

LE RED SHIFT

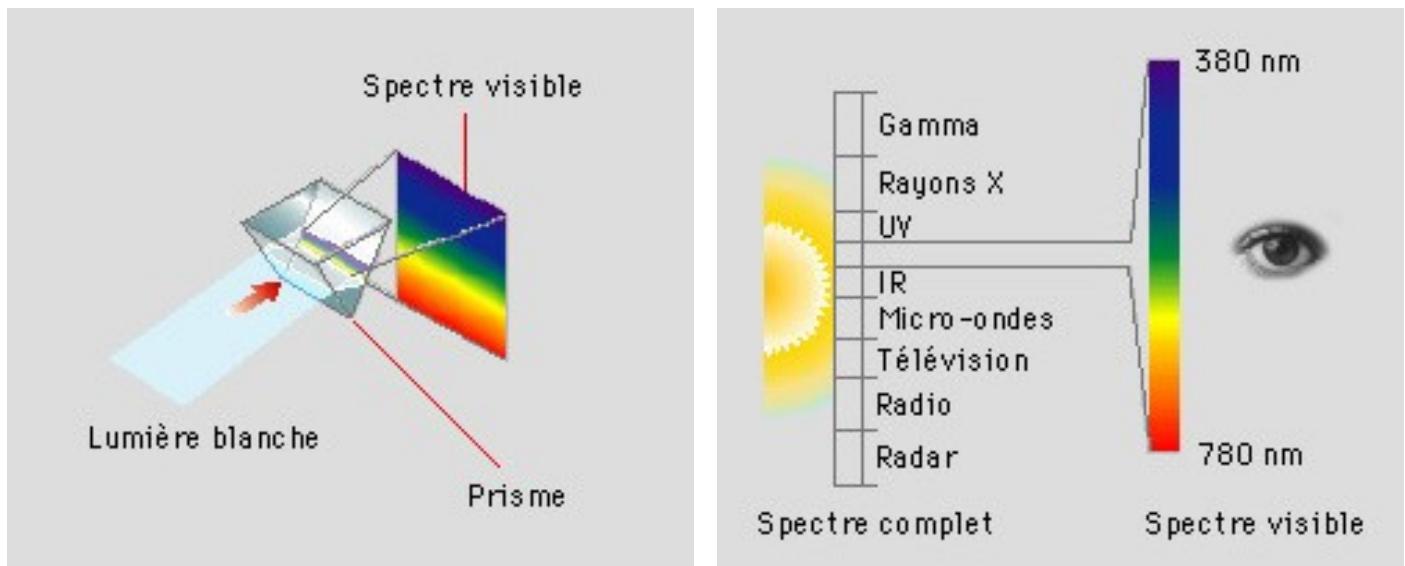
« Red Shift » en langue anglaise signifie « Décalage vers le rouge », et sous-entend « Décalage vers les longueurs d'ondes plus longues des raies spectroscopiques de la lumière émise par un astre ».

Les mots soulignés sont les plus importants. Il s'agit d'une propriété de la lumière provenant d'un astre, mais s'applique également à des objets réfléchissant la lumière d'un astre, comme par exemple les planètes.

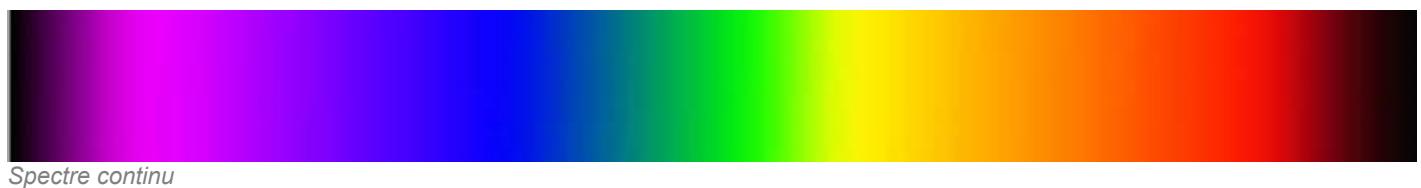
Spectroscopie

La lumière émise par une source lumineuse comme le cœur des étoiles, l'est dans toutes les longueurs d'ondes, dans des rapports déterminés. Un système dispersif tel qu'un prisme ou un réseau, sépare et étale toutes ces longueurs d'ondes. Pour la bande visible, il s'agit de l'arc-en-ciel bien connu de tous, et appelé *spectre continu*.





Un prisme, comme un réseau, décompose la lumière dite blanche (mélange de toutes les longueurs d'ondes visibles).



Plaçons un atome entre l'observateur et la source lumineuse. L'atome va absorber sélectivement des radiations caractéristiques de sa nature. Le spectre en sortie fera apparaître un déficit au niveau de ces longueurs d'onde absorbées.

