de l'« Union Astronomique Internationale » (UAI) à Grenoble en 1976. A cette époque, en France, l'astronomie était totalement absente des programmes scolaires. La grande aventure commença le 2 septembre 1976 avec la promesse des astronomes de répondre à cette demande. La première Ecole d'Été eut lieu à Lanslebourg-Mont-Cenis en 1977.

Le premier numéro de la revue du CLEA Les « Cahiers Clairaut » parut au printemps 1978, puis à raison de 4 numéros par an (aux équinoxes et aux solstices). Le numéro 110 est paru à l'automne 2005. Chaque numéro contient un article de fond, des propositions d'activité pour les élèves, des informations d'actualité, des études historiques...

Pourquoi enseigner l'astronomie ?

Le choix d'enseigner l'astronomie a pour finalités éducatives de montrer la place de l'Homme dans l'Univers, l'universalité des phénomènes et des lois qui les expliquent et de fournir une belle illustration de la démarche scientifique. Elle constitue un excellent exemple de l'interaction entre la science, la culture et la technologie dans tous ses aspects historiques et contemporains. L'astrophysicien Evry Schatzman l'exprimait clairement dans le numéro 39-40 des « Cahiers Clairaut » :

« Ce qui est à la fois un avantage et un inconvénient de l'astronomie est son lien millénaire à la vie humaine, avec tout le symbolisme qui a été vu dans le mouvement des astres, véritable projection de l'âme humaine sur le ciel. Reconnaître la réalité physique des astres et de leurs propriétés, c'est un peu chasser les dieux du ciel et se retrouver face à face avec une autre réalité : la réalité

des sociétés humaines. C'est renvoyer l'homme à la nécessité de se prendre en charge ».

Son caractère pluridisciplinaire constitue un double intérêt : donner l'occasion de montrer aux élèves que la connaissance n'est pas aussi morcelée que ce qui apparaît au sein des programmes et montrer que les avancées de la connaissance se font justement par des approches de nature pluridisciplinaire.

Les méthodes du CLEA

Le CLEA a des correspondants dans presque toutes les académies. Son objectif essentiel est de fournir aux enseignants des outils (intellectuels et pratiques) leur permettant de construire eux-mêmes leur propre démarche. Toutes les séances reposent sur la base d'observations, même quand des documents de substitution sont proposées (par exemple l'observation des taches solaires permettant de déterminer la vitesse de rotation du Soleil ; les phases de la Lune ; le mouvement de rétrogradation des planètes ; l'interprétation d'un spectre solaire...

Les documents qui décrivent ces activités sont toujours largement expérimentés avant d'être diffusés.

La situation aujourd'hui

Les programmes récents d'enseignement incorporent des thèmes d'astronomie. Mais le traitement de ces thèmes peut entraîner une dérive qui consisterait à s'en tenir à un niveau trop superficiel, expérimenter pour expérimenter sans mettre en évidence la problématique et le cheminement d'une démarche construite. On peut craindre que l'on s'en tienne au seul aspect motivant de l'astronomie sans faire acquérir une méthodologie et un mode de raisonnement en même temps que des connaissances. ■

DOSSIER : AMP2005

Mesure absolue de l'attraction terrestre par interférométrie atomique et application à la définition d'une nouvelle unité de masse

Patrick Cheinet

LNE-SYRTE Observatoire de Paris, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris
patrick.cheinet@obspm.fr

Résumé : *Le kilogramme étalon est le dernier artefact du système international d'unités et il a été observé que sa masse dérive au cours du temps. L'expérience dite de balance du Watt est une des pistes envisagées pour changer la définition de la masse en la reliant à une constante fondamentale : la constante de Planck h . Dans cette expérience, une connaissance très précise de l'attraction terrestre g est nécessaire. C'est pourquoi le LNE-SYRTE a décidé de construire un gravimètre absolu basé sur l'interférométrie atomique et utilisant des atomes froids.*

Introduction

Le kilogramme, unité de masse du système international (S.I.), est défini comme la masse d'un cylindre en alliage de platine et d'iridium appelé prototype international et conservé au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). Plusieurs copies ont été fabriquées et comparées régulièrement avec le prototype international [1]. L'exactitude de ces pesées a alors permis la mise en évidence d'une dérive des masses allant jusqu'à 10^{-7} de variation relative sur le siècle dernier ($\sim 100 \mu\text{g}$). Or rien ne permet de distinguer si c'est la masse du prototype international qui varie ou bien celle de ses copies. Cet inconvénient vient de l'utilisation d'un objet matériel unique et altérable comme définition de la masse et il est maintenant envisagé de changer cette définition.

Pour cela, plusieurs moyens sont explorés et notamment de relier le kilogramme à la constante de Planck h , qui est une constante fondamentale qui intervient dans de nombreux domaines de la physique quantique. Le lien sera effectué à l'aide d'une balance électromagnétique appelée balance du Watt [2], qui comparera une puissance générée

électriquement avec une puissance mécanique. Sa mise en œuvre suppose de mesurer simultanément un grand nombre de grandeurs physiques. L'objectif à atteindre afin de changer de définition est une incertitude relative de 10^{-8} sur le kilogramme et il faut pour cela que chaque grandeur physique soit mesurée avec une incertitude encore plus faible. Notamment l'accélération terrestre g , qui intervient dans la puissance mécanique, doit donc être mesurée avec une exactitude de 10^{-9} .

Afin de mesurer g , le LNE-SYRTE (Laboratoire National de Métrologie et d'Essai-Systèmes de Références Temps Espace) a opté pour la réalisation d'un gravimètre absolu, interféromètre à atomes froids. Cette technique permet de mesurer à l'aide de trois impulsions laser, la position en trois instants d'atomes froids en chute libre. On extrait ensuite l'accélération moyenne subie entre les impulsions.

Nous verrons dans la première partie comment est réalisée la pesée afin de ne comporter que des grandeurs physiques mesurables avec une précision suffisante.

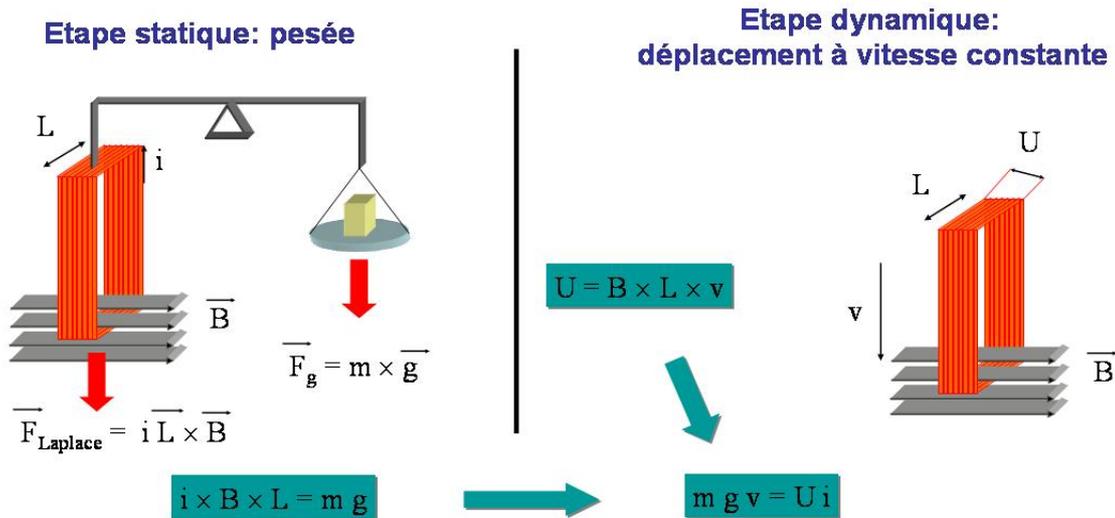


Figure 1 : *principe de mesure de la balance du Watt. Dans une première étape, une pesée équilibre le poids exercé par la pesanteur et la force de Laplace exercée sur une bobine parcourue par un courant en présence d'un champ magnétique. Dans une deuxième étape, la bobine est déplacée à vitesse constante dans le champ magnétique et on mesure la tension qui apparaît à ses bornes. La combinaison des deux étapes permet d'obtenir l'équation clé de la balance du Watt*

La deuxième partie présente les différentes mesures nécessaires pour calibrer la balance. Nous verrons alors que cette calibration fournit un lien entre le prototype international et la constante de Planck. Nous nous concentrerons ensuite sur la mesure de l'attraction terrestre. Dans la troisième partie, nous verrons comment refroidir et piéger des atomes. Enfin dans la quatrième et dernière partie, nous développerons le principe de la mesure de g par interférométrie.

La balance du watt : la mesure

Commençons donc par préciser le principe de la balance du watt. La mesure se déroule en deux étapes. La première (étape statique) met en oeuvre une masse connue m . Cette masse n'est pas le prototype international car son alliage de platine et d'iridium ne présente pas toutes les propriétés physiques nécessaires à la réalisation de l'expérience (amagnétisme, dureté, stabilité de masse lors de la mise sous vide...). Des alliages à base d'or et de platine sont donc actuellement étudiés pour réaliser cette masse m qui sera étalonnée par comparaison avec le prototype international. On réalise alors une pesée à l'aide d'une balance à fléau en équilibrant la force $m \cdot g$ exercée sur la masse par l'attraction terrestre d'un côté, par une force électromagnétique de l'autre

côté (figure 1, gauche). La force électromagnétique employée est la force de Laplace exercée sur une bobine carrée de côté L , dont un côté est plongé dans un champ magnétique uniforme B , et parcourue par un courant i . A l'équilibre, on obtient alors l'équation 1.

$$iBL = mg \quad (\text{Eq. 1})$$

Cette équation requiert la connaissance du produit BL que les moyens actuels ne permettent pas de mesurer avec une exactitude suffisante. Une seconde étape dite dynamique (figure 1, droite) est alors réalisée, où la même bobine est déplacée verticalement à vitesse constante v dans le champ magnétique. La variation du flux magnétique traversant la bobine génère à ses bornes, selon la loi de Lenz, une force électromotrice induite U (équation 2).

$$U = BLv \quad (\text{Eq. 2})$$

On peut alors combiner les équations 1 et 2 pour éliminer les termes B et L et on obtient ainsi l'équation 3 dans laquelle le premier terme correspond à une puissance électrique tandis que le second correspond à une puissance mécanique.

$$mgv = Ui \text{ (Eq. 3)}$$

En pratique, le courant i est mesuré indirectement à partir de la chute de tension V qu'il provoque aux bornes d'une résistance de référence R , ce qui amène enfin à l'équation 4.

$$mgv = \frac{UV}{R} \text{ (Eq. 4)}$$

La balance du watt : les références électriques

Nous disposons maintenant d'une mesure de la masse par rapport à deux grandeurs électriques qui présentent l'avantage d'être mesurables avec une grande précision. Voyons maintenant comment on réalise leur mesure. Deux phénomènes quantiques macroscopiques, l'effet Josephson et l'effet Hall quantique, sont utilisés pour mesurer les tensions et la résistance. Chacun permet d'exprimer ces valeurs en fonction de deux constantes fondamentales : la charge de l'électron e et la constante de Planck h .

L'effet Josephson [3,4] apparaît sur des structures constituées de deux matériaux supraconducteurs séparés par une fine barrière isolante (figure 2). Un tel système est appelé jonction Josephson. A basse température, le courant dans un supraconducteur est porté par des électrons associés par paires, dites paires de Cooper, ayant toutes le même état quantique décrit par une seule fonction d'onde macroscopique. Cela revient à dire qu'elles présentent toutes exactement les mêmes caractéristiques physiques.

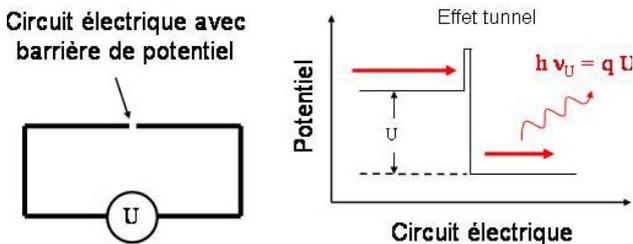


Figure 2 : Effet Josephson. En traversant la barrière de potentiel, une paire d'électrons émet un photon. La fréquence du photon dépend de la tension U appliquée.

Lorsque la barrière isolante, séparant les deux supraconducteurs, est suffisamment fine, les paires

de Cooper peuvent alors la traverser par effet tunnel et un courant peut s'établir. Si une tension continue U est appliquée à la jonction, un courant alternatif de fréquence ν_U apparaît.

