

Notions abordées en cours de physique-chimie et situations de la vie courante

I. Exploration de l'espace

1- De l'atome aux galaxies

Notion	Illustrations/Situations
1.1- Présentation de l'univers L'atome, la Terre, le système solaire, la Galaxie, les autres galaxies.	- Des quarks aux galaxies
1.2- Echelle des longueurs. Echelle des distances de l'atome aux galaxies. Unités de longueur. Taille comparée des différents systèmes. Evaluer expérimentalement une distance : Méthode des parallaxes, technique de la visée, diamètre apparent. Comment déterminer les ordres de grandeur (taille d'une molécule, épaisseur d'un cheveu).	- Plus c'est gros, moins c'est dense - Comment mesurer la largeur du sillon d'un CD ou d'un DVD ?
1.3-L'année de lumière. Propagation rectiligne de la lumière. Comment mesurer le rayon de la Terre ? Méthode d'Eratosthène. Vitesse de la lumière dans le vide et dans l'air. Comment mesurer la distance Terre- Lune, de la profondeur d'un fond marin ? Usage du sonar. Intérêt de l'année de lumière.	- Pythagore versus Thalès ou Eratosthène revisité - Voiliers et avions furtifs - Ils partent à plus de 10^{21} mais se virent moins de 100 en arrivant au port
Comprendre que « voir loin, c'est voir dans le passé »	- Notre présent n'a conscience que du passé extérieur - Une galaxie de prime jeunesse car fort lointaine

2- Messages de la lumière

Notion	Illustrations/Situations
2.1- Un système dispersif, le prisme. Radiation, réfraction, indice d'un milieu transparent, lois de Descartes.	- Comment reconnaître une gemme grâce à sa réfraction ? - Mirage, mon beau mirage... - Etre un homme invisible n'est pas simple
Dispersion de la lumière blanche par un prisme, variation de l'indice d'un milieu transparent selon la radiation qui le traverse.	- Lumière dispersée - L'écharpe d'Iris
2.2- Spectres d'émission et d'absorption. Spectres d'émission, spectres continus d'origine thermique, spectres de raies. Spectres d'absorption, bandes d'absorption de solutions colorées. Raies d'absorption caractéristiques d'un atome ou d'un ion. Spectres d'une lampe à incandescence : variation de la couleur du spectre en fonction de la température du filament.	- Lampes à décharge - Eclairage public au sodium
2.3- Application à l'astrophysique Comment le spectre d'une étoile nous renseigne sur sa température et sur sa composition chimique ?	- Bunsen et Kirchhoff - La découverte des fullerènes

Préambule : les amateurs trouveront de très nombreuses simulations en physique sur le site suivant, entièrement téléchargeable : <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/index.html>

1- De l'atome aux galaxies

1.1- Présentation de l'univers.

Des quarks aux galaxies.

Voici deux sites bien illustrés — en n'oubliant pas de croiser les informations proposées :

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Ordre_de_grandeur_\(longueur\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Ordre_de_grandeur_(longueur))

http://abc.free.fr/infini_fichiers/infinineg.htm

1.2- Echelle des longueurs.

Plus c'est gros, moins c'est dense.

Le physicien américain Steven Weinberg, prix Nobel de Physique 1979, aurait dit un jour qu'on pouvait faire peur aux enfants en leur disant combien d'années lumière de plomb un neutrino pouvait traverser. En effet, il faudrait un mur de plus de 3000 années lumière — soit plus que la longueur du rayon du bulbe de la Voie Lactée — pour être sûr de « stopper » un faisceau de neutrinos. Cela pour illustrer le colossal pouvoir de pénétration de ces particules dont la variété électronique a une masse environ 200 000 fois plus faible que celle de l'électron — faible certes, mais non nulle —, constituant ainsi l'objet matériel de masse la plus petite qui soit. Tout cela fait que des flots de neutrinos traversent en permanence la Terre entière, et donc les êtres vivants, comme si de rien n'était : les neutrinos interagissent infiniment peu avec la matière et sont donc de ce fait totalement inoffensifs pour les organismes vivants. Mais tout ce qui est « petit » n'est pas nécessairement « léger »... et réciproquement. Ainsi, un proton qui a un rayon d'environ 0,8 femtomètre — ou encore 0,8 fermi du nom du physicien italien Enrico Fermi (1901-1954), prix Nobel de physique 1938 ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$) — a-t-il une masse d'environ $1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. La « matière » qui le constitue a donc une masse volumique de $8 \cdot 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, soit quatre fois la masse volumique moyenne de la matière nucléaire mais près de 10^{18} fois celle de l'eau. Pour mieux fixer les idées, 1 tonne de matière protonique occuperait le volume d'une sphère de rayon d'environ... 7 micromètres.

A l'autre bout de l'échelle, considérons le *groupe local* qui est l'amas galactique regroupant près d'une quarantaine de galaxies dont notre Voie Lactée. Ce groupe local occupe un volume dont le rayon est de l'ordre de 3 millions d'années lumière, soit $3 \cdot 10^{22} \text{ m}$ et sa masse totale est de 2300 milliards de masses solaires, soit $4,5 \cdot 10^{42} \text{ kg}$ — ici point n'est besoin de précision numérique, tous ces nombres n'étant que des évaluations. La masse volumique moyenne du groupe local est donc d'environ $4 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ — ce qui est bien de l'ordre de grandeur communément retenu pour le groupe local qui est de $10^{-25} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, il faut en effet ajouter à la matière visible la matière dite « noire ». Il s'ensuit que si la masse du groupe local était répartie de manière homogène, un cube de côté 1000 km de cette matière n'aurait qu'une masse de... 0,1 μg .

La masse de la Voie Lactée est évaluée à 200 milliards de masses solaires, soit $4 \cdot 10^{41} \text{ kg}$ — les évaluations sont assez diverses selon les auteurs — cette masse étant *grosso modo* répartie dans un disque de diamètre de l'ordre de 100 000 années lumière, soit 10^{21} m et d'épaisseur de l'ordre de 6000 années lumière. La masse volumique moyenne de notre galaxie est donc de l'ordre de $8 \cdot 10^{-21} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ce qui est l'ordre de grandeur de la densité matérielle au niveau du système solaire — cette densité varie fortement d'un point à un autre de la Voie Lactée, étant beaucoup plus importante au centre où il y aurait fort probablement un trou noir et beaucoup plus faible dans le *halo*.