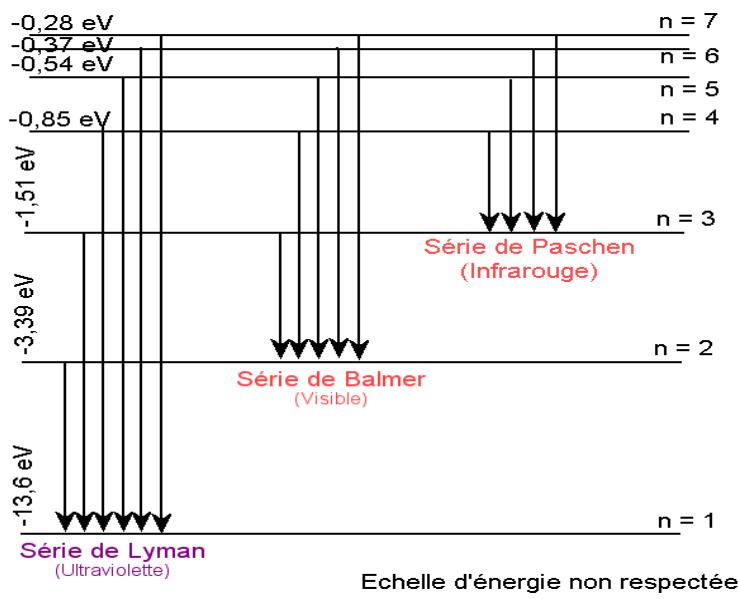
Spectre d'absorption (spectre du Soleil)



Dans la réalité, c'est l'atmosphère des étoiles qui joue le rôle de gaz absorbant certaines raies caractéristiques (hydrogène, hélium, oxygène, azote...). Le spectre d'une étoile est donc une suite de raies d'absorption. Puisqu'elles sont la signature, « l'empreinte digitale » de ses composants, l'étude des raies d'un spectre d'une étoile permet de déterminer la composition chimique de son atmosphère. A condition bien sûr de s'affranchir de l'absorption due aux molécules contenues dans l'atmosphère terrestre.

Quel phénomène engendre la production ou l'absorption des longueurs d'ondes spécifiques de la nature de l'élément considéré ?

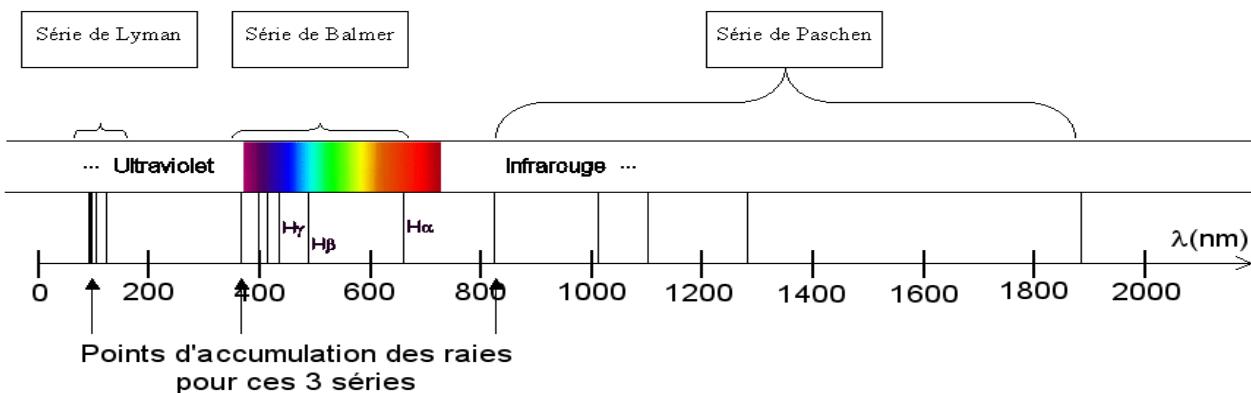
Prenons l'exemple simple de l'atome d'hydrogène. Cet atome contient un seul proton dans son noyau, et un électron qui ne peut être situé que sur les niveaux d'énergie bien déterminés.



Chauffé par exemple, l'électron peut passer du niveau d'énergie 1 à un niveau supérieur. Lorsqu'il reviendra au niveau 1, il restituera l'énergie empruntée sous forme d'une radiation électromagnétique (un photon ayant exactement l'énergie correspondant à la différence entre les deux niveaux).

Les raies spectrales correspondant au retour au niveau 1 forment un groupe appelé série de Lyman et est situé dans la partie Ultraviolette du spectre. Le retour au niveau 2 donne la série de Balmer dans le visible, le retour au niveau 3 fournit la série de Paschen dans l'infrarouge.

La première raie de la série de Balmer est bien connue des astronomes. C'est la raie H α à 656,28 nm, et donc située dans le rouge.