En termes quantiques, la génération d'un courant alternatif correspond à l'émission de photons : Les paires de Cooper ayant traversé la jonction ont alors un excédent d'énergie correspondant à l'énergie potentielle $E=qU$. Elles libèrent cet excédent d'énergie sous la forme d'un photon. En physique quantique, l'énergie d'un photon est déduite de sa fréquence ν_U par le biais de la constante de Planck : $E_{ph}=h\nu_U$. On déduit donc l'équation 5.

$$E_{ph} = h\nu_U = qU \text{ (Eq. 5)}$$

Où q est la charge d'une paire de Cooper ($q=2e$). La mesure de la fréquence de ces photons renseigne donc sur la tension appliquée qui est donc donnée par l'équation 6 :

$$U = \frac{h\nu_U}{2e} \text{ (Eq. 6)}$$

En pratique, la mesure de la fréquence n'est pas aisée et l'effet inverse est utilisé pour matérialiser des tensions de référence. Un signal micro-onde de fréquence connue, délivré par une horloge atomique, est appliqué à la jonction qui génère alors à ses bornes la tension continue dont la valeur est définie par l'équation 6. Par convention internationale, la valeur du rapport fréquence tension, proportionnel à $2e/h$, a été fixée à 483594 GHz/V en 1990. Les niveaux d'incertitude atteints lors de la mise en œuvre de références de tension à effet Josephson sont couramment de l'ordre de 10^{-10} en valeur relative.

De façon similaire, l'effet Hall quantique [5,6] est utilisé comme référence pour la mesure des résistances. Ce phénomène est une propriété des gaz d'électrons bidimensionnels (confinés dans un plan) soumis à un champ magnétique perpendiculaire à leur plan. Un tel gaz est obtenu dans une fine couche de matériau semi-conducteur refroidie en dessous d'une température critique, qui vaut typiquement 1,5 K. Lorsque le gaz d'électrons est parcouru par un courant i et est soumis à un fort champ magnétique B' perpendiculaire, il voit une tension U_H se développer perpendiculairement au sens d'écoulement du courant électrique, à cause de la force de Laplace exercée par le champ magnétique sur les électrons en mouvement. La

figure 3 représente la mesure de la résistance de Hall quantique, définie par l'équation 7, aux bornes d'un échantillon :

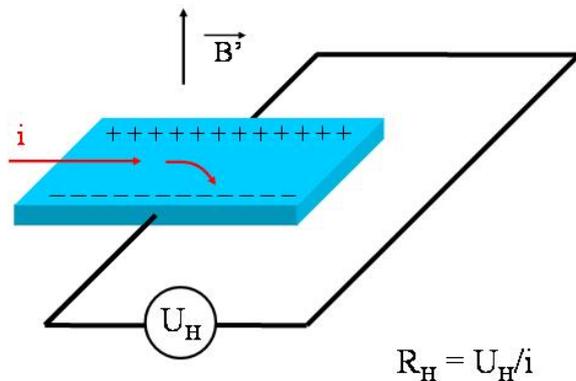


Figure 3 : Effet Hall quantique. Un ruban conducteur sous un champ magnétique B' , et parcouru par un courant i , développe une tension U_H perpendiculairement au champ et au courant. En dessous d'une température critique, la quantification des électrons impose à la résistance de Hall R_H des valeurs discrètes.

Dans un conducteur en volume, la résistance de Hall est proportionnelle au champ magnétique B' . Dans le cas du gaz bidimensionnel, elle prend des valeurs discrètes. Les électrons ne peuvent plus avoir que des énergies discrètes que l'on appelle niveaux d'énergie de Landau. La résistance de Hall R_H présente alors des plateaux dont les valeurs constantes ne peuvent prendre que les valeurs $h/(ne^2)$ où n est un entier dépendant du champ magnétique.

$$R_H = \frac{U_H}{i} = \frac{h}{ne^2} \text{ (Eq. 7)}$$

Comme pour l'effet Josephson, la valeur du rapport tension/courant proportionnel à h/e^2 a été fixée par convention à 25812,807 Ω en 1990. Les niveaux d'incertitude atteints lors de la mise en œuvre de l'effet Hall quantique comme référence de résistance sont couramment de l'ordre de 1.10^{-9} en valeur relative.

On utilise les deux effets que nous venons de décrire pour mesurer la résistance et les tensions présentes dans l'équation 4. Cela conduit alors à exprimer la puissance électrique (équation 8) sous la forme du produit de la constante de Planck, de deux fréquences Josephson (mesures de U et de V)

et d'un terme de proportionnalité A relatif à la comparaison de R à R_H .

$$\frac{UV}{R} = h\nu_U\nu_V A \text{ (Eq. 8)}$$

La vitesse v de la bobine est quant à elle asservie à une valeur connue, par interférométrie optique. Un des miroirs d'un interféromètre est fixé sur la bobine. On peut alors mesurer son déplacement et l'asservir avec une précision de l'ordre d'une fraction de la longueur d'onde du laser utilisé ($\lambda \sim 5.10^{-7}$ m). Il reste à mesurer l'accélération de la pesanteur avec l'incertitude requise pour pouvoir écrire l'équation 9.

$$\frac{h}{m} = \frac{gv}{A\nu_U\nu_V} \text{ (Eq. 9)}$$

Cette relation montre comment déterminer, dans le cadre actuel du S.I., une valeur de la constante de Planck. Cette mesure, répétée dans le temps, permettrait de déterminer d'éventuelles variations de masse du prototype international du kilogramme.

Enfin, un consensus international similaire à celui qui a conduit à changer la définition du mètre en adoptant une valeur conventionnelle de la vitesse de la lumière, pourrait conduire à une nouvelle définition du kilogramme à partir de la valeur de la constante de Planck. Cette définition garantirait l'invariance de l'unité de masse et donnerait la possibilité de la matérialiser en tout lieu, puisqu'elle serait alors indépendante du prototype international.

Gravimètre absolu : refroidissement d'atomes

Nous avons maintenant obtenu une équation permettant de définir l'unité de masse à partir de la constante de Planck. Cependant l'attraction terrestre g est une grandeur qui dépend de l'emplacement de la mesure et du temps. Il faut donc la mesurer en même temps que l'on réalise la pesée. L'objectif est de mesurer l'attraction terrestre g avec une exactitude de 10^{-9} g. Or la seule méthode connue pour mesurer g de manière absolue est de mesurer l'accélération d'un objet en chute libre, par rapport au référentiel du laboratoire [7,8].

L'utilisation d'un nuage d'atomes froids, plutôt qu'un objet macroscopique, permet de réaliser l'expérience à une fréquence plus élevée (4

Hz contre ~ 0.1 Hz) afin d'acquies plus de données et donc de moyenniser plus vite le bruit de la mesure. Nous allons voir maintenant comment fonctionne notre gravimètre atomique et tout d'abord comment refroidir des atomes en utilisant les propriétés de l'effet Doppler. Cette étape est nécessaire afin de contrôler la vitesse et la trajectoire des atomes qui ont, à température ambiante, une vitesse caractéristique de 300 m.s^{-1} ($\sim 1000 \text{ km/h}$). Considérons une onde, sonore ou électromagnétique, émise par une source en mouvement par rapport à un observateur.

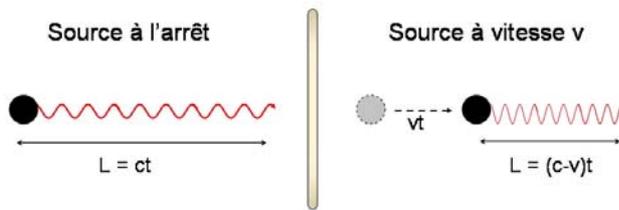


Figure 4 : Effet Doppler. La fréquence d'une onde est modifiée si la source est en mouvement. L'énergie qui lui est associée est elle aussi modifiée.

Comme on le voit sur la figure 4, ce mouvement affecte la fréquence apparente de l'onde puisque le nombre d'oscillations observées pour une durée donnée est modifié par le déplacement de la source. Cela change aussi l'énergie : si la source se rapproche, l'énergie reçue est plus élevée que si la source était immobile. De même si la source s'éloigne, l'énergie reçue est plus faible. Ce phénomène est appelé effet Doppler. Il explique par exemple que la sirène d'une ambulance paraisse plus aiguë lorsqu'elle se rapproche et plus grave lorsqu'elle s'éloigne.

De plus, comme on peut le voir sur la figure 5, un atome qui absorbe un photon est dans le même temps poussé dans le sens de propagation du photon absorbé selon le principe de conservation de la

quantité de mouvement. On dit qu'il acquies la quantité de mouvement p du photon donnée par l'équation 10. Celle-ci est faible, résultant en un changement de vitesse de quelques millimètres par seconde.

$$p = \hbar k \text{ (Eq. 10)}$$

Mais l'atome peut absorber un grand nombre de photons en un temps très court, jusqu'à des millions par seconde. Cela permet alors de transmettre à un atome une accélération considérable, de l'ordre de $10^5 g$. On peut donc aisément arrêter un atome de vitesse élevée et le soutenir contre la gravité terrestre.

Enfin les atomes possèdent des niveaux d'énergie définis auxquels ils peuvent accéder. On voit sur la partie droite de la figure 5 qu'un atome peut absorber un photon à la condition que ce photon apporte une énergie suffisamment proche de la différence d'énergie ΔE entre ses niveaux d'énergie. On appelle cet écart l'énergie de transition.

Il est maintenant possible de combiner ces différentes propriétés afin d'obtenir un mécanisme de refroidissement. On utilise un laser dont l'énergie des photons est légèrement inférieure à l'énergie de transition. On voit alors sur la figure 6 au centre que si un atome éclairé par ce laser est à l'arrêt, la probabilité qu'il absorbe un photon est alors faible et le laser n'exerce presque pas de force sur l'atome. L'énergie du laser est symbolisée par les flèches vertes et l'énergie apparente vue par l'atome est symbolisée par les flèches rouges. Si l'atome s'éloigne du laser (à gauche), l'énergie apparente des photons sera, par effet Doppler, encore plus faible et la probabilité d'absorption devient négligeable.

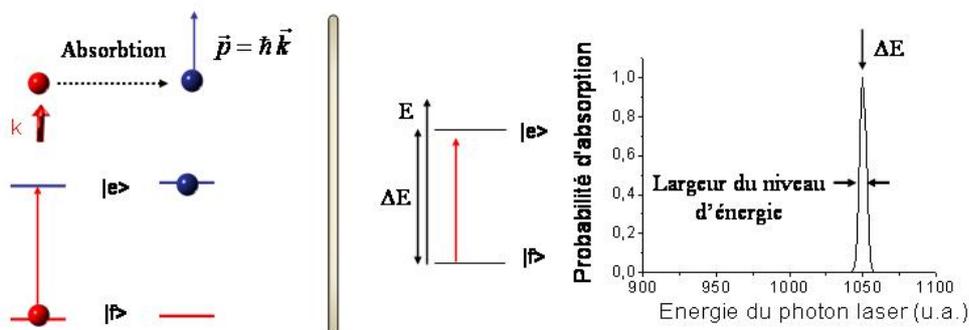


Figure 5 : Absorption d'un photon. Un atome absorbant un photon est poussé dans la direction incidente du photon. Il ne peut absorber un photon que si son énergie correspond à l'écart d'énergie entre les « niveaux énergétiques » de l'atome.

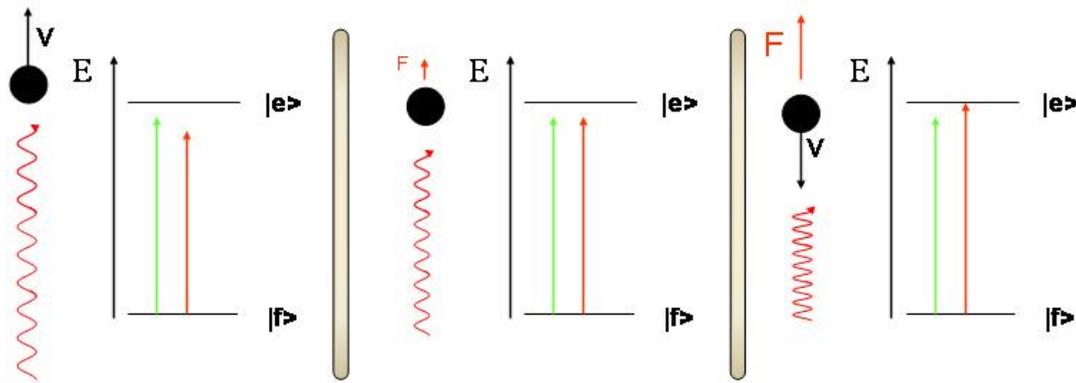


Figure 6 : Refroidissement Doppler. L'énergie du laser au repos (vert) est inférieure à l'énergie de transition. Un atome s'éloignant n'est pas affecté par le laser tandis qu'un atome s'approchant est freiné efficacement.

Par contre si l'atome a une vitesse en direction du laser (à droite), l'énergie apparente est alors plus proche de l'énergie de transition et la probabilité d'absorption devient importante. Le laser va exercer une force de freinage sur l'atome.