Enfin, toute la masse du système solaire étant quasiment concentrée dans le Soleil — $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ — mais répartie dans une sphère ayant pour rayon celui de l'orbite de Neptune — soit $4,5 \cdot 10^{12} \text{ m}$ —, planète la plus éloignée du Soleil — Pluton a été récemment déchu de son statut de planète et il n'y a pas que les planètes dans ce système, il y a les astéroïdes, les poussières,... — on trouve une masse volumique moyenne de $5 \cdot 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ce qui est l'ordre de grandeur communément admis. Mais si l'on ramène ce système à un disque de même rayon et ayant l'épaisseur du diamètre du Soleil — $1,4 \cdot 10^9 \text{ m}$ — cette densité augmente considérablement puisqu'elle atteint alors $2,2 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

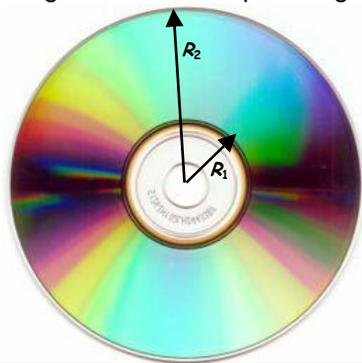
Il n'en reste pas moins que *plus l'ordre de grandeur des dimensions du système augmente, plus sa densité matérielle moyenne diminue* — comme toujours, la moyenne gomme les hétérogénéités matérielles.

Pour en savoir plus, en n'oubliant pas de croiser les informations proposées — ce qui est particulièrement nécessaire ici :

http://www.dil.univ-mrs.fr/~gispert/enseignement/astronomie/5eme_partie/voieLactee.php

Comment mesurer la largeur du sillon d'un CD ou d'un DVD ?

Dans un CD (Compact Disc) ou un DVD (Digital Versatile Disc), l'information est stockée sur une piste d'alvéoles de $0,5\mu\text{m}$ de profondeur enroulée en spirale, la distance a entre deux alvéoles côte à côte étant de $1,6\mu\text{m}$ pour le CD — parfois légèrement moins pour augmenter la capacité de stockage — et de $0,74\mu\text{m}$ pour le DVD.

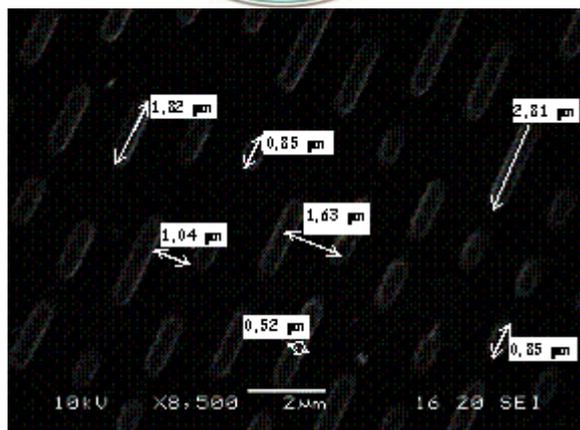


Lorsque la face d'un CD ou d'un DVD est présentée à la lumière blanche, la lumière réfléchiée est irisée, donc décomposée. Le disque se comporte alors comme un *réseau optique en réflexion*. Si celui-ci est éclairé par un faisceau laser — monochromatique —, la lumière est alors réfléchiée dans des directions bien déterminées.

Une partie de la lumière est réfléchiée sur le faisceau incident si le disque est parfaitement perpendiculaire à ce dernier. On trouve aussi de la lumière réfléchiée dans les deux directions $\theta_{\pm 1}$ et éventuellement dans deux autres directions $\theta_{\pm 2}$ plus écartées. La théorie des réseaux montre alors que — la longueur d'onde du laser étant désignée par λ et le pas du réseau par a :

$$\sin \theta_{\pm 1} = \pm \frac{\lambda}{a} \quad \sin \theta_{\pm 2} = \pm 2 \frac{\lambda}{a}$$

La mesure de ces angles par le biais de leur sinus permet ainsi d'atteindre la longueur a séparant deux alvéoles côte à côte — cf. figures ci-contre :



Vue d'un CD au microscope électronique
Document Wikipédia

$$\sin \theta_1 = \frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + d^2}} = \frac{\lambda}{a} \Rightarrow a = \lambda \sqrt{1 + \left(\frac{d}{l_1}\right)^2}$$

Mais à quoi sert de connaître le pas a d'un CD ? A déterminer sa capacité de stockage. Considérons par exemple un CD audio. Les alvéoles défilent à la vitesse constante de $1,22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sous la tête de lecture — vitesse standard imposée aux constructeurs de lecteurs CD —, ce qui implique une rotation du disque asservie à la position de ladite tête de lecture. Ainsi, le disque doit tourner plus vite quand elle est près du centre que lorsqu'elle est près de la périphérie — $\Omega = v/r \propto 1/r$.

La piste d'alvéoles étant comprise entre les rayons $R_1 = 2,25\text{ cm}$ et $R_2 = 5,90\text{ cm}$, le disque tourne à un peu plus de $500\text{ tr}\cdot\text{mn}^{-1}$ quand la tête de lecture est près du centre et à environ $200\text{ tr}\cdot\text{mn}^{-1}$ quand elle est à la périphérie. Calculons maintenant la longueur L de la piste d'alvéoles : la surface d'aire aL recouverte par cette piste spiralee correspond à l'aire comprise entre les rayons R_1 et R_2 , d'où $aL = \pi R_2^2 - R_1^2$.

La mesure optique nous donnant $a \approx 1,6\mu\text{m}$, il vient $L \approx 5840\text{ m}$, soit près de 6 km ! La durée de musique enregistrable sur un tel disque est donc de $\Delta t \approx L/v = 5840/1,22 \approx 80\text{ minutes}$: un disque de concertos de Bach totalement gravé pris en exemple offre effectivement 79 minutes et 8 secondes d'écoute.