Dans ce schéma, les raies visibles H α , H β , H γ ... de la série de Balmer sont représentées. Elles sont de plus en plus rapprochées, de même que les niveaux d'énergie autour du noyau sont de plus en plus rapprochés.

Le niveau d'énergie le plus élevé correspond à l'expulsion de l'électron, et donc à l'ionisation de l'atome, et se retrouve dans le spectre au « point d'accumulation » de la série.

On raisonne de même pour le rapprochement progressif des raies des séries de Lyman et de Paschen.

Ces spectres sont de plus une source incroyable de renseignement, pour qui sait les déchiffrer. En particulier, elles peuvent donner une indication sur la vitesse de l'astre étudié, ce qui fait l'objet de ce document.

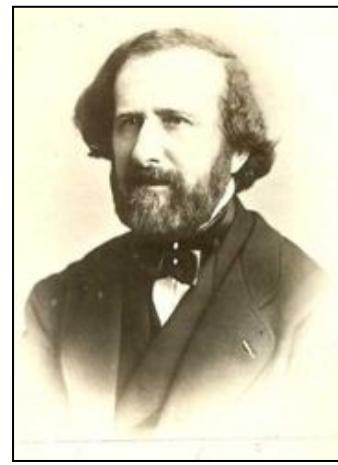
Tout ce que l'on sait des étoiles et du ciel en général, nous vient de la lumière que nous percevons. La seule exception est l'exploration directe de quelque objets du système solaire (Lune, planètes proches, quelques comètes, quelques astéroïdes...)

L'effet Doppler-Fizeau

Christian Doppler, physicien autrichien (1803-1853) et Hippolyte Fizeau, physicien français (1818-1896), découvrirent indépendamment la variation de la fréquence d'un son perçu lorsqu'une source sonore se déplace par rapport à un observateur.



Christian Doppler



Hippolyte Fizeau

Appliqué à la lumière, cet effet Doppler-Fizeau engendre un décalage des fréquences émises par une source en mouvement par rapport à un observateur.

Comment expliquer ce phénomène ? Par un exemple simple :

Une personne est debout sur le rivage d'un bord de la mer. Des vagues lui arrivent sur les pieds toutes les dix secondes.

La personne marche, puis court en direction du large (là où se forment les vagues). Elle va à la rencontre des vagues, celles-ci l'atteignent avec une fréquence plus élevée (par exemple toutes les huit secondes, puis toutes les cinq secondes).

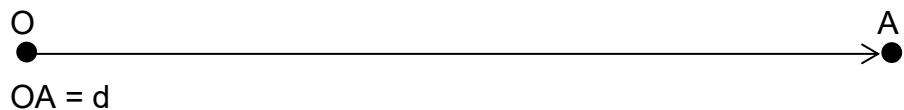
La personne fait alors demi-tour et marche puis court en direction de la plage. Les vagues l'atteignent avec une fréquence moins élevée, par exemple toutes les douze, puis quinze secondes.

Cette petite démonstration s'applique à une onde physique, comme un son, ou ici les vagues sur l'océan pour une meilleure compréhension.

Elle peut être extrapolée à une onde lumineuse, en considérant que le sommet d'une vague est le point d'amplitude maximale de l'onde lumineuse.

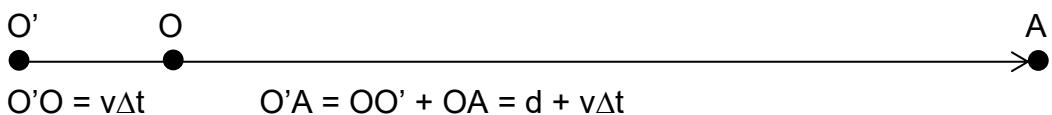
Pour la démonstration plus « physique », imaginons une source lumineuse ponctuelle O, émettant une lumière monochromatique en direction d'un observateur A. La source et l'observateur sont situés à une distance d.

A l'instant t_1 , une onde lumineuse est envoyée par O en direction de A :



A reçoit le signal de O à l'instant $t'_1 = t_1 + d/c$

A l'instant $t_2 = t_1 + \Delta t$, la source s'est éloignée de l'observateur d'une distance OO' , à la vitesse v , négligeable devant celle de la lumière.



A reçoit le signal de O' à l'instant $t'_2 = t_2 + v\Delta t/c + d/c$

L'intervalle de temps entre la réception des 2 signaux par l'observateur est :

$$t'_2 - t'_1 = t_2 + d/c + v\Delta t/c - t_1 - d/c$$

soit $t'_2 - t'_1 = t_2 - t_1 + v\Delta t/c$

$$t'_2 - t'_1 = \Delta t + v\Delta t/c$$

$$t'_2 - t'_1 = \Delta t (1 + v/c)$$

Dans le cas où les deux instants d'émission correspondent au passage d'une longueur d'onde entière de la lumière, $t'_2 - t'_1$ devient la période T de la lumière reçue qui s'exprime également par :

$$T = \lambda/c = \Delta t$$

et $T' = \lambda'/c = t'_2 - t'_1$

soit $\lambda' = \lambda (1 + v/c)$ ou $\lambda'/\lambda = 1 + v/c$

Si l'on pose le décalage des longueurs d'ondes de l'émission à la réception $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$, on obtient :

$$\lambda'/\lambda - 1 = v/c \quad \text{ou} \quad (\lambda' - \lambda)/\lambda = v/c$$