En éclairant un volume de tous côtés, dans les trois dimensions, tout atome entrant dans cette zone est freiné puisqu'il subit une pression de radiation qui est automatiquement opposée à son déplacement quelle que soit sa vitesse initiale. L'atome est comme freiné par un liquide visqueux et on a appelé ce système une mélasse optique. Cela va donc réduire l'agitation thermique d'une vapeur de cet atome et on obtient un nuage d'atomes refroidis.

Afin de disposer d'un très grand nombre d'atomes, il faut rajouter une force de piégeage. On peut montrer qu'il est possible de rajouter un champ magnétique variant dans l'espace et de choisir la polarisation des lasers pour créer une force de rappel. Un atome, par exemple trop à droite, absorbera plus de photons venant de la droite et sera repoussé vers le centre, où le champ magnétique est nul. On accumulera alors les atomes dans ce qu'on appelle un piège magnéto-optique. La configuration que l'on obtient alors est représentée sur la figure 7. Pour créer le champ magnétique du piège, on utilise deux bobines circulaires parcourues par des courants égaux mais dans des sens opposés. On obtient un piège avec des polarisations circulaires des faisceaux lasers (σ^+ ou σ^-). Cette technique est décrite avec plus de détails dans [9].

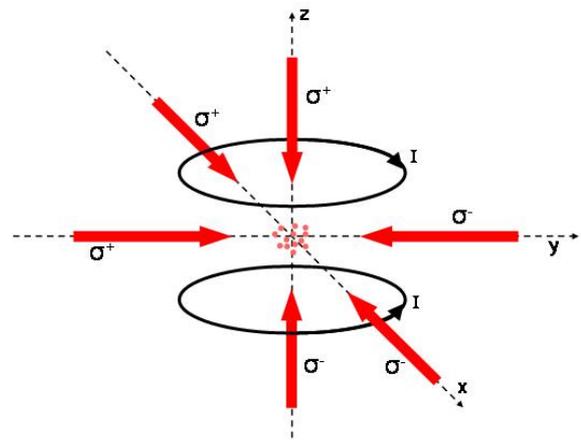


Figure 7 : Piège magnéto-optique à 3 dimensions. Une paire de bobines, associée à six faisceaux lasers convenablement polarisés, réalise le piège.

On peut ainsi capturer et refroidir à quelques μK , jusqu'à un milliard d'atomes en quelques centaines de millisecondes. Ceci correspond à une vitesse d'agitation thermique de 1 cm par seconde environ au lieu de 300 m par seconde.

Gravimètre absolu : l'interféromètre

Nous avons maintenant une source d'atomes refroidis. Leur vitesse est faible et ils peuvent être libérés tout en contrôlant leur trajectoire. Le piège est donc éteint et les atomes tombent en chute libre sous l'effet de la gravité. On va alors réaliser l'interféromètre atomique qui est schématisé sur la figure 8. Trois impulsions lasers sont appliquées aux atomes, pendant leur chute, à intervalles réguliers T .

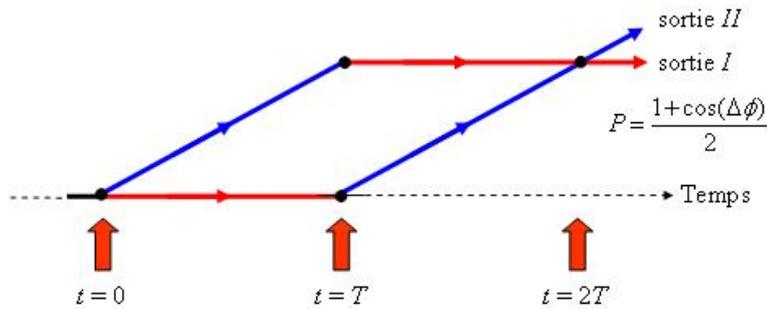


Figure 8 : Interféromètre atomique. Une suite de trois interactions avec des lasers sépare, puis recombine les fonctions d'ondes atomiques. Le nombre d'atomes dans les deux niveaux, fondamental et excité, à la sortie de l'interféromètre, dépend de l'accélération terrestre.

La première impulsion laser est telle que l'atome a une probabilité de 50 % de changer de niveau d'énergie. L'absorption d'un photon transfère alors une différence de vitesse qui induit une séparation spatiale des atomes en deux bras de l'interféromètre. Après un temps T , la deuxième impulsion est telle que tous les atomes changent d'énergie, soit en revenant au niveau d'énergie initial pour les atomes ayant déjà effectué la transition, soit en effectuant la transition pour la première fois. Cela va en même temps intervertir les vitesses dans les deux bras. Après un second temps T , les deux bras se seront donc rejoints et une troisième et dernière impulsion ferme l'interféromètre. Les atomes pourront soit émettre un photon pour revenir dans le niveau d'énergie initial (sortie I), soit absorber un photon et finir dans le niveau de haute énergie (sortie II). D'après la mécanique quantique, chaque atome sera passé partiellement par les deux bras à la fois ! Les propriétés physiques peuvent évoluer différemment sur chaque bras, entraînant une différence de phase de l'onde atomique entre chaque bras. L'état de sortie dépend de cette différence de phase au moment de la fermeture de l'interféromètre. Autrement dit, le nombre respectif d'atomes dans les deux sorties dépend de ce qu'on appelle la phase interférométrique Φ et les probabilités sont données par l'équation 11.

$$P = \frac{1 \pm \cos(\Phi)}{2} \text{ (Eq. 11)}$$

Enfin la phase interférométrique est liée à l'accélération terrestre g : à chaque impulsion, les atomes changeant de niveau vont aussi acquérir ou perdre la phase φ de l'onde laser. Or cette phase dépend de l'instant de l'impulsion mais aussi de la

position z des atomes à cet instant, selon l'équation 12, où w est la fréquence du laser, t l'instant de l'impulsion et k le vecteur d'onde du laser.

$$\varphi = (wt + kz) \text{ (Eq. 12)}$$

Les atomes étant en chute libre, leur position au cours du temps est donnée par la loi de Newton (Eq. 13). On peut alors montrer que la phase interférométrique est donnée en fonction de g par l'équation 14, où on rappelle que T est le temps écoulé entre chaque impulsion laser de l'interféromètre.

$$z = \frac{gt^2}{2} \text{ (Eq. 13)}$$

$$\Phi = kgT^2 \text{ (Eq. 14)}$$

Ainsi mesurer la probabilité de transition à travers l'interféromètre permet de connaître la phase Φ (Eq. 11) et donc l'accélération terrestre g (Eq. 14). La sensibilité du gravimètre dépendra du rapport entre le déphasage total Φ et le plus petit déphasage observable $\delta\Phi$. Dans d'autres expériences de physique atomique, il a déjà été montré qu'il est possible de mesurer des déphasages de 1 mrad. Pour atteindre une sensibilité de $10^{-9} g$, il faut alors avoir 10^6 rad de déphasage interférométrique. Cela est facilement réalisable avec un temps total dans l'interféromètre de $2T = 100$ ms et une chute libre d'à peine 10 cm.

Conclusion

Nous avons donc vu que l'unité de masse a besoin d'être redéfinie et que la Balance du Watt est une des méthodes envisagées. Dans le cadre de ce projet, une mesure absolue de l'accélération

terrestre g est nécessaire. Un gravimètre utilisant des atomes refroidis a été construit et permettra de mesurer g avec une sensibilité et une exactitude de $10^{-9} g$. Notre gravimètre présente déjà une sensibilité de $5.10^{-9} g$ après 100 secondes de mesure.

Références :

- [1] G. Girard, "The third periodic verification of national prototypes of the kilogram", *Metrologia*, **31**, p 317, (1994)
- [2] B.P. Kibble, I.A. Robinson, J.H. Belliss, "A realization of the SI Watt by the NPL Moving-coil balance", *Metrologia*, **27**, p 173, (1990)
- [3] B.D. Josephson, *Phys. Lett.*, **1**, p 251 (1962)
- [4]http://www.lne.fr/fr/r_et_d/metrologie_electrique/metrologie_electrique_quantique_EJ.shtml
- [5] K. von Klitzing et al, *Phys. Rev. Lett.*, **45**, p 494 (1980).
- [6] http://www.lne.fr/fr/r_et_d/metrologie_electrique/metrologie_electrique_quantique_EHQ.shtml
- [7] I. Marson, J. E. Faller, *J. Phys. E : Sci. Instrum.* **19**, p 22 (1986).
- [8] A. Peters, K. Y. Chung, S. Chu, *Nature* **400**, p 849 (1999).
- [9] A. Aspect, J. Dalibard, *La Recherche*, **25**, n°261, p 30, (1994)

Remerciements

Je tiens à remercier l'équipe du LNE-SYRTE ainsi que M. Genevès du LNE-CME, pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée dans la rédaction de cet article.

Einstein, une petite chronologie

Jean-Noël Terry,
Observatoire de Lyon

14 mars 1879 : Naissance d'Albert Einstein à Ulm (Bade-Wurtemberg), enfant d'Hermann Einstein (1847-1902) et de Pauline Einstein, née Koch (1858-1920), tous deux de confession juive

1880 : Installation à Munich

1881 : Naissance de Maja sœur d'Einstein (morte en 1951)

1885-1888 : Etudes primaires dans une école catholique, Albert commence le violon

1888-1894 : Etudes secondaires au lycée Luitpold de Munich. Quitte le lycée avant d'avoir obtenu son diplôme de fin d'études et rejoint ses parents installés à Pavie depuis le début de 1894

1895 : À l'automne échoue à l'entrée au Polytechnicum de Zurich.

1895-1896 : Ecole cantonale d'Aarau, obtient son diplôme de fin d'études secondaires

1896 : Abandonne la nationalité allemande, entre au Polytechnicum où il rencontre Mileva Maric (1875-1948) qui deviendra sa femme

1897 : Se lie d'amitié avec Michele Besso (1873-1955) qui sera un interlocuteur privilégié

1900 : Réussit l'examen de sortie, vit pendant 2 ans de petits métiers

1901 : Acquiert la nationalité suisse qu'il gardera toute sa vie, publie son premier article scientifique (sur la capillarité)

1902 : Naissance d'une fille Lieserl, dont on perd la trace en 1903. En juin expert de 3^{ème} classe, non titulaire, au bureau des brevets de Berne. Mort de Hermann Einstein le 10 octobre

1903 : Mariage avec Mileva Maric

1904 : Naissance de Hans Albert (mort en 1973)

1905 : En mars un article avec l'hypothèse des quanta de lumière. Avril : fin de la rédaction de sa thèse de doctorat, avec calcul du nombre d'Avogadro... entaché d'une erreur de calcul. Mai : premier article sur le mouvement brownien. Juin : article fondant la relativité restreinte. Septembre : premier article sur l'équivalence masse-énergie

1907 : Entrepren de généraliser la relativité

1908 : Nommé *Privatdocent* à l'université de Berne (enseignant payé par ses étudiants)

1909 : Expose ses théories au congrès de Salzbourg. Démissionne du bureau des brevets et est nommé titulaire d'une chaire de Physique à Zurich

1910 : En juillet naissance de Eduard (mort en 1965)

1911 : Rencontre à Leyde, Lorentz, qu'il a beaucoup admiré. En mars nommé titulaire d'une chaire de physique à Prague, il y restera 18 mois. Octobre : participe au premier congrès de Solvay

1912 : Retour à Zurich, nommé titulaire de la chaire de Physique Mathématique au Polytechnicum sur la recommandation, en particulier de Marie Curie et de Henri Poincaré. Rencontre Ehrenfest. Collaboration avec Marcel Grossmann pour résoudre les difficultés mathématiques de la relativité générale

1913 : Séjour à Paris, loge chez les Curie

1914 : Quitte Zurich pour Berlin où il est nommé professeur à l'Université et membre de l'Académie des Sciences de Prusse, Mileva retourne en Suisse avec les 2 enfants. En août, la guerre amène Einstein à se prononcer pour le pacifisme, il refuse de signer le "Manifeste des 93" (nationaliste) et signe le "Manifeste aux Européens" (pacifiste)

1915 : Continue dans la relativité générale, explique l'avance du périhélie de Mercure

1916 : Publie l'article de synthèse de la Relativité Générale

1917 : Ecrit plusieurs articles de cosmologie relativiste et publie la théorie quantique du rayonnement. Sa cousine Elsa (1876-1936) le soigne lors d'une grave maladie à l'estomac

1918 : Soutient les débuts de la République allemande. Début de la procédure de divorce avec Mileva

1919 : Mars : Eddington vérifie, lors d'une éclipse, la déviation des rayons lumineux par le Soleil : grande popularité soudaine d'Einstein. Divorce de Mileva et épouse Elsa

1920 : Mort de sa mère. Rencontre Bohr. Début des campagnes antisémites à son encontre

1921 : Début d'une tournée triomphale : Vienne, Prague, Oxford, Londres. Va aux USA pour soutenir une collecte de fonds pour l'Université hébraïque de Jérusalem

1922 : Invité au collège de France. Va au Japon du 17 novembre au 29 décembre. Obtient le prix Nobel de physique pour sa théorie des quanta de lumière, Mileva recevra le montant du prix