Et en termes d'octets, quelle capacité cela représente-t-il ? Les 1 du codage binaire correspondent au passage d'un creux d'alvéole à la surface du disque ou à celui de la surface au creux, les 0 étant traduits par un niveau constant. Or les plus petites alvéoles ont une longueur de l'ordre de $0,85\mu\text{m}$: c'est donc la « longueur » d'un 0 ou d'un 1. Ces 0 et ces 1 (bits) sont regroupés par groupe de 8 (octets, ou *bytes* en anglais), si bien que la « longueur » d'un octet est de $l_0 = 6,8\mu\text{m}$. Un disque CD-R 800MB peut ainsi stocker :

$$L/l_0 = \pi R_2^2 - R_1^2 / l_0 a \approx 858 \cdot 10^6 \text{ octets} = 858 \text{ Mo}$$

L'ordinateur indique effectivement une capacité de $856,775\text{ mégaoctets}$: compte tenu des erreurs de mesure effectuées sur les longueurs, le résultat obtenu par le calcul est on ne peut mieux dans l'intervalle de confiance. Si l'on désire enfin augmenter cette capacité, il faut diminuer le produit $l_0 a$: c'est ce qui permet de passer par exemple au DVD $4,7\text{ GB}$ ($4,7 \cdot 10^9\text{ bytes}$).

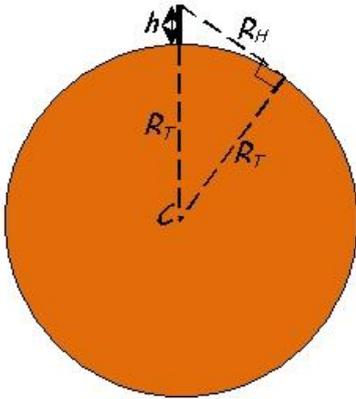
Pour en savoir plus, en n'oubliant pas de croiser les informations proposées :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Disque_compact

1.3- L'année de lumière.

Pythagore versus Thalès ou Eratosthène revisité.

Sur une plage, un homme dont les yeux sont à $h=1,65$ m du sol voit s'éloigner un voilier qui vient de quitter cette plage. Le voilier file vers le large à 5 nœuds de moyenne, soit $2,57 \text{ m.s}^{-1}$. Il met une demi-heure pour atteindre l'horizon.



Cette observation permet d'obtenir une évaluation assez convenable du rayon terrestre. En effet, l'application du théorème de Pythagore à la figure ci-contre nous donne, R_T désignant le rayon terrestre et $R_H = v\Delta t$ celui de l'horizon vu par l'observateur :

$$R_T + h^2 = R_T^2 + R_H^2 \Rightarrow 2R_T + h^2 = R_H^2$$

Comme la hauteur h est naturellement très inférieure au rayon terrestre, on en

$$\text{conclut : } 2R_T h \approx R_H^2 \Rightarrow R_T \approx \frac{R_H^2}{2h} = \frac{v\Delta t^2}{2h}$$

Soit avec les valeurs données : $R_T \approx 6500 \text{ km}$

Le même observateur se trouve en haut d'une falaise à L'Houmeau, près de La Rochelle : il observe les plages de la pointe d'Arcey en face de lui qui semblent être posées sur l'horizon. Le recours à *Google Earth* — ou à *Géoportail* du site de l'IGN — permet là encore d'en déduire le rayon terrestre. En effet, le point d'observation s'avère être à 11 m au dessus du niveau de la mer — les yeux de l'observateur en sont donc à 12,65 m — et la distance séparant l'observateur du point observé de 12,6 km.

Il s'ensuit, en utilisant la formule établie ci-dessus : $R_T \approx 6300 \text{ km}$



Bien sûr, il ne s'agit ici que d'une évaluation. Il faudrait en toute rigueur également tenir compte de la réfraction aérienne, si bien que les unités et les dizaines sont parfaitement superflues eu égard à l'incertitude des mesures. En effet, nous avons en prenant 1 cm d'incertitude sur h et 100 m sur R_H :

$$\frac{\Delta R_T}{R_T} = 2 \frac{\Delta R_H}{R_H} + \frac{\Delta h}{h} \approx 2\% \Rightarrow \Delta R_T \approx 130 \text{ km}$$

Rappelons qu'Eratosthène avait trouvé pour la circonférence terrestre quelque chose comme 39375 km — 250000 stades de 157,5 m — ce qui donne pour le rayon terrestre 6270 km. L'incertitude relative de sa mesure est la somme de celle commise sur la mesure angulaire — on peut l'évaluer à 2 % — et de celle commise sur la mesure de la distance entre Sienne et Alexandrie — disons au mieux 1 %, voire plus.

En conséquence la méthode pythagoricienne n'a vraiment rien à envier à celle de Thalès. Notons pour finir que le rayon terrestre mesuré aujourd'hui varie entre 6378 km à l'équateur et 6357 km aux pôles, valeurs qui se trouvent dans l'intervalle de confiance des trois mesures précédentes — la première étant « limite » ce qui n'est pas pour surprendre, d'autant que, comme déjà dit, il n'a pas été tenu compte des effets de réfraction à l'horizon (mirage).

Voiliers et avions furtifs.



Les navires utilisent des radars pour repérer sur mer les autres navires, à savoir ils envoient des impulsions électromagnétiques — de 2 à 12 GHz — qui sont réfléchies par tout obstacle *métallique* sur leur trajet. Si une partie de ce signal réfléchi est reçue par le navire émetteur, celui-ci peut en déduire la position — Δt étant la durée séparant l'émission de la réception, $d = c\Delta t/2$ — mais aussi la vitesse de cet obstacle — par décalage Doppler. Le problème des voiliers est qu'ils sont soit en bois, soit en matériaux composites et que de ce fait ils donnent peu prise à la réflexion des ondes radar. C'est pourquoi les navigateurs accrochent au mât un réflecteur métallique — souvent en aluminium — ayant une forme octaédrique concave — voir figure ci-contre. Cette forme a été choisie pour optimiser les réflexions dans toutes les directions, optimisation accrue par les mouvements du voilier. Toutefois, il peut y avoir phénomène d'interférence destructive entre le signal radar incident et un signal réfléchi par la mer, ce qui relativise quelque peu l'efficacité de ce système.

Il est possible aussi d'utiliser des systèmes actifs qui, dès réception du signal, réémettent un signal vers l'émetteur radar.



Inversement, les avions dits *furtifs* sont conçus pour ne pas être détectés par les radars, du moins autant que faire se peut. Pour cela on privilégie les formes planes fortement inclinées afin de renvoyer les ondes radar dans une direction autre que la direction incidente, voire parfois des formes arrondies pour diffuser l'onde réfléchie. On utilise aussi des matériaux qui absorbent fortement les ondes radar, ce qui diminue l'intensité des ondes réfléchies.