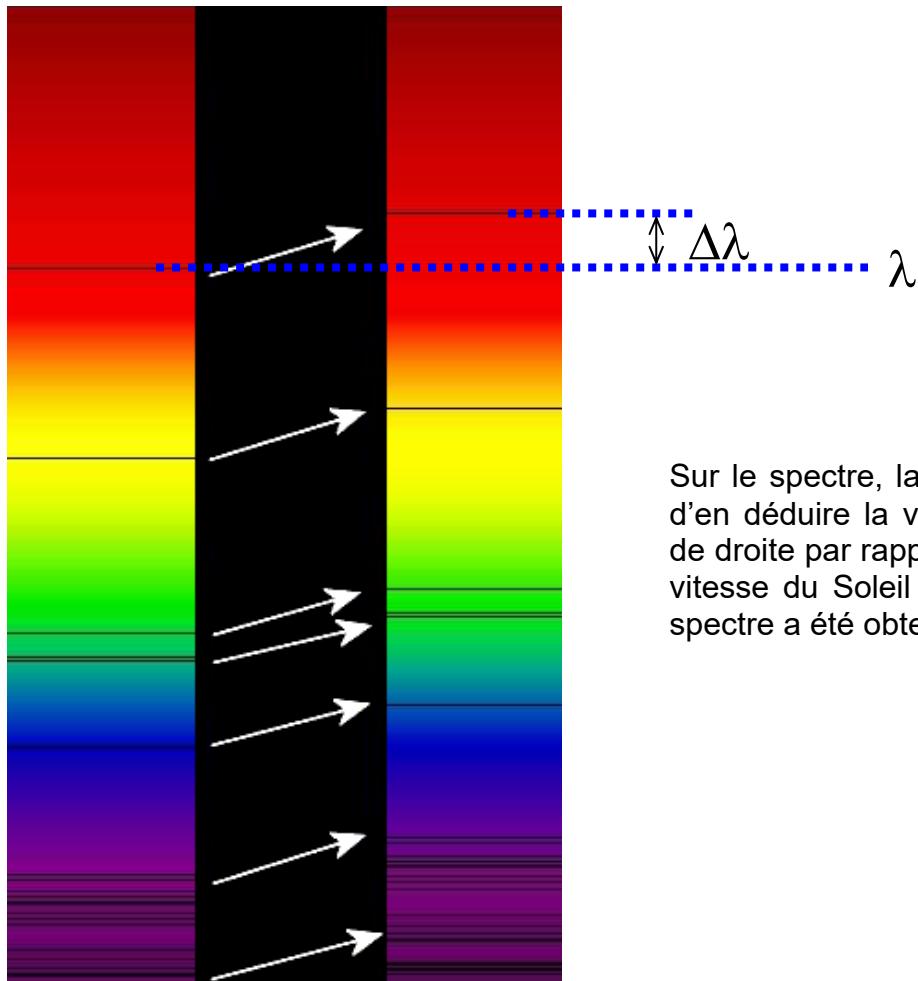
ou encore :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

Le rapport $\Delta\lambda / \lambda$ est appelé décalage vers le rouge ou Red Shift, et noté z.

$$RedShift = z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\nu}{c} \quad (1)$$

Dans l'illustration ci-dessous, la colonne de gauche montre le spectre visible du Soleil. Celui de droite le spectre d'une étoile éloignée de même type (même composition...).