1923 : Voyage en Palestine (février), Espagne (mars), à Leyde (novembre). Publie une première théorie unitaire

1924 : Fait connaître les travaux du physicien indien Bose et étend ses travaux au gaz parfait monoatomique

1925 : Deuxième mémoire sur la théorie du gaz parfait monoatomique, attire l'attention sur la thèse de Louis de Broglie. Va en Amérique du Sud (avril-juin)

1927 : Refuse de participer au congrès de Côme (hostilité au fascisme) mais va au congrès de Solvay, s'oppose à Bohr sur les développements de la théorie quantique

1928 : Elu président de la Ligue des droits de l'homme. Tombe gravement malade (troubles cardiaques)

1929 : En juillet assiste au congrès sioniste de Zurich. Se lie d'amitié avec la famille royale de Belgique. En novembre séjourne en France

1931 : Séjourne aux USA, en particulier à Pasadena

1932 : Nouveau séjour à Pasadena, accepte de collaborer au nouvel Institute for Advanced Study de Princeton. Le 10 décembre s'embarque pour les Etats-Unis, il ne reviendra plus en Allemagne

1933 : Séjourne aux USA jusqu'en mars, puis à la Villa savoyarde au Coq-sur-Mer (Belgique) où il passe l'été. Renonce au pacifisme et refuse de soutenir les objecteurs de conscience belges. En septembre quitte définitivement l'Europe

1934 : Rencontre le président Roosevelt. Soutient activement les réfugiés juifs allemands

1935 : Publication de l'article EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) explicitant certaines difficultés de la mécanique quantique. Demande à être naturalisé américain

1936 : Mort d'Elsa. Travaille à la théorie des champs et à la cosmologie relativiste

1938 : Publie, avec Léopold Infeld « L'évolution des idées en physique »

1939 : En août signe la lettre préparée par Leo Szilard attirant l'attention du président Roosevelt sur la possibilité, par les nazis, de réaliser une arme nucléaire

1940 : Devient citoyen américain

1943 : Tenu à l'écart du projet Manhattan de bombe A

1945 : Envoie à Roosevelt une lettre pour le dissuader d'utiliser l'arme nucléaire

1946 : Participe à la lutte des savants américains contre la prolifération des armes nucléaires. Commence à rédiger ses notes auto-biographiques

1948 : Opéré pour des troubles à l'estomac, on détecte un anévrisme de l'aorte, à l'époque c'était une sentence de mort à plus ou moins courte échéance

1949 : Propose une théorie généralisée de la gravitation, dernier travail théorique important

1952 : Refuse la proposition que lui fait l'état d'Israël d'en devenir président

1953 : Se prononce avec fermeté contre la « chasse aux sorcières »

1955 : Signe avec Bertrand Russell un manifeste appelant au désarmement et à la coopération internationale. Mort de Michele Besso

18 avril 1955 : À 1h15 du matin, il meurt, dans une clinique de Princeton, d'une rupture d'anévrisme de l'aorte. Selon sa demande il sera discrètement incinéré et le sort de ses cendres sera tenu secret.

Relativités et mécanique quantique

G.Paturel, Observatoire de Lyon

Résumé : Le 20^{ème} siècle a vu naître plusieurs théories qui ont profondément bouleversé nos conceptions de la physique. Il s'agit de la Relativité Restreinte, de la Relativité Générale et de la Mécanique Quantique (dite aussi mécanique ondulatoire). Nous allons donner un bref aperçu des origines, des préceptes et des conséquences de ces théories. Nous concluons ainsi ce dossier consacré à l'Année Mondiale de la Physique et à Einstein.

Relativité restreinte

La théorie de la Relativité Restreinte a été élaborée par A. Einstein en 1905. D'autres savants, comme Poincaré, Lorentz ou Hertz, avaient approché cette théorie mais sans lui donner la portée générale qu'Einstein a pu lui trouver.

Le problème s'est posé ainsi : le principe de relativité de Galilée stipulait que les lois de la mécanique demeuraient inchangées quand on les exprimait dans des systèmes de références en mouvement de translation uniforme les uns par rapport aux autres (ce qu'on appelle les systèmes galiléens). Il n'y avait pas de système de référence privilégié. Dit d'une autre manière, quand on rapporte une loi de la mécanique à un repère (par exemple le sol), cette loi est la même quand on l'exprime dans un repère en mouvement uniforme (par exemple un train roulant en ligne droite, à vitesse constante, par rapport au sol). Le changement de coordonnées galiléen fait apparaître explicitement la vitesse relative du train et du sol, mais la loi n'est pas changée. Par exemple, la loi fondamentale de la mécanique est invariante dans un tel changement de repère.

Comme vous avez raison de dire que la vitesse est une notion relative!



Mais, ce qui semblait vrai pour les lois de mécanique ne l'était plus pour les lois de l'électrodynamique, rassemblées en une formulation remarquable par Maxwell. Où était l'erreur ? Fallait-il renoncer à une généralisation du principe de relativité ? Les équations de Maxwell étaient-elles incomplètes ou fallait-il invoquer une nouvelle loi de la nature ? La transformation de Galilée, pourtant si naturelle, devait-elle être remise en cause ? Toutes ces hypothèses ont été envisagées. C'est la dernière hypothèse qui a prévalu.

Le postulat principal d'Einstein est que la vitesse de la lumière devait être constante pour tout repère galiléen. Dans son petit livre de vulgarisation : "La Relativité", Einstein dit que l'astronome Hollandais De Sitter avait montré que la vitesse de la lumière ne dépendait pas de la vitesse de la source émissive. Un tel postulat semblait incompatible avec le principe de relativité galiléen.

Si l'addition classique des vitesses est vraie, ce postulat de la constance de la vitesse de la lumière ne pouvait pas tenir. Mais, et c'est là l'apport considérable, Einstein a montré que la notion de simultanéité n'avait pas un caractère absolu. De là, découle que le temps est relatif et non absolu. Chaque repère galiléen emporte son propre temps. La transformation de Galilée n'est plus correcte. Les longueurs ne sont plus des quantités absolues, mais elles changent quand on passe d'un repère galiléen à un autre animé d'une vitesse uniforme. L'addition des vitesses doit être révisée. Elle obéit désormais à une transformation qui laisse inchangée la vitesse de la lumière.

Les physiciens Michelson et Morley ont pu montrer, par une expérience interférométrique d'une remarquable finesse, que la vitesse de la lumière n'était pas affectée par le déplacement de la Terre

sur son orbite. Dans la conception classique, galiléenne, cette observation ne pouvait pas être comprise. Certes, on pouvait "sauver les faits" en supposant, avec Fitzgerald ou Lorentz, que les longueurs se contractaient dans le sens du déplacement de la Terre. Mais cette explication était quelque peu *ad hoc*. Or, par son hypothèse de constance de la vitesse de la lumière, Einstein expliquait cette contraction des longueurs de manière très naturelle. Il prédisait aussi la dilatation des durées mesurées depuis un autre repère galiléen. La nouvelle transformation qui permet de passer d'un repère galiléen à un autre, s'appelle la transformation de Lorentz (ou de Fitzgerald-Lorentz). Pour des vitesses faibles devant la vitesse de la lumière, la nouvelle transformation se réduit à la transformation classique de Galilée. La nouvelle théorie englobe donc l'ancienne en la généralisant.

A partir de lois classiques (aberration de la lumière, pression de radiation et conservation de la quantité de mouvement), Einstein a aussi déduit une relation étonnante $E=mc^2$. Cette relation montre l'équivalence entre énergie et masse.

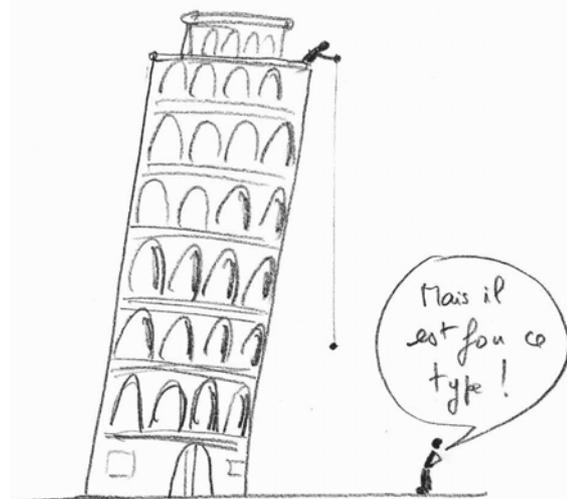
Relativité générale

Après les succès de la Relativité Restreinte, applicable aux repères en mouvement uniforme les uns par rapport aux autres, Einstein a cherché à étendre sa théorie aux repères accélérés.

Une difficulté apparaissait : la loi d'inertie, qui veut qu'un corps garde son état de mouvement, n'était plus valable quand on considérait des repères non plus galiléens, mais des repères accélérés. Par rapport à ces derniers, des forces nouvelles (forces d'inertie) apparaissent qui modifient l'état de mouvement des corps. Fallait-il concevoir une physique valable pour des repères galiléens et une physique valable pour des repères non galiléens ? Einstein posait la question suivante : "Comment est-il possible que certains repères soient préférés à d'autres repères ? Quelle est la raison de cette préférence ? Il fallait trouver en effet une cause à ces comportements différents. Einstein trouve la solution en reprenant une analyse de Newton.

Une distinction subtile avait été faite par Newton entre la masse *grave* et la masse *inerte*. De quoi s'agit-il ? Quand deux corps s'attirent mutuellement sous l'effet de la gravitation universelle, la force d'attraction dépend du produit des deux masses. Ces masses s'appellent les masses *graves* car elles interviennent dans la gravitation. En

revanche, quand nous appliquons une force sur un corps pour le mettre en mouvement, le corps montre une inertie qui s'oppose au changement de mouvement. Cette inertie qui s'exprime dans la loi fondamentale de la dynamique ($F=m.a$) fait intervenir la masse *inerte* du corps. On l'appelle ainsi car elle intervient dans l'inertie. Expérimentalement on constate que tous les corps qui sont sollicités par un même champ de gravitation, acquièrent des vitesses identiques. C'est la célèbre expérience de Galilée qui, lâchant des sphères de différentes natures du haut de la tour de Pise, constata qu'elles tombaient toutes à la même vitesse.



La force d'attraction était plus forte pour les sphères très lourdes (masse grave importante) mais ces mêmes sphères résistaient d'avantage à leur mise en mouvement (masse inerte importante). Il semblait donc, expérimentalement, que ces deux masses étaient identiques. Einstein en fit un postulat.

Pourquoi ce postulat résolvait-il le problème ? La masse inerte étant identifiée à la masse grave, un repère accéléré était donc identifié à un repère galiléen dans un champ de gravitation. Des physiciens, faisant une expérience à l'intérieur d'un ascenseur accéléré, pourraient considérer qu'ils sont dans un repère galiléen, mais soumis à un champ de gravitation. Einstein nourrissait l'espoir que l'étude des champs de gravitation particuliers, nés de ces repères accélérés, allaient nous éclairer d'avantage

sur la loi générale de la gravitation. C'est ce qui s'est produit. La théorie de la Relativité Générale est en cela une théorie de la gravitation.

Pour ce qui est du formalisme adopté pour la théorie de la Relativité Générale, une idée révolutionnaire allait être utilisée par Einstein : l'abandon de l'espace Euclidien.

Dans un espace Euclidien, le rapport de la circonférence d'un cercle à son diamètre vaut exactement $\pi=3,1415926\dots$. Ce n'est pas la seule propriété, mais c'en est une. Imaginons deux observateurs, l'un sur un disque tournant, l'autre en dehors. Le premier pourra considérer qu'il est dans un repère galiléen soumis à un champ de gravitation qui le pousse vers l'extérieur du disque. Les deux observateurs ne mesureront pas la même circonférence à cause du mouvement uniforme entre les deux repères. Le diamètre en revanche sera le même car il est perpendiculaire au mouvement. Le rapport de la circonférence au diamètre ne sera pas le même pour les deux observateurs. Cette propriété importante de l'espace euclidien aura disparu pour le premier observateur. Il devra conclure que le champ de gravitation modifie la nature euclidienne de son repère "galiléen".

L'abandon de l'espace euclidien en présence d'un champ de gravitation, conduira Einstein à adopter un espace courbe dont la courbure résulte du champ de gravitation. Ainsi, tous les corps se déplaçant librement dans cet espace courbe, auront des trajectoires similaires. On explique ainsi que la chute des corps soit la même, quelle que soit leur nature, conformément à l'expérience de Galilée. Cette identité de la masse grave et de la masse inerte ne repose que sur l'expérience. L'expérience de Eötvös a permis de mettre une limite à l'égalité des masses grave et inerte. L'égalité serait vraie à au moins un dix milliardième près. De nouvelles expériences spatiales tentent d'abaisser cette limite ou de mettre ce principe d'équivalence en défaut.