F 117 furtif (document Wikipedia)

Pour en savoir plus, en n'oubliant pas de croiser les informations proposées :

<http://www.hisse-et-oh.com/articles/article.php?article=374>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Furtivit%C3%A9>

Ils partent à plus de 10^{21} mais se virent moins de 100 en arrivant au port.



L'un des réflecteurs lunaires déposés par la mission *Apollo XI* (document Wikipedia)

La simplicité du principe de la mesure de la distance Terre-Lune à l'aide d'un faisceau laser ne doit pas faire illusion : les modalités de cette mesure sont plus complexes qu'il y paraît. Diverses missions américaines et soviétiques ont en effet déposé sur la Lune des réflecteurs destinés à renvoyer sur Terre un faisceau laser émis par exemple par une station sise à l'observatoire de la côte d'Azur, le Centre d'Etudes et de Recherches en Géodynamique et Astronomie (CERGA). Le laser utilisé est un laser YAG (Yttrium, Aluminium, Grenat) solide émettant dans le vert — $\lambda = 532 \text{ nm}$ — à raison de 10 impulsions par seconde, chaque impulsion ayant une énergie de 0,2 J. Conformément à la loi de Planck $E = hc/\lambda$, chaque photon dans ces impulsions a une énergie de $3,7 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, si bien qu'il y a un peu plus de $5 \cdot 10^{17}$ photons par impulsion. Le problème est que le faisceau laser n'est pas un faisceau parallèle, mais présente une divergence de $1,78 \cdot 10^{-4}$ degré...

Ce qui, s'il n'y avait pas l'atmosphère terrestre, donnerait déjà sur la Lune une tache d'un diamètre de

$$1,78 \cdot 10^{-4} \times \pi / 180 \times 400000 \approx 1,2 \text{ km} .$$

En fait, à cause de l'atmosphère terrestre, la tache verte sur la Lune a un diamètre allant de 10 à 14 km — selon les conditions atmosphériques. Un réflecteur, de surface de l'ordre du m^2 , ne recueille donc qu'une infime partie de l'énergie émise par le laser et le récepteur au niveau terrestre une partie encore plus infime. Ainsi, pour 6000 impulsions envoyées — soit une énergie de 1,2 kJ représentant plus de 10^{21} photons — moins de 100 photons sont récupérables sur Terre — soit une énergie inférieure à $3,7 \cdot 10^{-17} \text{ J}$! De plus, il faut « trier » ces photons au milieu des photons « parasites » reçus par le récepteur.

Mais les chercheurs y arrivent, et de mieux en mieux. Ainsi, en 1970, cette distance était mesurée à 15 cm près. Aujourd'hui, elle est mesurée au millimètre près et on espère faire mieux ! Ces mesures montrent que la Lune s'éloigne bien de la Terre à raison d'environ 3 centimètres par an par effet collatéral des marées.

Pour en savoir plus, en n'oubliant pas de croiser les informations proposées :

<http://www.rc.obs-azur.fr/cerga/laser/laslune/llr.htm>

Notre présent n'a conscience que du passé extérieur.

Le 9 janvier 2008, Alicia Soderbers et Edo Berger de l'université de Carnegie-Princeton et membres de l'équipe du télescope spatial Hubble, étudient des images transmises par le télescope spatial *Swift* de la NASA. Ils s'intéressent en particulier à une supernova de la galaxie NGC 2770 située à 90 millions d'années-lumière dans la constellation du Lynx. A 9 h 33 TU (temps universel), une lueur rouge apparaît sur leur écran.

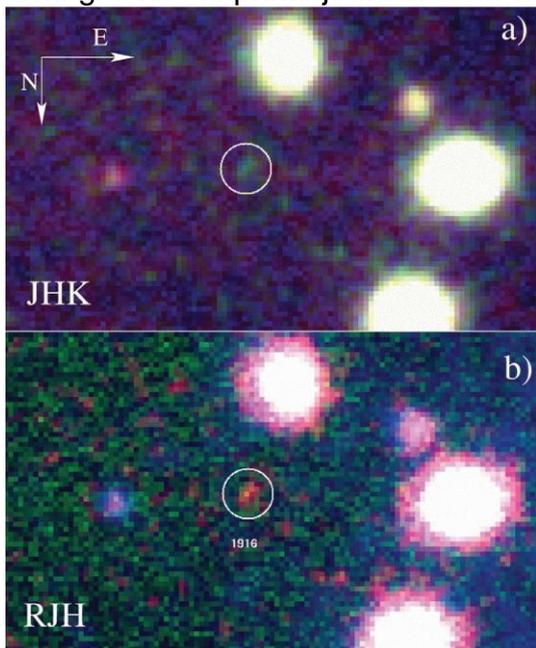
L'émission dure environ cinq minutes ! Elle provient bien de cette galaxie, mais d'un endroit différent de celui de la supernova qu'ils voulaient étudier. Le télescope *Swift* est alors orienté vers l'endroit repéré, à savoir une étoile cataloguée SN 2008D. Autrement dit, ces deux astronomes ont été les premiers témoins de l'histoire à apercevoir une étoile « en train » de se transformer en supernova...

Enfin *témoins* d'un phénomène *en train* de se passer est ici une manière de dire car, lorsque l'étoile en question s'est muée en supernova, c'était il y a... 88 millions d'années, en plein crétacé terrestre, alors que l'homme n'existait pas encore.

Pour en savoir plus, en n'oubliant pas de croiser les informations proposées :

http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/astronomie/d/sn2008d-lettoile-qui-a-explose-sous-les-yeux-des-astronomes_15607/

Une galaxie de prime jeunesse car fort lointaine.



Le premier mars 2004, deux équipes d'astronomes français et suisses publiaient qu'ils avaient détecté une galaxie qu'ils dénommèrent Abell 1835 IR1916 et qui était la plus lointaine connue à ce jour puisque située à $13,230.10^9$ années lumière. Cette observation a été effectuée à l'aide du Very Large Telescope (VLT) de l'European Southern Observatory basé au Chili.