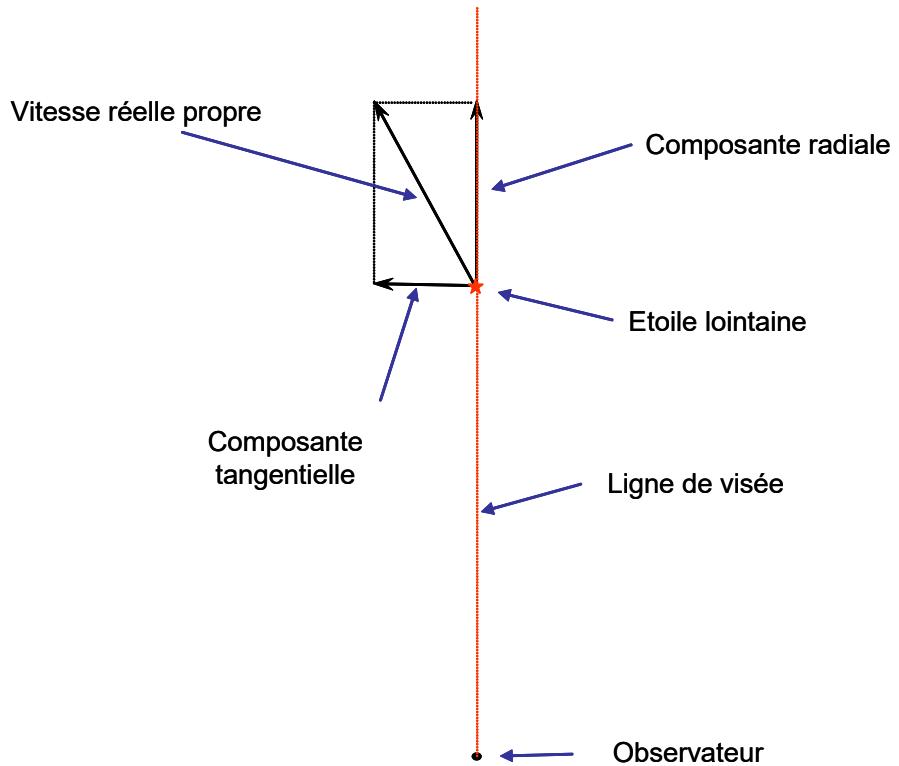


Sur le spectre, la mesure de $\Delta\lambda$ et de λ permet d'en déduire la vitesse d'éloignement de l'étoile de droite par rapport au Soleil (à condition que la vitesse du Soleil par rapport à la Terre, d'où le spectre a été obtenu, soit nulle !).

A noter que le fond du spectre continu est également décalé, contrairement à ce qui apparaît sur ce schéma.

On note que si la vitesse de l'objet est positive (il s'éloigne de nous), $\Delta\lambda$ est positif. Le décalage s'effectue vers les plus grandes longueurs d'ondes, vers le rouge pour la lumière visible. Inversement, un objet se rapprochant de nous (v négatif) verra sa lumière décalée vers le bleu pour la lumière visible (Blue Shift ?). C'est le cas pour la galaxie d'Andromède qui se rapproche de la nôtre.

D'autre part, la vitesse ainsi mesurée n'est pas la vitesse réelle de l'étoile.



Dans ce schéma, le vecteur de la vitesse réelle propre n'est pas aligné sur l'axe de visée. La vitesse réelle est décomposable en deux vitesses perpendiculaires, l'une tangentielle et l'autre radiale.

La mesure du Red Shift n'évalue que la vitesse radiale, composante de la vitesse réelle sur l'axe de visée de l'observateur.

La composante tangentielle a un z nul. Pour la déterminer, il est nécessaire d'utiliser une autre méthode, comme par exemple la méthode des parallaxes.

Expansion de l'Univers

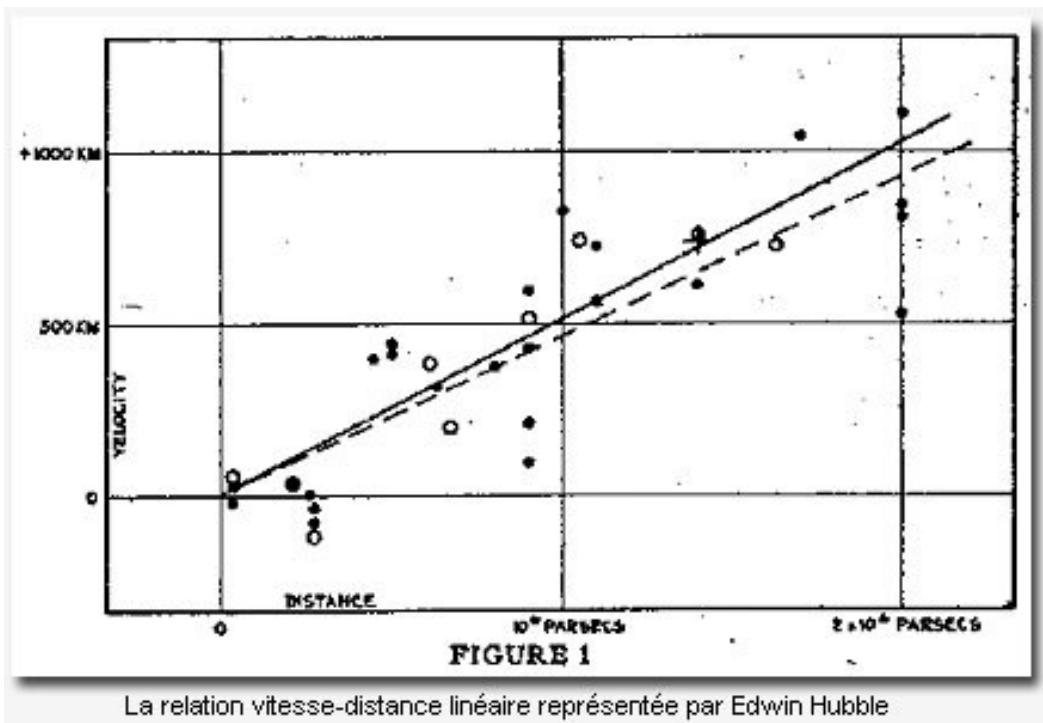
En 1929, Edwin Powell Hubble (1889-1953) formule une loi empirique selon laquelle les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse proportionnelle à leur distance.