Mécanique quantique (ou ondulatoire)

La mécanique quantique est une théorie aussi déroutante que les théories de la Relativité. Les bases en furent jetées quand le physicien Planck

essaya d'interpréter le rayonnement d'un corps parfaitement émissif et parfaitement absorbant (ce qu'on appelle le corps noir). Planck montra que les échanges d'énergie du rayonnement ne pouvaient se faire que par paquets, bien définis : les quanta.

Il en résultait que l'incertitude sur l'énergie multipliée par l'incertitude sur le temps (ou de manière équivalente, l'incertitude sur la quantité de mouvement multipliée par l'incertitude sur la position) devait être un multiple d'une quantité constante, la constante de Planck. Il en découlait alors un résultat surprenant : on ne pouvait pas connaître avec une précision infinie, et simultanément, la position et la quantité de mouvement d'une particule élémentaire (où de manière équivalente, l'énergie et le temps). Si on augmentait indéfiniment la précision de la mesure de la position selon une direction, la mesure de la quantité de mouvement, selon cette même direction, devenait très incertaine. Il le faut bien pour que le produit des deux reste constant.

En adoptant l'hypothèse de Planck, Bohr réussit à interpréter les raies énigmatiques qui apparaissaient dans les spectres lumineux et qui résultaient de l'absorption (ou de l'émission) de la lumière par les atomes ; c'est ce que nous avons vu en détail dans le précédent Cahier (CC111). Cette hypothèse conduisait à des prédictions qui furent vérifiées.

Par une autre voie, de Broglie montra qu'à toute particule en mouvement, on pouvait associer une onde qui caractérisait seulement la probabilité de présence de cette particule. Une particule pouvait être considérée comme une onde et réciproquement. Cette conception fut vérifiée quand on put observer des interférences obtenues avec un faisceau d'électrons animés par la même vitesse.

Ainsi, de la description mécaniste, où la précision n'était limitée que par la finesse de l'expérience et l'habileté de l'expérimentateur, on arrivait à une description probabiliste, où il y avait une impossibilité fondamentale à connaître toute l'information sur une particule, et plus généralement sur un objet.

■

AVEC NOS ELEVES

Un logiciel de la NASA modélisant la trajectoire de satellites réels.

Son utilisation en Sciences Physiques en TS

Marie-Agnès Lahellec

Résumé : Dans le Cahier Clairaut no104 Pierre Le Fur proposait une démarche « expérimentale », en fait l'utilisation d'un logiciel de simulation des trajectoires des satellites artificiels de la Terre. Je propose un texte de TP, copié sur son article, tel que je l'ai donné en TS. Dans la progression du programme, il prend place après les lois de Kepler. On peut le donner aux élèves comme une introduction au cours sur les satellites. Il faut une connexion à internet. Dans mon établissement, nous avons le câble. Les élèves ont bien apprécié la démarche. Certains, même, sont « sortis » sur Internet pour avoir des renseignements sur l'usage de certains satellites. Notamment sur ceux qui ont une trajectoire très excentrique comme XMM.

Découverte du site

Aller sur le site :

science.nasa.gov/realtime/jtrack/3d/JTrack3D.html

Respecter la typographie majuscule-minuscule et la syntaxe. Si une première boîte de dialogue s'ouvre : répondre « oui ». Après quelques secondes, apparaît une fenêtre dans laquelle une Terre est dessinée, on repère l'équateur. Rapidement, 500 points lumineux viennent entourer le globe : *ce sont des satellites artificiels*. Visualiser en pleine page : utiliser VIEW : ZOOM IN (ou OUT).

Ce programme JAVA est un modèle cinématique où chaque satellite est associé à des fonctions du temps issues de modèles numériques dont les paramètres fondamentaux sont réactualisés régulièrement en fonction des observations du réseau de surveillance radar « NORAD ». Attention pour la suite, ne touchez pas au menu VIEW, qui doit impérativement rester sur ORBIT PATH.

Prise en main du logiciel

On observe deux grandes répartitions des satellites : une ceinture très éloignée de la Terre et un regroupement à son voisinage.

- Cliquer sur un point lumineux : la trajectoire du satellite apparaît dans le référentiel géocentrique.
- Cliquer sur la Terre en maintenant la pression, on peut ainsi changer le point de vue, en restant dans le référentiel géocentrique. Quand la trajectoire est uniformément rouge, elle est dans le plan de l'écran.

Il est intéressant de voir l'orbite par la tranche, pour visualiser l'inclinaison du plan sur l'équateur terrestre.

- On peut choisir le temps pour rafraîchir l'image avec OPTIONS : UPDATE RATE .Prendre 1/2 s
- Il faudra utiliser le menu OPTIONS : TIMING, pour accélérer ou ralentir la visualisation du phénomène : exemple $\times 100$
- Pour connaître des données concernant le satellite utiliser VIEW : SATELLITE POSITION
- Choix d'un satellite SATELLITE : SELECT. Par exemple Station (pour l'ISS la station internationale)
- Changement de référentiel à l'aide du menu SATELLITE : CENTER. On se place dans le référentiel du satellite pour observer le mouvement relatif de la Terre et des autres satellites. Par exemple, observer la marche des satellites de télécommunication de la "constellation" Iridium. À l'aide de SATELLITE : SELECT et de VIEW : ZOOM IN, (cliquer plusieurs fois) suivre tout

d'abord Iridium 22. Sélectionner Iridium 23, puis 24 etc. jusqu'à 26.

Exploitation des observations

Choix du satellite

Cliquer sur un satellite appartenant à la ceinture très éloignée de la Terre.

a) Placer sa trajectoire dans le plan d'observation de l'écran par rotation de l'image avec clic gauche maintenu jusqu'à obtenir une coloration rouge uniforme de sa trajectoire.

Quel est le plan de la trajectoire ?

b) « Mesurer » l'altitude z (en km) en fonction du temps VIEW : SATELLITE POSITION, après avoir accéléré le mouvement (OPTIONS : TIMING $\times 1\ 000$), relevez les valeurs extrémales de z , relever la valeur de la période T

Conclure : comment caractériser la trajectoire ?

c) Changer de référentiel à l'aide du menu SATELLITE : CENTER pour observer le mouvement de la Terre relativement au satellite. VIEW : ZOOM IN, (cliquer plusieurs fois).

À quelle catégorie appartient ce satellite ?

Vérification de la 3^o loi de Kepler et « pesée » de la Terre.

À cette fin, on sélectionnera plusieurs satellites de rayons d'orbite différents à l'aide de SATELLITE : SELECT ou on cliquera sur des points brillants. Par exemple Station, GPS BIÛA-20, Spot4, Intelsat 804. Remplir la feuille réponse.

a) Préparer un tableau EXCEL à 8 colonnes.

b) Remplir les 4 premières colonnes (nom du satellite, z_{\max} , z_{\min} , période T) à l'aide de la simulation. Remarque entrer l'heure en H : min : s recopier la cellule en format nombre standard, Excel affiche l'heure en jours, la conversion en s est facile ensuite.

c) Calculer les rayons extrémaux r_{\max} , r_{\min} sachant que le rayon terrestre moyen R_T vaut 6378 km. ($r = z + R_T$) Calculer le rayon moyen r et la variation relative $100(r_{\max} - r_{\min})/r$, qui est l'écart à une trajectoire circulaire.

d) Calculer T^2/a^3 , en SI où a vaut ici le rayon moyen r de l'orbite.

e) Conclure : avec quel pourcentage la 3^o loi de Kepler est-elle vérifiée ? À quel type de satellite s'est-on limité ? Pourquoi ?

f) En déduire la valeur de la masse de la Terre en démontrant la formule $M_T = \frac{4\pi^2}{G \cdot T^2/a^3}$

g) Comparer à la valeur de la littérature $5,976 \cdot 10^{24}$ kg

Vérification de la loi des aires

Avec les menus SATELLITE : SELECT sélectionner le satellite XMM d'observation (dans le domaine des rayons X.) et VIEW : ZOOM OUT. À l'aide de la souris et du clic gauche maintenu, amener l'orbite dans le « plan de l'écran » -trace de couleur rouge.

Caractériser la trajectoire. Comment la norme de la vitesse varie-t-elle avec l'altitude ? Que constate-t-on au périégée et à l'apogée ? Quelle est la loi de Kepler permettant de comprendre cette observation ?

Et le référentiel terrestre ?

Quelle est la projection de la trajectoire d'un satellite sur le sol terrestre ?

1) Géostationnaire. Sélectionner Hot Bird 1, puis utiliser VIEW : GROUND TRACE en désélectionnant ORBIT PATH et centrer sur le satellite avec SATELLITE —>CENTER. Qu'observe-t-on ?

2) Choisir maintenant Skynet 4A (ou LES 9) . Qu'observe-t-on ?

3) Se rapprocher de la Terre avec le zoom et observer la trace d'un GPS. Belle arabesque non ?

■

Pour le professeur : Tableau Excel de résultats

Nom	inclinaison sur l'équateur en °	Z max m	Z min m	T h:min:s	t jours	t s	Z moyen	R moyen m	T2/a3(SI)	M terre kg
ANIKEI	1,75	3,61E+07	3,61E+07	24:12:00	1,00833	87120	3,61E+07	4,25E+07	9,90E-14	6,03E+24
LANDSAT	78,24	6,01E+05	5,58E+05	01:35:36	0,06639	5736	5,80E+05	6,96E+06	9,77E-14	6,11E+24
SATMAX	0	3,58E+07	3,58E+07	23:56:04	0,99729	86166	3,58E+07	4,22E+07	9,89E-14	6,04E+24
GPS-BIIA-23	54,74	2,04E+07	2,00E+07	11:57:56	0,49856	43076	2,02E+07	2,66E+07	9,90E-14	6,03E+24
									moyenne	6,05E+24
									écart relatif à la valeur	0,014

FICHE DE TRAVAIL

Nom, prénom

Tableau général d'observations

Nom du satellite	inclinaison	Z _{max} km	Z _{min} km	T h : min : s	Commentaire

Exploitation des observations

1) Satellite appartenant à la ceinture très éloignée de la Terre.

- Quel est le plan de la trajectoire ?
- Conclure : comment caractériser la trajectoire ?
- À quelle catégorie appartient ce satellite ?

2) Vérification de la 3^e loi de Kepler et « pesée » de la Terre.

Joindre le tableau Excel et conclure

Masse de la Terre

Démonstration –calcul et comparaison

3) Vérification de la loi des aires

Caractériser la trajectoire. Comment la norme de la vitesse varie-t-elle avec l'altitude ? Que constate-t-on au périégée et à l'apogée ? Quelle est la loi de Kepler permettant de comprendre cette observation ?

CURIOSITE

La loi de Benford

Ph. Paturel,

Résumé : *La loi de Benford fait partie de l'intéressante famille des curiosités mathématiques et autres paradoxes numériques.*

La loi de Benford s'énonce sans formalisme, de la façon suivante : "dans une liste de nombres mesurant des grandeurs physiques quelconques, on trouvera plus de nombres commençant par le chiffre '1' que de nombres commençant par le chiffre '2'. De la même façon, un premier chiffre '2' sera plus fréquent qu'un premier chiffre '3' et ainsi de suite". Intrigué ? Bien sûr ! On s'attendrait à une fréquence de 1/10, identique pour chaque chiffre ou plutôt 1/9 si on ne compte pas le zéro comme premier chiffre possible. Et pourtant ...

Les fréquences réellement constatées sont en fait les suivantes :

chiffre 1 : 30.1 %
chiffre 2 : 17.6 %
chiffre 3 : 12.5 %
chiffre 4 : 9.7 %
chiffre 5 : 7.9 %
chiffre 6 : 6.7 %
chiffre 7 : 5.8 %
chiffre 8 : 5.1 %
chiffre 9 : 4.6 %

Il y a donc pratiquement une chance sur deux (47.7 %) que le premier chiffre soit 1 ou 2 et presque deux chances sur trois (60.2 %) que le premier chiffre soit 1, 2 ou 3.

N'hésitez pas à faire un essai, en inscrivant par exemple sur une feuille de papier, la longueur d'une sélection de fleuves quelconques, la surface de lacs, le nombre d'habitants de n'importe quelles villes, les prix des articles sur votre dernier ticket de caisse de grande surface, la taille des fichiers sur votre ordinateur, etc. Ce travail a déjà été fait de nombreuses fois et il confirme bien que la fréquence moyenne du premier chiffre des nombres ainsi relevés n'est pas uniforme.

Ce phénomène possède d'intéressantes propriétés. La fréquence du premier chiffre n'est pas modifiée si l'on change les unités de mesure des nombres. Ainsi, si la longueur des fleuves de l'exemple précédent est exprimée en mètres, inch, miles ou multiple de la longueur de votre bras, ou si les prix sont convertis en pesos colombiens, les fréquences restent inchangées. Ainsi, les schtroumpfs qui mesurent les surfaces en unité schtroumpf doivent également rencontrer la même loi. Cette loi possède un caractère universel et invariant par changement d'échelle.