Cette galaxie a été observée grâce à un effet de réfraction gravitationnelle. En effet, l'amas galactique Abell 2218, qui ne se trouve qu'à 2 milliards d'années lumière de nous, joue le rôle de lentille gravitationnelle permettant de voir IR1916 située bien loin derrière elle. Comment a été déterminée la distance qui nous sépare d'elle ? Grâce au *redshift*. Lorsqu'une automobile s'éloigne de nous, le son que nous percevons d'elle est plus grave : c'est l'effet Doppler acoustique qui peut permettre de déduire la vitesse d'éloignement de la voiture. Pour une galaxie lointaine, c'est un peu la même chose : le spectre lumineux que nous percevons d'elle est systématiquement décalé vers le rouge et plus ce décalage est important, plus elle est éloignée.

Document extrait de l'article des découvreurs,
H. Pelot et al. In *Astronomy & Astrophysics*, 03-2004

Or IR1916 présente un décalage relatif de $z=10$, le plus important jamais enregistré en observation astronomique : elle est donc la plus éloignée observée à ce jour — dans le cas présent, le *redshift* ne trouve pas tant son origine dans la vitesse d'éloignement de la galaxie que dans un effet gravitationnel prévu par la relativité générale.

Il n'en reste pas moins que si nous retenons pour l'âge de l'Univers après le *big bang* 13,700 milliards d'années, la galaxie observée aujourd'hui était de toute prime jeunesse puisqu'elle n'avait que 470 millions d'années — rapportée à une vie humaine moyenne de 80 ans, elle n'avait pas trois ans et à cette époque, le système solaire n'existait pas encore. Qu'est-elle devenue aujourd'hui ? Il est impossible de le dire puisque nous ne sommes qu'en situation d'observer non pas où cette galaxie se trouve, mais où elle se trouvait il y a fort longtemps, dans l'enfance de l'Univers.

Pour en savoir plus, en n'oubliant pas de croiser les informations proposées :

<http://webast.ast.obs-mip.fr/galaxies/>

http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9calage_vers_le_rouge

2- Message de la lumière

2.1- Un système dispersif, le prisme.

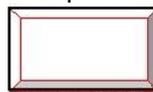
Comment reconnaître une gemme grâce à sa réfraction ?

Supposons que vous déteniez des pierres transparentes de joaillerie se ressemblant et que par mégarde vous les mélangiez. Comment les reconnaître ? Il vous faut pour cela disposer d'un flacon d'iode de méthylène liquide dont l'indice de réfraction est 1,75. Pour préciser, supposons que vous disposiez de trois gemmes transparentes et incolores, une *moissanite* (indice : 2,70), un *zircon* (indice : 1,95) et un morceau de *verre-flint* (indice : 1,64). Si vous plongez les trois gemmes dans l'iode de méthylène, la moissanite se manifeste immédiatement, car c'est la seule... à flotter (la masse volumique du liquide est de 3330 kg.m^{-3} , celle de la moissanite de 3210 kg.m^{-3}).

Posez alors le zircon et le flint dans un bac à fond en verre dépoli, recouvrez-les d'iode et éclairez-les verticalement par au-dessus. Si vous les observez par en dessous, vous verrez l'aspect ci-dessous.

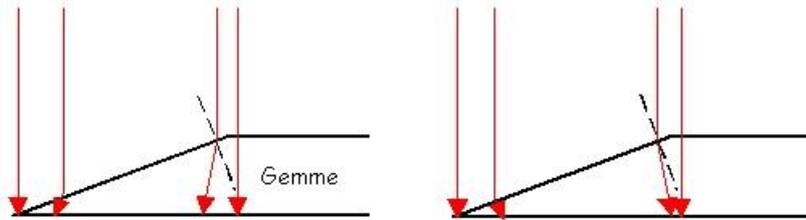


Pierre numéro 1
Contour clair
Arêtes sombres



Pierre numéro 2
Contour sombre
Arêtes claires

Si la pierre a un indice inférieur à celui de l'iode, les rayons lumineux réfractés au niveau des arêtes s'écartent de celle-ci — les rayons dans la pierre s'écartent de la normale — mais au contraire se concentrent au niveau du contour : ce dernier apparaît donc éclairé et les arêtes sombres. Inversement, si la pierre a un indice supérieur à celui de l'iode, les rayons lumineux réfractés au niveau des arêtes se concentrent — les rayons dans la pierre se rapprochent de la normale — mais au contraire s'écartent au niveau du contour.



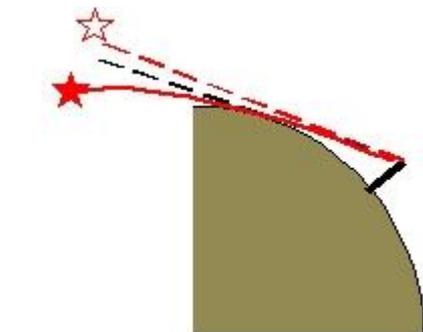
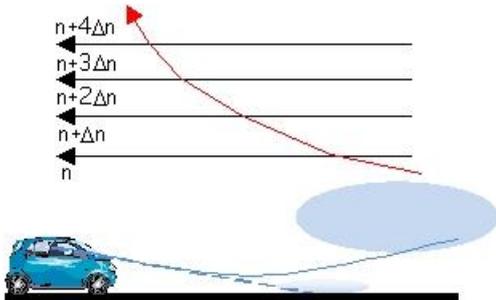
Nous pouvons donc en conclure que la pierre numéro 1 est un verre flint et la 2 un zircon.

Mirage, mon beau mirage...

Un mirage est l'image plus ou moins déformée d'un objet observée dans une direction différente de celle où se trouve l'objet. Ainsi, l'image d'une oasis peut-elle surgir au sein d'un désert aride mais évidemment en un endroit différent de celui où se trouve l'oasis objet.



Mirage observé à Penglai le 7 mai 2006
(China Foto Press/Xinhua)



Un mirage n'est en aucun cas une illusion, c'est une image objective qui peut être photographiée comme ce fut le cas ci-dessous où une ville a surgi de la mer à Penglai, sur la côte Est chinoise, le 7 mai 2006, un jour particulièrement caniculaire. Les témoins pouvaient même observer le mouvement des piétons et des automobiles.