Il conforte ainsi la théorie de l'expansion de l'Univers.

Cette loi approximative aux courtes distances, se révèle plus exacte à grande échelle, les composantes des vitesses particulières en dehors de l'axe de visée étant négligeables.



A partir du graphique ci-dessous (vitesse d'éloignement des galaxies en fonction de leur distance), Hubble a conclu que la vitesse cosmologique due à l'expansion était proportionnelle à la distance de l'objet. Au vu de la dispersion des points obtenus, il fallait vraiment y croire !



Aux grandes échelles, la vitesse radiale des galaxies est assimilable à la vitesse de l'expansion cosmologique et l'on, peut écrire :

$$V_{\text{cos}} = cz = H_0 d$$

où V_{cos} = vitesse cosmologique de la galaxie
 c = vitesse de la lumière
 z = red shift
 H_0 = Constante de Hubble
 d = Distance de la galaxie

La difficulté est d'évaluer avec suffisamment de précision H_0 . On l'estime actuellement à :

$$71 \pm 4 \text{ km/s/Mpc.}$$

Le graphique présenté par Hubble en 1929 conduit à un H_0 de 500, ce qui est très éloigné de la valeur actuellement admise et confirmée par d'autres méthodes.

En fait, ce H_0 de 500 conduit (voir plus loin) à un ordre de grandeur de l'âge de l'univers de 2 milliards d'années, ce qui déjà à cette époque ne collait pas avec les datations des plus anciennes roches terrestres.

La raison en est une mauvaise calibration de la méthode de mesure des distances des céphéides des galaxies étudiées. Au cours du temps, la valeur de H_0 s'est affinée.

Quelques remarques sur H_0 :

- $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$ signifie qu'une galaxie située à 1 Mpc de l'observateur s'éloigne à une vitesse de 71 km/s.
Une galaxie située à 10 Mpc s'éloigne à une vitesse de 710 km/s, etc.
Une galaxie située à plus de 4 225 Mpc s'éloigne donc à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière. Ceci indique que l'interprétation en terme de mouvement des galaxies *dans* l'espace devient impropre à grande distance. La relativité générale explique qu'il faut considérer que l'on est en présence d'une expansion de l'espace lui-même.
- H_0 est exprimé en km/s/Mpc, et est homogène avec l'inverse d'un temps.
- L'inverse de H_0 est appelé le « temps de Hubble »
- Age de l'univers :
Si l'on connaît la vitesse d'une voiture (par exemple 60 km/h), et si on peut mesurer sa distance parcourue (1 km), on sait calculer depuis combien de temps elle roule (1 mn).
De même, connaissant la vitesse cosmologique et la distance d'une galaxie, on peut en déduire depuis combien de temps elle est en expansion, c'est-à-dire l'âge de l'univers.
Cet âge est en fait le rapport de la distance sur la vitesse, soit l'inverse de la constante de Hubble (le « temps de Hubble »). Avec $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$, l'âge de l'univers ainsi calculé est de :

13,7 milliards d'années

Attention :

Tout ceci n'est valable que si la constante de Hubble est vraiment une constante. Si elle varie ou a varié avec le temps, ce qui semble être le cas, son inverse ne donne pas l'âge de l'univers !

Plus précisément, $1/H_0$ est le « temps de Hubble », et donne seulement une *idée* de l'âge de l'univers, qui va varier avec les hypothèses de la relativité générale.

Le « Rayon de Hubble » est la distance parcourue par la lumière pendant le temps de Hubble. Il donne une *idée* de la taille de l'univers observable.

Effets relativistes

Lorsque la vitesse mesurée par effet Doppler-Fizeau n'est plus négligeable devant celle de la lumière, la mécanique classique newtonienne ne permet plus de décrire convenablement le phénomène. Il faut y introduire la relativité.

Pour s'en convaincre, il suffit d'examiner l'équation (1) qui permet des vitesses supérieures à celle de la lumière, et est donc inadaptée. La relation à appliquer alors est la suivante :

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Maintenant, v ne peut pas dépasser la vitesse de la lumière

A noter qu'il existe un « Red Shift gravitationnel ». La relativité prévoit une dilatation du temps au voisinage des grandes densités de matière.