Dans le même ordre d'idée, la conversion des nombres dans une autre base que la base de 10 (base 16, base 8, etc.) maintiendra une différence de fréquence en faveur des petits chiffres. Enfin, les anomalies de fréquences portent également sur les chiffres suivants avec une intensité décroissante au fur et à mesure que l'on avance "vers la droite" de l'écriture des nombres.

Attention, certaines familles de nombres ne conviennent pas, comme on le comprendra plus loin. Les numéros de téléphones, les tirages du loto, les âges, les codes postaux ou les plaques d'immatriculation sont insensibles à cette loi. Ils ne mesurent pas exactement une grandeur physique, ou bien souffrent d'un biais statistiques artificiel.

Cette bizarrerie mathématique a été découverte fortuitement en 1881 par le mathématicien et astronome Simon Newcomb. Il a constaté en effet que les tables de logarithmes utilisées pour les calculs numériques étaient plus usées sur les pages des nombres commençant par les petits chiffres. En d'autres termes, il s'effectuait plus de calculs sur des données commençant par de petits chiffres. Il proposa une formule mathématique donnant la probabilité d'occurrence d'un premier chiffre, loi à base de logarithme (encore !) et publia un article qui

passa inaperçu dans la communauté scientifique, peut-être en raison de sa production par ailleurs abondante ou de l'absence de démonstration du phénomène. La formule proposée était correcte ; la probabilité $P(D)$ que le premier chiffre soit "D" est :

$$P(D) = \log_{10}(1+1/D).$$

Cinquante ans plus tard, vers 1938, un physicien américain, Frank Benford, redécouvrit les mêmes fréquences que celles résultant de l'application de la formule de Newcomb, en analysant plus de 20 000 données prises dans des domaines très divers. Il confirma la validité de la loi de Simon Newcomb mais avec plus d'écho dans la communauté scientifique, notamment grâce au volume exceptionnel de données étudiées ! Cette loi porte aujourd'hui son nom : la Loi de Benford

Par la suite, les travaux de Roger Pinkham en 1961 ont montré que la formulation mathématique de la loi de Benford était l'unique solution permettant d'obtenir une loi universelle et invariante par changement d'échelle.

L'explication "réelle" du phénomène est venue encore plus tard avec les travaux du mathématicien Theodore Hill en 1996. Certaines grandeurs suivent des distributions de probabilités identifiées : gaussiennes ou courbes en cloches, lois exponentielles, lois uniformes, etc. D'autre part, des données collectées dans des domaines très divers suivront une distribution de probabilité résultant d'un mélange de ces distributions plus simples. De la même façon, des phénomènes macroscopiques du monde réel, sont issus d'une multitude de phénomènes élémentaires en interaction. Leur distribution de probabilité suivra donc une sorte de mélange des distributions de probabilité de chaque phénomène : ce mélange, ou encore cette "distribution des distributions" peut se calculer mathématiquement et c'est la loi de Benford.

Depuis les années 1990, des applications concrètes de la loi de Benford voient le jour, la faisant sortir du simple domaine des curiosités mathématiques. Il a été montré (M.Nigrini, 1992) que les données financières des entreprises suivent cette loi. L'application d'un test statistique classique, le test du χ^2 , constitue donc un outil simple et rapide pouvant fournir des présomptions de fraude en indiquant si une série de données n'est pas assez ... naturelle. En effet, un individu qui invente ou modifie des chiffres artificiellement ne suit inconsciemment pas une telle loi. Il ne crée pas assez de nombre commençant par les petits chiffres et crée trop de nombres commençant par 5 ou 6. Les données d'essais cliniques pharmaceutiques, sont

également de bonnes candidates pour ce test. La loi de Benford peut aussi participer à la validation de modèles et simulation numériques (démographie, météorologie, etc.). D'autres applications suivront certainement.

Nous venons de voir les principales facettes de cette étonnante loi de Benford. Elle est amusante par son contenu, intéressante par son histoire, prometteuse par ses applications, et vient nous rappeler s'il en est encore besoin, la grande subtilité du monde réel.



Effectivement, mais c'est une autre loi, qui d'ailleurs s'applique également aux tables de logarithmes quand on essaye de les lire comme un roman.

Essayez de tester la loi de Benford avec les mesures les plus diverses que vous pourrez trouver et envoyez-nous vos conclusions. Nous les publierons.

NdIR

REMUE-MENINGES

Pierre Causeret

Encore à propos d'éclipses

Nous avons eu une éclipse de Soleil le lundi 3 octobre 2005, la prochaine aura lieu le mercredi 29 mars 2006.

Voici quelques questions simples à propos de ces éclipses :

1. Combien de jours et de lunaisons a-t-on entre ces deux éclipses ?
2. Peut-on avoir deux éclipses de Soleil (totales ou partielles) plus rapprochées ?
3. Le 3 octobre, l'éclipse était annulaire car la Lune était trop éloignée de la Terre, étant passée à l'apogée 5 jours plus tôt, le 28 septembre. L'éclipse du 29 mars pourrait-elle aussi être annulaire ?



(Photo Cédric Mansuy / SAB)

L'éclipse annulaire photographiée depuis Madrid

Solution page 40

LECTURE POUR LA MARQUISE

Jean-Noël Terry

Le grand univers et nous

Daniel Kunth, éd. Bayard, ISBN 3-227-47461-0

C'est un petit livre de 92 pages d'une collection, « Les petites conférences », qui s'adresse aux enfants pour « éclairer et éveiller ». Deux petits exposés, l'un sur l'univers, l'autre sur la vie des étoiles, sont suivis d'un jeu de questions-réponses.

Les choses sont dites simplement, ce qui ne veut pas dire avec des mots simples. Ce livre s'adresse donc plutôt à des collégiens ou à des adultes n'ayant pas de connaissances scientifiques. Il donne envie d'aller plus loin et peut donc être le point de départ d'un approfondissement.

Il devrait trouver place dans un CDI de collège.

Les couleurs de l'Univers.

Yaël Nazé, *Belin-Pour la Sciences*, ISBN 2-7011-4112-5

Qu'on ne se méprenne pas à cause du titre, ou de la belle photo d'arc-en-ciel qui ouvre le premier chapitre. Il s'agit des couleurs invisibles à l'œil humain.

Après une introduction présentant l'histoire de notre compréhension de la lumière, nous voici devant des images inattendues d'objets de types familiers à l'astronome amateur. Il s'agit de la constellation d'Orion, du Soleil, de la Lune, de la nébuleuse de la Lyre, du reste de supernova Cassiopee A, de l'amas globulaire du Centaure et de la galaxie d'Andromède. La comparaison est bien intéressante, montrant déjà la nécessité d'observer avec différentes sortes de télescopes... et montrant

combien il faut se méfier de l'apparence que nous percevons avec nos yeux.

Ce sont donc les longueurs d'ondes non visibles qui sont passées en revue : radio, infra-rouge, ultra-violet, X et Gamma.

Pour chacune sont présentés l'histoire et les premiers « télescopes », les objets étudiés, les instruments actuels avec un gros plan sur un sujet d'étude important dans la longueur d'onde présentée.

Les photos et les schémas sont de qualité, le texte est clair.

Une lecture à conseiller, et à prolonger en étudiant les images données par les télescopes actuels. Celles de Spitzer en infra-rouge, en sont un exemple et un utile et passionnant prolongement.

Le ciel à portée de main.

P. Causeret, J.L. Fouquet, L. Sarrazin-Vilas, éd.
Belin-Pour la Science, ISBN 2-7011-4007-2.

Voici 54 activités demandant un matériel simple pour s'initier à l'astronomie et à sa démarche. L'objectif est, à chaque fois, donné en quelques lignes, puis ce sont l'observation, les résultats et l'interprétation.

Compte tenu des moyens techniques mis en œuvre il s'agit de s'intéresser à ce qui est alors accessible : le ciel la nuit, le ciel le jour, la Lune... Mais c'est la démarche scientifique qui est appliquée ici. Voici donc un excellent ouvrage d'initiation, il faudra aider les plus jeunes pour « mettre la main à l'astronomie », mais avec un tel guide tout doit bien se passer !

Les schémas sont de qualité.

Le ciel est à portée de main, n'hésitez pas !

Naissance et évolution des systèmes planétaires

Claude Bertout, éd. Flammarion, collection « Champs », ISBN 2-08-080129-5.

Voici la réédition, actualisée et en format de poche, du livre paru en 2003.

Il y a 10 ans, le 6 octobre 1995, Michel Mayor et Didier Queloz annonçaient la première découverte d'une planète autour d'une étoile proche 51 Pegasi. En octobre 2005, nous en sommes à 169 !

C'est dire si la lecture de cet ouvrage est utile, et souhaitable, pour faire le point des découvertes actuelles, et aussi mieux comprendre comment naissent et évoluent les systèmes planétaires.

Le format ne gêne en rien, les schémas sont lisibles et clairs, avec un cahier central d'images en couleur.

L'univers dévoilé

James Lequeux, éd. EDP Sciences, ISBN 2-86883-792-1.

Voici une histoire de l'astronomie contemporaine, entendons par là, du siècle dernier.

C'est bien utile car, comme le fait remarquer l'auteur, les histoires de l'astronomie s'arrêtent souvent à Hubble (1929). De plus le texte est écrit par un astronome, donc un acteur de cette accélération dans l'acquisition des connaissances et des moyens d'observation, en particulier à partir de 1950.

La chronologie sert de fil conducteur à cette présentation, qui n'est pas seulement historique, mais présente fort heureusement les connaissances au fur et à mesure.

Le livre pourrait être lu conjointement avec « Les couleurs de l'univers », puisque nous y suivons les débuts de l'astronomie dans toutes les longueurs d'onde via toutes sortes de systèmes optiques.

Le seul reproche qui peut être fait à l'ouvrage concerne les illustrations et les schémas : souvent dans la marge, leur petite taille n'en facilite pas la lecture. Heureusement, l'essentiel est dans le texte, dense, riche d'information, rigoureux, mais jamais ennuyeux !

JNT



Cette rubrique doit être la vôtre ! Si vous désirez présenter un livre que vous avez apprécié, envoyez-moi votre texte avec les références exactes de l'ouvrage à jnterry@free.fr

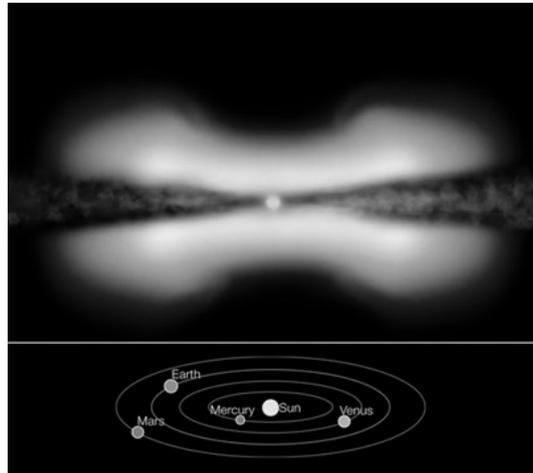
LES POTINS DE LA VOIE LACTEE

Un système planétaire en formation autour de l'objet MWC297

Les télescopes de ESO lorsqu'ils opèrent en mode "interférométrique" révèlent des détails insoupçonnés sur les étoiles. Ces images sont le fait du nouvel instrument AMBER qui équipe un des télescopes de 8,20 m du VLT (Very Large Telescope). Deux équipes internationales ont pu ainsi observer une étoile en formation, laissant deviner ce qui donnera naissance à un nouveau système planétaire.

Vous trouverez plus de détails sur ces observations sur le site de l'ESO :

<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2005/pr-29-05.html>



The Young Stellar Object MWC 297 (Artist View)

ESO PR Photo 36a/05 (November 24, 2005)



Daniel Kunth,

Correspondant de l'ESO auprès des médias
Institut d'Astrophysique de Paris

LA VIE ASSOCIATIVE

Cette année l'AG a été organisée, par Joël Gaudrain aidé par Catherine Lecoq, dans les locaux de l'IUFM de Rouen. Tout avait été parfaitement réglé jusque dans le détail. A la pause, c'est un de leurs collègues, Jean-François Brochec, responsable du service culturel qui s'est transformé en barman occasionnel, champion de l'expresso. Ainsi à la cafétéria on a pu discuter autour de boissons chaudes et d'excellentes viennoiseries.

Ceux qui étaient arrivés la veille, ont eu droit à une visite commentée des principaux monuments de la vieille de Rouen. C'est Martine Gest, formatrice en histoire et géographie, qui nous a guidés dans la nuit et ses riches commentaires enflammés nous ont réchauffés. Nombreux sont ceux qui ont envie de revoir Rouen.

Dans le hall de l'IUFM, Roger Marical avait installé un stand de la SAF et présentait le dispositif qu'il a mis au point pour observer les taches solaires.