Mais point n'est besoin d'un désert ou d'une canicule extrême pour observer un mirage. Tout d'abord, de quoi résulte-t-il ? D'un phénomène de *réfraction* dans un milieu transparent dont l'indice varie continument pour une raison ou pour une autre (température, pression, concentration,...). Puisque le rayon lumineux se rapproche de la normale au dioptre à chaque fois qu'il pénètre un milieu plus réfringent, nous pouvons en déduire qu'un rayon lumineux s'incurve dans un milieu optiquement inhomogène, le centre de courbure se trouvant dans la direction des indices croissants.

Ainsi, par une belle journée d'été, pouvez-vous avoir l'impression que la route sur laquelle vous circulez est mouillée au loin. En fait, il ne s'agit que d'un mirage et ce que vous voyez n'est pas de l'eau, mais une portion de ciel. Le bitume de la route étant chaud, l'air au voisinage de celle-ci est moins dense et l'indice croît ainsi avec l'altitude. Les rayons issus du ciel au voisinage de l'horizon s'incurvent vers le haut et l'observateur voit donc ces portions de ciel au niveau de la route. Les fluctuations thermiques se traduisant par des fluctuations d'indice, l'image observée « vibre », se déforme et donne l'illusion qu'il s'agit là de flaques d'eau.

Autre exemple :

une étoile vue juste au dessus de l'horizon est en fait en dessous de celui-ci. La densité de l'atmosphère terrestre diminuant avec l'altitude, les rayons issus de l'étoile s'incurvent en effet vers le sol. L'astronomie d'observation doit tenir compte de cet effet.

Mirage aussi quand un navire ou une île peuvent être observés dans certaines conditions météorologiques sur, voire au dessus de l'horizon alors qu'ils sont géométriquement en dessous.

Ce phénomène est certainement à l'origine de la légende du *hollandais volant* et de son vaisseau fantôme qui flottait au dessus des eaux.

Pour en savoir plus, en n'oubliant pas de croiser les informations proposées :

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Mirage>

Etre un homme invisible n'est pas simple.

C'est en 1897 que l'écrivain visionnaire britannique Herbert George Wells (1866-1946) publia *l'homme invisible*. La licence romanesque permet à Wells d'imaginer une telle performance. Mais il n'est pas si simple que cela de devenir invisible. Certes, le principe en est simple : il suffit de donner au corps humain un indice égal à celui de l'air, différent de l'unité sur la quatrième décimale. Mais la température du corps humain n'est pas uniforme et il s'ensuivrait des variations locales d'indice qui pourrait mettre à mal l'invisibilité souhaitée. De plus, la température de l'atmosphère elle-même varie d'un point à un autre...

Bref, il faudrait imaginer un système d'asservissement thermique qui permette d'égaliser localement l'indice du corps avec celui de l'extérieur. Sans compter que si l'homme invisible a une température de 37°, il est parfaitement visible en rayonnement infrarouge.

Autre problème : comment peut voir l'homme invisible puisqu'il est transparent ? Il faut nécessairement qu'il y ait au niveau de ses globes oculaires une zone d'absorption de la lumière. Mais si cette absorption était trop importante, l'homme invisible serait visible par ses yeux. Enfin, il ne vaut mieux pas que l'homme invisible sorte en hiver : son

souffle pourrait aisément le rendre repérable et, étant fort peu vêtu, ses étournements seraient le plus sûr moyen pour le déceler.

En fait, le meilleur moyen d'être invisible est de ne pas être vu. Pour cela, plutôt que d'utiliser la transparence, il suffit de faire contourner à la lumière l'objet que l'on veut soustraire aux regards — c'est le principe de la *cape d'Harry Potter*. Ainsi des objets galactiques se trouvant derrière un objet très massif visible ou invisible peuvent-ils être vus devant ce dernier — lentille gravitationnelle. A notre échelle, une telle éventualité ne ressort plus du délire poétique. En effet, en mai 2006, des chercheurs anglais et américains avançaient qu'il était possible de rendre invisibles des objets en utilisant une « cape » en *méta-matériaux* constitués de plusieurs couches d'une matrice en fibre de verre entre lesquelles sont insérés des anneaux métalliques. De tels matériaux peuvent alors présenter des indices de réfraction *négatifs* — le rayon réfracté est du même côté de la normale que le rayon incident ! Ce qui n'était en mai 2006 qu'une possibilité théorique devint réalité en octobre de la même année : le physicien David Smith de la Duke University réussit à concevoir une « cape » fonctionnant dans le domaine des microondes et à rendre ainsi invisible un anneau de cuivre se trouvant à l'intérieur. Et fin 2006, l'équipe américaine du laboratoire Ames dirigée par Costas Soukoulis annonçait qu'elle avait réalisé des méta-matériaux fonctionnant dans le rouge — $\lambda = 780 \text{ nm}$.

Le problème dans tout ça est que si une personne rendue invisible sous une telle cape voulait donner un coup de fil grâce à son portable ou simplement voir à l'extérieur... elle deviendrait visible. Et il n'est pas certain que ce ne soit là qu'une simple question technique à surmonter.

Pour en savoir plus, en n'oubliant pas de croiser les informations proposées :

http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/physique-1/d/invisibilite-les-metamateriaux-arrivent-dans-le-visible_10196/

<http://www.ameslab.gov/final/News/2007rel/metamaterials.htm>

Lumières dispersées.

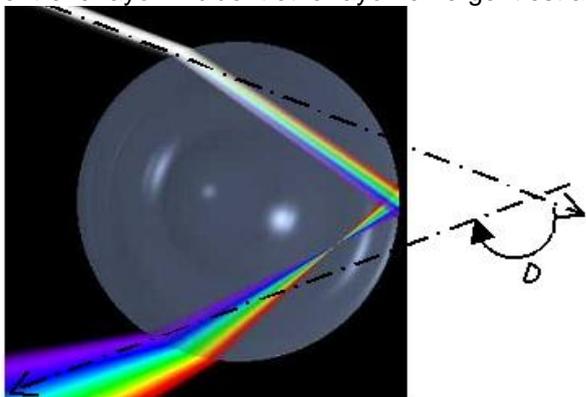
Les carreaux biseautés que l'on trouve sur certaines portes d'intérieur dispersent la lumière blanche, tout comme évidemment un prisme. Il en est de même pour les pieds de verre, les cristaux ou les gemmes transparentes — lustres, vraies et fausses pierres précieuses,...