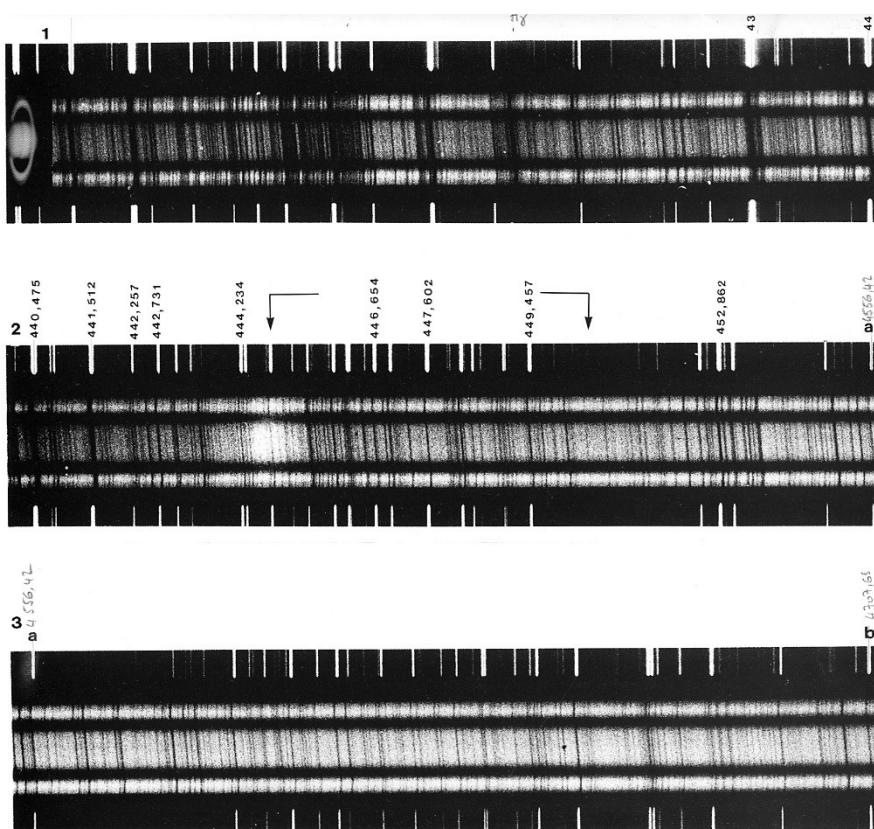
Cela affecte les longueurs d'ondes de la lumière passant à proximité, en les décalant vers le rouge.

Usage des Red Shifts

Les Red Shift ont deux utilisations :

- 1 - Ils permettent de mesurer les vitesses d'éloignement ou de rapprochement d'objets sur la ligne de visée.

Cliché pris le 24-7-1962



Par exemple, le spectre de Saturne et de ses anneaux (ci-contre), pris dans le sens équatorial, permet de mesurer la vitesse de rotation de la planète ainsi que des différentes parties de ses anneaux.

Ceci est valable si l'on a pris la précaution de prendre le spectre au moment de l'opposition de Saturne, instant où la vitesse relative de la planète par rapport à la Terre sur la ligne de visée est nulle.

On trouve ainsi un spectre avec des raies inclinées, montrant que l'ouest de la planète se rapproche, et l'est s'éloigne. L'inclinaison des raies traduit la vitesse de rotation de la planète.

Connaissant son rayon, les lois simples de la mécanique céleste classique permettent de calculer la masse de la planète, puis sa densité, sa pesanteur, sa vitesse d'évasion. La vitesse d'évasion ainsi calculée sur le bord des anneaux est supérieure à la vitesse propre de rotation des anneaux, ce qui permet d'affirmer que ces anneaux peuvent exister !!!

2 - Lorsque la vitesse tangentielle des objets étudiés est négligeable devant la vitesse sur la ligne de visée, celle-ci est assimilable à la vitesse cosmologique due à l'expansion de l'Univers. Ainsi, comme précisé dans un chapitre précédent, z donne une indication sur la distance de l'objet, à condition de connaître la constante de Hubble et de l'associer à un modèle cosmologique.

Le tableau suivant donne, pour quelques vitesses exprimées en km/s et en proportion de la vitesse de la lumière, le z correspondant, calculé avec les équations relativistes (ces effets se font sentir dès 10% de c).

| Vitesse (km/s) | %c | z |
|----------------|------|-------|
| 30 000 | 10 | 0,106 |
| 50 000 | 17 | 0,18 |
| 100 000 | 33 | 0,40 |
| 200 000 | 67 | 1,24 |
| 240 000 | 80 | 2,00 |
| 280 000 | 93,4 | 4,41 |
| 289 000 | 96,4 | 6,39 |
| 295 000 | 98,4 | 10,14 |
| 299 493 | 99,9 | 43,7 |