Compte rendu de l'AG Mont Saint-Aignan, le 20 novembre 2005

Étaient présents ou représentés 106 adhérents : AUGES Annick, BALIN Dominique, BARDIN Daniel, BATTUNG Marcel, BERLIOUX Jacques, BERTHOMIEU Francis, BIGOT Christian, BOBIN Michel, BONISLAWSKI Lydie, BOTTINELLI Lucette, BOULARD Claude, BOULARD Mireille, BOURGEOIS Daniel, BOUST Dominique, BOUTOLLEAU Jean-Luc, BREMOND Alain ; BUREAU GONTIER Sophie, CAGNARD Jean-Michel, CARMONA Emile, CAVAROUZ René, CAUCHOIS Michel, CAUSERET Pierre, CHAGRION Françoise, CHANAL Pascal, CHAUSSIER Monique, CHEVALY André, CLIPET Françoise, COLLONGUES Daniel, CONVERS Jean Pierre, DAHRINGER Frédéric, DALLA TORE Jean, DALLOUBEIX Christine, De SAINTE FOY Hugues, DOMISSE Didier, DORNET Jean Michel, DURAND Gaston, DURIEUX Bernadette, EJAMINONDAS Colette, EYRAUD Charles Henri, FAUGERE René, FOUQUET Jean-Luc, FRECHET Isabelle, GARREAU Brigitte, GAUDRAIN Joël, GAVARD Hélène, GERBALDI Michèle, GIROT Emmanuelle, GOTTY Nadine, GOUGUENHEIM Lucienne, GOUTVERG Philippe, HAUGUEL Véronique, HESS Gérard, HEULIN Jacques, HOSDEZ A., JANDOT Pierre, JOSSELIN Eric, JOUGUELET Eric, LAHELLE Marie Agnès, LARCHER Christian, LAULANET Christophe, LE

GUEN Gérard, LE GUET TULLY F, LE GUILLOU Nicole, LECOQ Catherine, LENDORMI René, LEROUTIER Denis, LETOURNEAU J., MANDEIX Olivier, MARICAL Roger, MARTIN André, MATHIEU Alain, MAUREL Danièle, , MAYER Lucette, MIETTAUX Daniel, MILLAN Jeannette, MULLER Lionel, PADELOUP Eugène, PAPE René, PAPE Sylvette, PASCAL Daniel, PATUREL Georges, PELLETIER Thérèse, PETIT Annie, PETIT Jean, PIERSON Laurent, PIETERS Claude, PONS Michel, REGIS Danielle, RICHELMI Roger, RIPERT Jean, RODES François, , ROUGETTE Michel, ROUSSELLE Jean-paul, SANDRE Béatrice, SEMERJIAN Claudine, SEMERJIAN Claudine, STIERS José, TERRY Jean-Noël, THOMAS Christian, THOREL Jean Claude, TOUSSAINT Daniel, VALORGE Céline, VARANNE Eric, VIGNON Catherine, VILAS SARRAZIN Liliane, WEILL Laurent.

Jean Ripert fait part des messages reçus de la part de celles et ceux qui ne pourront pas participer à l'AG pour diverses raisons : Agnès Acker, Marie-France Duval, Josée Sert, Dominique Bernard, Catherine Lydoire, Céline Valorge, Francis Berthomieu, Michel Vignand,

Rapport moral de notre président Georges Paturel.

Après avoir présenté l'ordre du jour, il a souhaité que les AG ne soient pas simplement une affaire administrative, mais qu'elles permettent également des échanges dans le domaine pédagogique (présentation de séquences ou de maquettes). Dans ce cadre, le rôle des correspondants académiques devrait se développer.

Notre président a donc passé rapidement en revue le travail effectué cette année, en particulier le document très riche réalisé dans le cadre de Lunap (l'univers à portée). A voir sur le site www.ac-nice.fr/clea/lunap

Rapport financier de notre trésorière Béatrice Sandré

Béatrice Sandré présente le bilan financier en faisant remarquer l'érosion continue du nombre d'abonné aux Cahiers Clairaut et d'adhérents. Entre 2000 et 2005, le nombre des adhérents a évolué comme suit : 558 ; 499 ; 556 ; 802 ; 778 ; 654. Mais il faut remarquer que certains adhèrent uniquement pour acheter du matériel (ce qui n'a pas été le cas avant 2002) et disparaissent ensuite. Le nombre d'abonnés est plus proche de la réalité, pour les mêmes années : 804 ; 744 ; 690 ; 648 ; 622 ; 560.

Avoir Novembre 2003

Compte postal : 64 459,25 €; Livret A : 44 225,58 €; Total : **108 684,83 €**

Dépenses de Novembre 2003 à Novembre 2004

CC Impression (108-109-110-111) : 13984,03 ; CC Routage (108-110) : 505,02 ; CC Affranchissements (108-110) : 586,08
A.G + Association : 2023,80 ; timbres : 972,67 ; salaires : 4054,50 ; assurance MAIF : 488,84 ; tenue de comptes : 47,22 ;
bureautique et matériel : 4635,68 ; école d'été : 4514,99
Soit un total de **31 812,83 €**

Recettes de Novembre 2003 à Novembre 2004

Subvention Fondation scientifique de Lyon (participation à physique 2005) : 1 000 ; Cahiers Clairaut (560 abonnés à 28 €) : 15 680 ; Adhésions (654 adhérents à 5 €) : 3 270 ; Intérêts livret A : 995,07 ; Starlab (14 semaines à 80 €) : 1 120 ; Ventes : 2085,40.

Soit un total de **23 150,47 €**

Avoir Novembre 2004

Compte postal : 56 951,35 et Livret A : 43 068,12 ; Total = **100 019,47€**

Il semble que le CLEA est riche, mais, comme le fait remarquer Michèle Gerbaldi, le matériel vieillit, en particulier le planétarium starlab qu'il faudra sûrement remplacer dans les 2 ou 3 ans à venir. Annie Petit qui gère bénévolement les ventes à Orsay, fait remarquer que le starlab n'est pas toujours rendu en bon état après une location. Certains emprunteurs vont être placés sur liste rouge.

Après ces remarques, **le quitus est donné à l'unanimité à notre trésorière.**

Béatrice Sandré souhaite ne plus être trésorière. Elle est remerciée pour ce lourd travail durant cinq ans. Il faudra lui trouver un remplaçant.

Statuts. Le président demande que par un vote, l'assemblée approuve le compte rendu de l'an dernier sur les statuts, ce qui est fait à l'unanimité.

Tarifs 2006. Les propositions suivantes sont faites : adhésion 5€ ; abonnement aux Cahiers Clairaut 28€ avant l'équinoxe de printemps et 30€ après. Ceci afin de favoriser celles et ceux qui s'abonnent dans les temps. Lucienne Gougouenheim pose le problème de ceux qui s'abonnent en cours d'année ; à quel tarif ? Il est proposé de leur faire un cadeau (diapos ou CD). Ces tarifs sont adoptés.

A l'unanimité, le prix des anciens numéros des Cahiers Clairaut est fixé à 2€ pour les très anciens (sans couverture cartonnée) ; 3€ jusqu'à la nouvelle mise en page et 7€ pour les derniers (à partir du numéro 101 inclus).

A la demande de Béatrice Sandré, les prix des articles seront supprimés des Cahiers Clairaut et seront mentionnés uniquement sur le site.

Sur proposition de Lucienne Gougouenheim, un abonnement de soutien sera proposé pour soutenir la proposition de Cahiers Clairaut en couleur.

Cahiers Clairaut. Georges Paturel propose de faire réaliser en 2006 les Cahiers Clairaut en couleurs et pense qu'il faudra évoluer vers une version en ligne. L'essai sera fait pendant un an.

Au sujet de la mise en ligne : faut-il tout mettre ? Faut-il mettre les articles en entier ? Un débat s'ouvre auquel participent Daniel Collonges, Frédéric Dahringer, Jean-Michel Cagnard, Eric Josselin, Christian Larcher, Lucienne Gougouenheim.

Une tentative sera faite en présentant la totalité et en donnant droit au téléchargement par mot de passe aux adhérents. En l'absence de Francis Berthomieu nous ne savons pas si cela sera réalisable sur le serveur de l'académie de Nice.

En suivant une suggestion de Lucienne Gougouenheim, une campagne d'adhésion sera lancée en 2006, en particulier en direction d'adhérents potentiels que sont les acheteurs de produits.

Une pause est alors accordée à l'assemblée.

Communications des groupes régionaux

René Cavaroz avec sa verve et son enthousiasme habituel a fait un panorama de tous les travaux réalisés avec des jeunes dans le cadre des olympiades de physique. La plupart de ces travaux ont obtenu des prix. Vous trouverez les descriptions plus détaillées sur le site : <http://perso.wanadoo.fr/cavaroz/>

Roger Marical qui a souvent animé des stages CLEA dans l'académie de Rouen et qui participe aux animations de l'observatoire de Rouen, regrette la perte d'effectifs de l'association. Pour ceux qui ne la connaissent pas, il est venu présenter la revue "l'Astronomie" de la Société Astronomique de France, revue toute en couleurs avec des articles de professionnels pour les amateurs. Certains articles sont aussi écrits par des amateurs, comme celui de Roger sur la boîte à Soleil (n° de mai 2005). Dans la revue (10 numéros par an) on trouve des articles de fond et le ciel deux mois à l'avance. La SAF compte environ 2 000 adhérents, édite parfois des numéros spécifiques (Flammarion, enseignement, ...) et des éphémérides papier, elle organise également des voyages (aurores, éclipses, ...).

Roger a présenté les filtres vendus par Rétina France (2° pièce par lot de 50). Ceci entraîne une discussion sur les circulaires interdisant d'observer l'éclipse du 3 octobre. Le CLEA souhaite informer pour la prochaine, mais heureusement, le calendrier protégera nos têtes blondes car le 29 mars sera un mercredi.

Georges fait part du travail de **Catherine Lydoire** et **Céline Valorge** dans leur établissement et des difficultés d'ordre administratif qu'elles rencontrent. Elles animent un atelier d'astronomie au lycée Jean-Paul-Sartre de Bron. Elles ont pu, malgré le mauvais temps, sensibiliser de nombreux élèves à l'observation de l'éclipse partielle de Soleil. Georges présente aussi le travail de **Marie-France Duval** qui anime l'association Andromède à Marseille. Plusieurs actions ont été conduites, en particulier pour célébrer l'Année Mondiale de la Physique, avec des expositions, des rencontres enseignants-chercheurs, des conférences.

Pierre Causeret a présenté des images de la balance de Cavendish que Georges a monté. Même si on le sait, même si on l'a lu, il est toujours excitant de "voir" expérimentalement une masse en attirer une autre. Pierre a montré des photos de différents dispositifs montés dans son club : décomposition de la lumière blanche par un CD, effet Doppler acoustique, une très belle maquette du système solaire montrant également les éclipses, le tout motorisé, une boîte à constellations et une maquette montrant les positions relatives de la Terre, Vénus et Mercure de 3 jours en 3 jours.

Charles-Henri Eyraud a présenté le site du CLEA à partir du DVD envoyé par Francis Berthomieu et les documents réalisés par le CLEA dans le cadre de LUNAP .

Charles Henri a présenté l'association européenne EAAE. Après le départ de Bernard Pellequer représentant la France, le flambeau a été repris par **Frédéric Dahringer** et Charles-Henri Eyraud, ce dernier s'occupe du site de l'EAAE. La principale activité de l'EAAE est l'organisation d'écoles d'été, la dernière a eu lieu en Suède, la prochaine se déroulera aux Îles Canaries et regroupera une centaine de participants, les langues officielles seront l'anglais, l'espagnol et le portugais, mais comme le disait Frédéric, c'est l'anglais de non-anglais et qui s'appuie souvent sur des objets fabriqués ensemble. Dans cette organisation, l'équipe espagnole est très dynamique autour de Rosa Maria Ros. Il est possible d'obtenir une bourse comenius pour cela se renseigner auprès des rectorats, mais plus sûrement auprès de Frédéric et Charles-Henri. Lucienne Gougouenheim rappelle le rôle important des écoles d'été de l'EAAE dont de nombreux animateurs étaient issus du CLEA. Elle souhaite voir des liens entre les deux sites EAAE et CLEA et voir sur le site du CLEA des articles traduits en d'autres langues.

Daniel Bardin a présenté de nombreuses photos de l'éclipse annulaire prises depuis le sud de l'Espagne. Comme d'habitude, elles furent décrites avec enthousiasme et moult détails. Sur une d'elles, au moment du dernier contact on a pu voir une protubérance et oui ça existe.

Georges Paturel a fait part des actions menées sur Marseille par l'équipe de **Marie-France Duval** : accueil de scolaires, planétarium, formation à l'IUFM.

Christian Larcher a précisé que la liste de diffusion qu'il modérait, comportait plus de 200 membres. Sur cette liste, en plus des questions et réponses, il mettait des informations et souhaitait avoir des infos sur ce qui se passe dans les différentes régions.