Le phénomène d'*aberration chromatique* peut lui aussi être interprété de la même façon. Si les bords d'une lentille convergente s'apparentent à des bords prismatiques, le passage même de la lumière dans le verre occasionne le phénomène de dispersion. Ainsi, une lentille convergente donne-t-elle d'un faisceau parallèle de lumière blanche une tache irisée, chaque composante monochromatique ayant son foyer. Ce phénomène s'avérant parasite dans un instrument optique, on le juggle en accolant des lentilles convergentes et des lentilles divergentes — qui occasionnent une irisation en sens inverse.

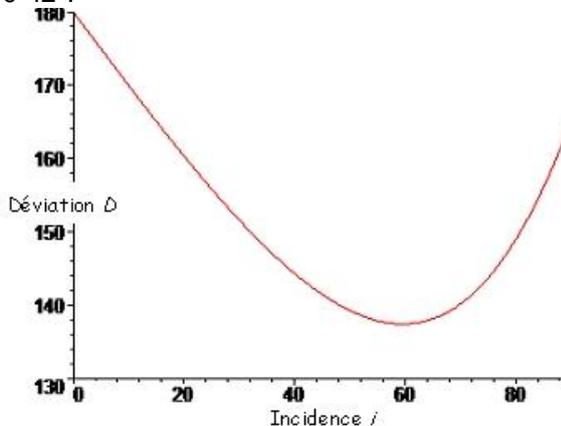
Si les corps transparents mettent en jeu un phénomène de dispersion de la lumière par réfraction — pas toujours perceptible, tout dépend de la loi d'évolution de l'indice en fonction de la longueur d'onde et de la géométrie du corps — une irisation de la lumière blanche n'est pas nécessairement due à une dispersion par réfraction. Les phénomènes d'interférence et de diffraction conduisent aussi à disperser la lumière blanche — franges en coin d'air, réseaux optiques,...

L'écharpe d'Iris.

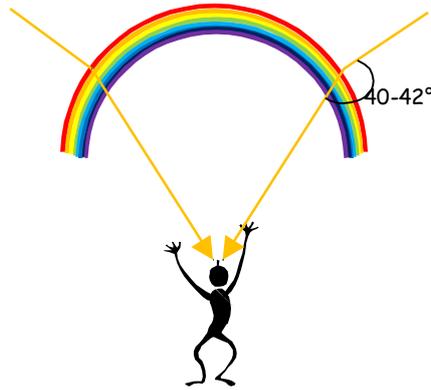
L'arc-en-ciel — pour les poètes, *l'écharpe d'Iris* — résulte d'un phénomène de dispersion de la lumière dans une population de gouttes d'eau. Il faut pour cela que la source lumineuse soit derrière l'observateur regardant le rideau de gouttes. Si i est l'angle d'incidence sous lequel un rayon blanc pénètre dans une goutte, la déviation du rayon émergent — angle entre la direction d'incidence et la direction d'émergence — est égale à $D = \pi - 2r - i$ où r est l'angle de réfraction dans la goutte — $\sin i = n \sin r$. Si l'on trace D en fonction de i — cf. graphe ci-dessous —, on constate que cette déviation passe par un minimum de $138^\circ - 140^\circ$ pour un angle d'incidence d'environ 60° . L'angle entre le rayon incident et le rayon émergent est alors de $40 - 42^\circ$.



Réfraction de la lumière blanche dans une goutte d'eau sphérique



Déviaton en fonction de l'angle d'incidence



Précisons ce résultat. En différentiant la déviation, il vient *pour une longueur d'onde donnée* — ce qui fixe n :

$$dD = 2 \, 2dr - di \text{ avec } \cos i \, di = n \cos r \, dr$$

Il y a un minimum de D quand sa différentielle est nulle, donc quand :

$$di = 2dr = 2 \frac{\cos i_m}{n \cos r_m} dr \Rightarrow 2 \cos i_m = n \cos r_m$$

Soit en élevant au carré et en utilisant la loi de Snell-Descartes :

$$\sin i_m = \sqrt{\frac{4 - n^2}{3}} = r \sin r_m$$

En prenant un indice de l'eau moyen de 1,335, on trouve ainsi $i_m = 59,3^\circ$ et $r_m = 40^\circ$, soit $D_m = 138,6^\circ$.

Or, qui dit minimum de déviation dit que cette déviation dépend alors peu de l'angle d'incidence autour de ce minimum : il en résulte une concentration des rayons émergents autour de la direction de déviation minimum et donc un maximum d'intensité lumineuse dans cette direction. C'est pourquoi l'observateur voit l'arc-en-ciel sous un angle d'environ 42° .

Comme l'indice de l'eau dépend de la longueur d'onde — à 20°C , il vaut 1,329 dans le rouge et 1,341 dans le violet —, la déviation minimum dépend donc aussi de la longueur d'onde — le rouge est vu sous l'angle de $42,24^\circ$ et le violet sous l'angle de $40,92^\circ$: ainsi, l'arc est bordé de rouge supérieurement et souligné de violet inférieurement.

Si le Soleil est à plus de 42° au dessus de l'horizon, l'arc-en-ciel est invisible en plaine — pas d'arc-en-ciel à midi — mais peut être vu si l'on est en altitude. En plaine, l'arc-en-ciel a son extension maximum quand le Soleil est juste au dessus de l'horizon.

La lumière dans les gouttes subit une deuxième, voire une troisième réflexion partielle. Ainsi est-il possible d'observer un second arc, inversé par rapport au premier quant aux couleurs et beaucoup moins intense. Dans de très rares occasions, un troisième arc peut être observable dans la direction du Soleil.

Enfin, notons que les gouttes doivent être assez grosses — de diamètre supérieur à 1 mm — pour que les préceptes de l'optique géométrique y soient applicables. Avec une brume ou dans les nuages, il n'y a pas d'arc-en-ciel à attendre : seul un halo blanchâtre sera observable. Un brumisateuse est donc à éviter pour générer un arc-en-ciel.

On peut utiliser le site de l'Université du Mans pour de bonnes simulations sur l'arc-en-ciel. Pour une étude mathématique et physique fouillée sur l'arc-en-ciel, voir les sites ci-dessous.

Pour en savoir plus, en n'oubliant pas de croiser les informations proposées :

<http://pagesperso-orange.fr/sam.electroastro/dossiers/arc-en-ciel/arc-en-ciel.htm>

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-arc-en-ciel.xml>

2.2-Spectres d'émission et d'absorption.

Lampes à décharge.