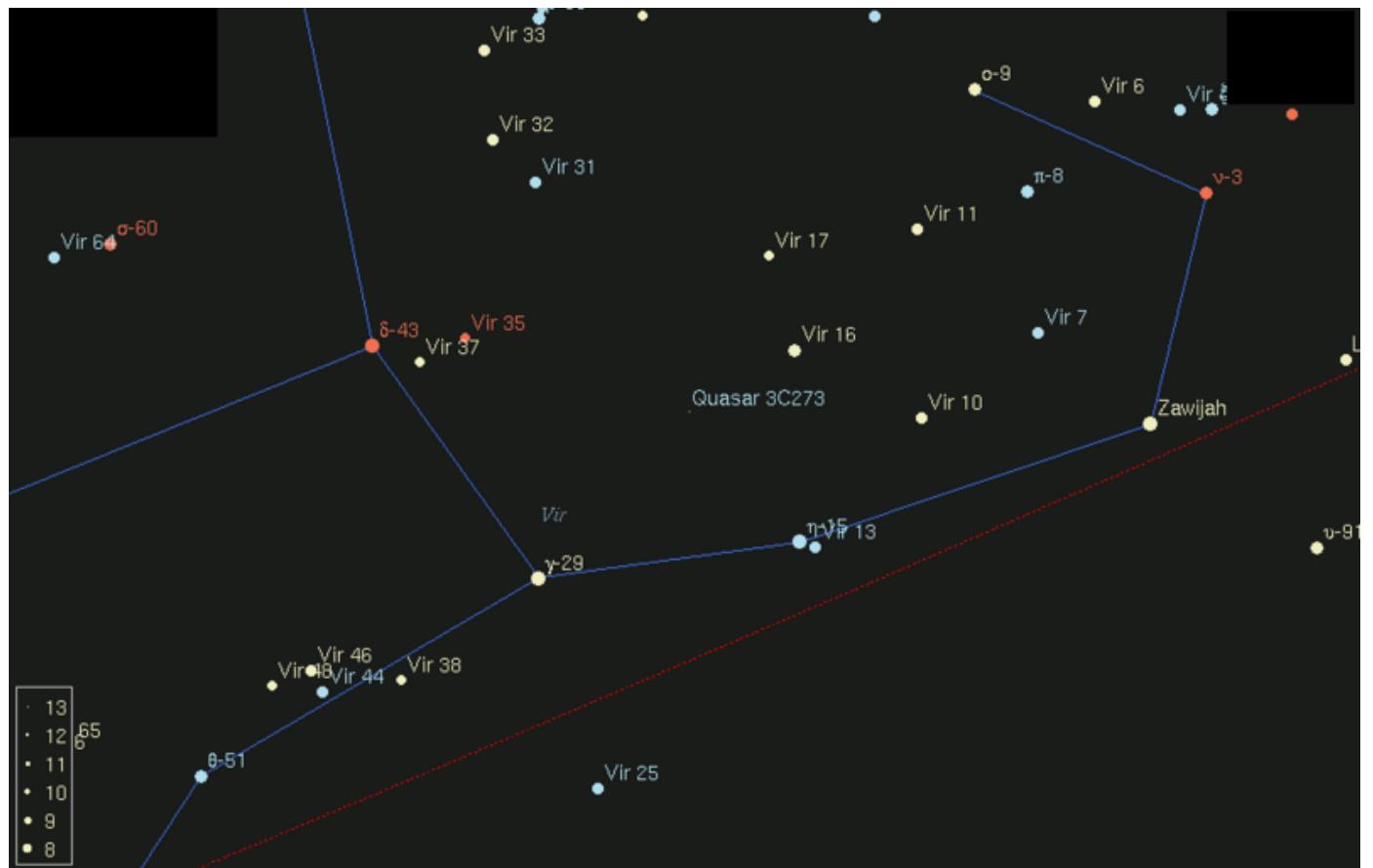
La dernière valeur, grise, correspond à des objets non encore découverts et qui, selon les théories actuelles ne peuvent exister. En effet, ils auraient été créés à une époque où les galaxies n'existaient pas encore.

L'objet actuel le plus lointain découvert, une galaxie, a un z de 11 (10,96 à 11,09), ce qui correspond à une vitesse d'éloignement très proche de c , et un âge d'environ 13,4 milliards d'années dans un Univers de 13,7 milliards d'années. Avec ces chiffres, elle serait aujourd'hui à 32 milliards d'au de nous. La lumière qui nous parvient a été émise alors que l'univers n'avait que 400 000 ans d'existence !

Ces objets très éloignés sont des quasars, galaxies jeunes hyperactives et ultra lumineuses.

Le célèbre quasar **3C 273** est le seul visible dans des instrument d'amateur de 200 mm de diamètre.

Il est situé dans la constellation de la Vierge :



Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

Magnitude apparente visuelle : 12,9
 Magnitude visuelle absolue : -26,7

Red Shift z : 0,158

Distance : 2,44 milliards d'au

Masse du noyau : 887 millions Ms