En attendant l'heure de la conférence, nous avons projeté les images transmises par Francis sur l'Ecole d'Eté d'astronomie 2005. De nombreux enseignants stagiaires de l'IUFM de Rouen nous ont alors rejoint. Jean Ripert a décrit le contenu des écoles d'été du CLEA, Séverine Horvat et Michel Pons ont apporté leurs témoignages et fait part des points forts de la dernière EEA. La conférence donnée par Hélène Merle, Maître de conférence en didactique à l'IUFM de Montpellier avait pour titre "Enseigner l'astronomie à l'école et au collège : des difficultés des élèves aux stratégies d'apprentissage". Nous espérons avoir bientôt un résumé de cette conférence, sachez déjà qu'elle fut de qualité et fort appréciée.

La prochaine AG aura lieu l'avant dernier week-end de novembre 2006.

Renouvellement du Conseil

Lors de la pause et après les adhérents votèrent. Sur 120 personnes présentes ou représentées, il y eut 102 votants, 102 bulletins exprimés et 102 voix pour :

ACKER Agnès, BALIN Dominique, BARDIN Daniel, BERNARD Dominique, BERTHOMIEU Francis, BOBIN Michel, BOTTINELLI Lucette, BOUTEVILLE , Gilles, BRAHIC André, CAUSERET Pierre, DAHRINGER Frédéric, DUPRE Jacky, DUVAL Marie France, EYRAUD Charles-Henri, FERRARI Cécile, FOUQUET , Jean-Luc, GLATZ Dominique, GOUGUENHEIM Lucienne, JOSSELIN Eric, LAHELLEC Marie-Agnès, LARCHER Christian, LYDOIRE Catherine, MAUREL Danièle, MAYER Lucette, MULLER Lionel, PATUREL Georges, PECKER Jean-Claude, PETIT Annie, PETIT Jean, RIPERT Jean, SANDRE Béatrice, , SCHATZMAN Evry, SCHIANO Michel, SERT Josée, TERRY Jean-Noël, TRYOËN Victor, Valorge Céline, VIGNAND Michel, VILAS SARRAZIN Lilian, WALUSINSKI Gilbert.

COURRIER DES LECTEURS

Adresse des auteurs

Nous avons reçu un courrier de Serge Latouche.

Nous le reproduisons ci-dessous :

Bonjour

Juste une information, dans les Cahiers Clairaut récents vous avez publié deux articles que je vous avais envoyés, (calcul de la distance Terre Soleil, et température des étoiles), mais je crois avoir oublié de vous signaler que j'étais enseignant de mathématiques au lycée Bernard-Palissy de Gien. Voila, l'omission est réparée.

En attendant de nouvelles collaborations, félicitations pour le travail accompli par le CLEA.

Bien cordialement

Cette aimable lettre nous donne l'occasion de rappeler aux auteurs, qu'il est préférable de donner une adresse, personnelle ou professionnelle, à laquelle il est possible de les joindre. Sinon, la rédaction ne donne pas leur adresse. Souvent, une adresse électronique suffit.

Découverte de météorite

Une grande découverte est annoncée, due à nos amis du Planétarium d'Epinal : Une "pierre étrange" a été trouvée dans les Vosges par Didier Mathieu et son équipe, et a été identifiée par l'institut de minéralogie de l'université de Strasbourg comme étant incontestablement une METEORITE !

Riche en fer et en nickel, c'est une météorite différenciée, arrachée par collision du coeur d'un astéroïde. C'est un fragment d'une pierre plus grande qui s'est brisée dans l'atmosphère terrestre. Ce qui signifie que d'autres fragments restent à découvrir, une quête patiente et passionnée, que l'équipe d'Epinal et leurs nombreux amis poursuivent.

Toutes nos félicitations !

Agnès Acker, Observatoire de Strasbourg et
Association des Planétariums de Langue Française

Questionnaire sur les Cahiers Clairaut

Les rubriques principales sont : "Cours", "Articles de fond", "Histoire", "Documents anciens", "Avec nos élèves", "Observations", "Réalizations", "Curiosités", "Réflexions", "Remue-méninges", "Lecture pour la Marquise", "Les potins de la Voie Lactée", "La vie Associative", "Le courrier des lecteurs"

Quelles rubriques lisez-vous en premier ?

Quelles rubriques ne vous intéressent pas ?

Quelles rubriques souhaiteriez-vous voir se développer ?

Le niveau mathématique moyen vous convient-il ?

Quelles améliorations souhaiteriez-vous voir dans les prochains numéros ?

Réponse à envoyer à : G. Paturel, Observatoire de Lyon, 69561 Saint-Genis Laval CEDEX
patu@obs.univ-lyon1.fr

Liste de diffusion

Les adhérents qui souhaitent être inscrits peuvent envoyer un message à : jripert@ac-toulouse.fr.
Ils recevront en retour un fichier d'aide pour ouvrir un compte. N'hésitez pas, j'attends vos messages.

Jean Ripert, secrétaire du CLEA

Solution du "remue-méninges"

1. Si on calcule le nombre de jours entre l'éclipse de Soleil du 3 octobre 2005 et celle du 29 mars 2006, on obtient 177 jours, soit exactement 6 lunaisons. Il est obligatoire d'avoir un nombre entier de lunaisons puisqu'une éclipse de Soleil a nécessairement lieu à la Nouvelle Lune.

2. Vous savez sans doute qu'il n'y a pas d'éclipse de Soleil à chaque Nouvelle Lune parce que le plan de l'orbite de la Lune n'est pas confondu avec le plan de l'écliptique : ainsi, vue depuis la Terre, la Lune passe la plupart du temps au nord ou au sud du Soleil lors de la Nouvelle Lune.

On appelle ligne des nœuds l'intersection de ces deux plans. Si la ligne des nœuds était fixe, on aurait en gros deux éclipses de Soleil par an. Mais elle se déplace avec une période de 18,6 ans dans le sens rétrograde, ce qui raccourcit la période moyenne entre deux éclipses de Soleil. On peut avoir ainsi deux éclipses distantes de 5 lunaisons seulement comme entre le 11 septembre 2007 et le 11 février 2008.

On peut aussi avoir exceptionnellement deux éclipses lors de deux Nouvelles Lunes successives. Dans ce cas, elles sont toutes les deux partielles. Ce sera le cas le 1^{er} juin et le 1^{er} juillet 2011.

3. La Lune passe à l'apogée en moyenne tous les 27,555 jours. C'est ce qu'on appelle la période anomalistique. Cinq révolutions anomalistiques durent 165 jours. Entre les deux éclipses (177 jours), on a donc 12 jours de plus et la Lune se retrouve donc presque au périhélie (celui-ci aura lieu le 28). L'éclipse ne sera pas annulaire, au contraire, la Lune étant proche, la totalité sera relativement longue (jusqu'à plus de 4 minutes).

P.C.

Le CDROM "Explorer l'Univers" édité par l'Association des Planétariums de Langue Française

Ce CDROM propose une série d'exercices basés sur l'acquisition et l'analyse d'images astronomiques. Destiné à des jeunes (10-17 ans), il présente de façon attractive certains concepts de la physique, et la pratique d'outils scientifiques (mesurer, estimer les incertitudes, changer de repères, et d'unités...), pour traiter des images numériques en utilisant la technologie informatique.

Renseignements : aplf@astro.u-strasbg.fr



Articles à venir

Cours élémentaire IX ; Pendule de Foucault en carton ; La distance de la galaxie M31 ; Les étoiles variables ; Les ondes gravitationnelles. La méthode de Roemer vue comme un effet Doppler-Fizeau.

Remerciements: Nous remercions A.M. Paturol et Chantal Petit pour la relecture de ce Cahier.

Les fiches pédagogiques du CLEA

HS1 L'astronomie à l'école élémentaire	10 €
HS2 La Lune, niveau "collège"	10 €
HS3 Le temps, les constellations, niveau "lycée"	10 €
HS4 Astronomie en quatrième	10 €
HS5 Gravitation et lumière, niveau "terminale"	12 €
HS6 L'âge de la Nébuleuse du Crabe, niveau "lycée"	
4 diapositives et 12 jeux de 2 photographies	16 €
HS7 Etude du spectre du Soleil	8 €
HS8 Etoiles variables	12 €
HS9 Mathématiques et Astronomie	12 €

Numéros hors série des Cahiers Clairaut réalisés par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA.

Documents édités par le CLEA

Transparents animés pour rétroprojecteurs	8 €
T1 le Transsolute (phases de la Lune et éclipses)	
T2 Les fuseaux horaires	
Filtres colorés	11 €
Six feuilles de filtres colorés et une feuille de réseaux	
CD ROM CLEA	8 €
Astronomie et Astrophysique Programme de seconde, collège, TPE	
CD ROM Collection des Cahiers Clairaut	30 €
du numéro 1 au numéro 108 avec index de recherche	
Documents photographiques CLEA-Belin	5 €
20 exemplaires des 8 documents (phases de la Lune spectres de Rigel, Saturne, Arcturus, 69 Pisces, etc)	

Publications du CLEA

Les publications ne peuvent être vendues qu'aux adhérents du CLEA (loi de 1901). Prix franco de port.
Toute commande de documents est à envoyer à :

CLEA - Laboratoire d'Astronomie, Bât. 470 – Université Paris Sud – 91405 Orsay cedex

En joignant un chèque à l'ordre du CLEA.

Fascicules pour la formation des maîtres en astronomie

F1 L'observation des astres, le repérage dans l'espace et le temps	7 €
F2 Le mouvement des astres	8 €
F3 La lumière messagère des astres	9 €
F4 Naissance, vie et mort des étoiles	10 €
F6 Univers extragalactique et cosmologie	9 €
F7 Une étape de la physique, la relativité restreinte	16 €
F8 Moments et problèmes dans l'histoire de l'astronomie	10 €
F9 Le système solaire	14 €
F10 La Lune	10 €
F11 La Terre et le Soleil	12 €
F12 Simulation et astronomie sur ordinateur	8 €

Cours photocopiés d'astrophysique

Maîtrise de l'université Paris XI Orsay

P1 Astrophysique générale	10 €
P2 Processus de rayonnement	5 €
P3 Structure interne et évolution des étoiles	5 €
P4 Astrophysique solaire	5 €

Diapositives

Chaque série de 20 vues avec son livret de commentaires 10 €

D1 Les phénomènes lumineux	
D2 Les phases de la Lune	
D3 Les astres se lèvent aussi	
D4 Initiation aux constellations	
D5 Rétrogradation de Mars	
D6 Une expérience pour illustrer les saisons (série de 8 vues)	5 €
D7 Taches solaires et rotation du Soleil	
D8 Comètes	

CONDITIONS D'ADHESION ET D'ABONNEMENT POUR 2004

Adhésion au CLEA pour 2005	5 €
Abonnement aux CAHIERS CLAIRAUT n° 109 à 112	25 €
<i>L'adhésion est indispensable pour tout achat de documents y compris l'abonnement aux Cahiers Clairaut</i>	
Le numéro des Cahiers Clairaut	7 €
COLLECTIONS DES CAHIERS CLAIRAUT des années antérieures :	
. du début (1978) à 1997	14 €/an
. à partir de 1998	17 €/an
COLLECTION COMPLETE DES CAHIERS CLAIRAUT SUR CD-ROM du n° 1 au n° 108	30 €

Pour adhérer au CLEA et s'abonner aux Cahiers Clairaut, s'adresser à :
Béatrice Sandré, trésorière du CLEA,
11, rue Couperin – 91440 BURES SUR YVETTE. Chèque à l'ordre du CLEA.

CLEA

Laboratoire d'astronomie, bât. 470

Université de Paris Sud, 91405 ORSAY cedex

Tél./fax : 01 69 15 63 80

Adresse électronique : clea.astro@astro.u-psud.fr

Adresse du site du CLEA : www.ac-nice.fr/clea

Trois livrets (40 pages en quadrichromie), 1CD et 1 DVD en exclusivité pour le **CLEA** :

- Livrets "Terre, Planète à Protéger" (par J. diMeglio, géophysicienne) et "L'univers astronomique" (par A. Acker et J.C. Pecker, astrophysiciens) – Format A5 – Prix unitaire = 1,2 € HT
 - Livret "La Terre et son Univers en 7 animations" (par M. Dumas) – A4 – Prix unit = 2,5 € HT
- **Offre spéciale = 36 € pour 10 de chacun des livrets (30 en tout) soit 1,2 € HT par livret**
- CD "Terre, planète à protéger" (avec animation sonores, vidéos et images) pour 8 € HT
 - DVD "40 ans de l'ESO" (d'après un film de 52 minutes) pour le prix exceptionnel de 4 € HT

(+ TVA = 5,5 %). Merci de vous adresser à Laurence DEMOND, APLF – Observatoire de Strasbourg
11, rue de l'université – 67000 Strasbourg (Fax 03 90 24 24 17) e-mail : aplf@astro.u-strasbg.fr

Directeur de la Publication : Georges Paturel
Imprimerie Haugel, 92240 Malakoff

dépôt légal : 1er trimestre 1979
numéro d'inscription CCPPAP : 61660
prix au numéro : 7 €