A partir de 1851, il fut plus aisé d'obtenir des hautes tensions pour effectuer des décharges électriques grâce à l'invention de la bobine à induction de Heinrich Daniel Ruhmkorff (1803-1877). Cinq ans plus tard, Heinrich Geissler (1814-1879), après avoir amélioré la technique du vide, réalisa des tubes à décharge présentant une partie capillaire où était observé une vive lueur de diverses couleurs selon le gaz (raréfié) se trouvant dans le tube. Mais il faudra attendre 1910 et Georges Claude (1870-1960) pour que les tubes de Geissler revisités soient utilisés à des fins domestiques. Après avoir mis au point un enduit fluorescent, Claude réalisa la première *lampe au néon*. Ce gaz émettant principalement dans le rouge, la lumière émise par ces tubes est rouge et donc peu propice à l'éclairage usuel. Cependant, puisqu'il ne présente pas de filament, il est aisé de donner au tube la forme que l'on veut et cet éclairage fut rapidement utilisé pour les enseignes lumineuses.

Le rayonnement blanc-bleuâtre émis par les vapeurs de mercures étant riche en ultraviolet est quant à lui utilisé dans les tubes d'aujourd'hui ou les lampes à basse consommation dont la surface interne est recouverte d'un enduit fluorescent excité par les UV, d'où leur nom de *tubes fluorescents* — préférable à celui de *néons*, ce gaz ayant

disparu de ces tubes. Les premiers tubes fluorescents *Osram*® ont fait leur apparition à l'Exposition Universelle de Paris en 1936.

Pour en savoir plus, en n'oubliant pas de croiser les informations proposées :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_%C3%A0_d%C3%A9charge

Eclairage public au sodium.

Les lampes haute pression à vapeurs de *mercure* (mélangées à de l'argon) ont longtemps servi à l'éclairage urbain. Elles tendent de plus en plus à être remplacées par des lampes haute-pression à *vapeurs de sodium*. Les premières lampes au sodium étaient en basse pression et leur lumière quasiment jaune pur avait un rendu en couleur exécrationnel. C'est pourquoi le premier souci fut d'augmenter la pression dans la lampe, afin d'enrichir le spectre lumineux émis et donc de mieux rendre les couleurs.

Pour en savoir plus, en n'oubliant pas de croiser les informations proposées :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_%C3%A0_vapeur_de_sodium

2.3- Application à l'astrophysique.

Bunsen et Kirchhoff.

« Nos connaissances positives par rapport aux astres sont nécessairement limitées à leur seuls phénomènes géométriques et mécaniques, sans pouvoir nullement embrasser les autres recherches physiques, chimiques, physiologiques et mêmes sociales que comportent les êtres accessibles à tous nos divers moyens d'observation. » Dans son introduction au tome 2 de son *Cours de philosophie positive*, Auguste Comte (1798-1857) affirme ainsi avec force au début des années 1830 qu'il sera toujours impossible de déterminer la nature physique et chimique des astres et qu'en conséquence il est inutile de s'en préoccuper.

Mais en 1860 Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) et Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) publièrent un article s'intitulant *Analyse chimique fondée sur les observations du spectre* : la spectroscopie analytique était née et allait cruellement faire mentir ce pauvre monsieur Comte qui était décédé trois ans plus tôt. Ainsi en 1861 les deux savants allemands allaient-ils découvrir par spectroscopie le *rubidium* — dans les lignes spectrales de la lépidolite — et le *césium*. William Crookes (1832-1919) découvrira quant à lui par le même procédé et la même année le *thallium*. Puis vinrent la découverte toujours par le même procédé de l'*indium* (1863), du *gallium* (1875), du *scandium* (1879) et du *germanium* (1886).

Mais il a mieux encore. Dès 1860, tout comme Galilée avait dirigé sa lunette initialement prévue pour l'observation terrestre vers le ciel, Kirchhoff entreprit d'analyser la lumière solaire... pour reconnaître dans son spectre des raies caractéristiques d'éléments présents sur Terre (comme le fer) : il offrait ainsi à l'astronomie un outil d'une rare puissance permettant de déterminer la composition qualitative et quantitative des étoiles.

Ainsi, l'astronome français Jules Janssen (1824-1907) fut l'un des premiers à associer spectroscopie et astronomie ce qui lui permit en 1868 de découvrir dans l'atmosphère solaire une nouvelle raie inconnue. Interprétant la découverte de Janssen, l'astronome britannique Joseph Norman Lockyer (1836-1920) donna le nom d'*hélium* — du grec *hélios* (*soleil*) — à ce gaz alors non reconnu sur Terre.

On peut lire l'article de Bunsen et Kirchhoff *en français* sur le site suivant :

<http://bibnum.education.fr/physique/analyse-chimique-fondée-sur-les-observations-du-spectre>

La découverte des fullerènes.

Dans son allocution Nobel, le chimiste britannique Sir Harold Kroto, qui reçut ce prix dans la catégorie chimie en 1996 avec les américains Robert F. Curl et Richard E. Smalley (1943-2005), Sir Harold Kroto donc raconte comment ils en vinrent à mettre en évidence la structure carbonée C_{60} que Smalley appela *Buckminsterfullerène*. Cette molécule fut initialement prédite théoriquement par le japonais Eiji Osawa en 1970. D'autres physico-chimistes prédirent également des structures carbonées autres que le graphite et le diamant. Mais en 1985 ces travaux étaient alors inconnus des découvreurs des fullerènes. Dans le milieu des années 1970, Harold Kroto et son équipe découvrirent par voie spectroscopique de longues chaînes carbonées dans le milieu interstellaires. A la même époque, Don Huffman et Wolfgang Krätschmer effectuaient des expériences en laboratoire dans le but de synthétiser l'étrange matériau carboné décelé dans ce milieu interstellaire. De son côté, Smalley développait d'ingénieuses techniques de synthèse chimique, en particulier celle d'abrasion laser. C'est la conjonction de toutes ces techniques et observations qui permit la découverte des fullerènes en septembre 1985. Il n'en reste pas moins que ces structures furent d'abord observées — certes sans être reconnues — dans l'espace et par voie spectroscopique. On trouvera ci-dessous le lien vers la conférence Nobel d'Harold Kroto et vers un autre site intéressant sur les fullerènes.

http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1996/kroto-lecture.pdf

<http://www-ipcms.u-strasbg.fr/spip.php?article309>