

Les quasars :  
Voir l'univers par l'effet Doppler.

Daniel Léo Suchet

12 août 2007

# Table des matières

<b>1</b>	<b>De l'observation aux caractéristiques physiques.</b>	<b>4</b>
1.1	Premières observations. . . . .	4
1.2	Propriétés radio. . . . .	4
1.2.1	Première description physique. . . . .	4
1.2.2	Limites de l'analyse radio. . . . .	6
1.2.3	Evolution des observations. . . . .	6
1.3	Propriétés optiques. . . . .	6
1.3.1	Photométrie. . . . .	7
1.3.2	Spectroscopie. . . . .	7
1.3.3	Phénomène de décalage spectral : le redshift. . . . .	8
1.3.4	Spectre des quasars. . . . .	9
1.4	Les noyaux actifs de galaxie (NAG). . . . .	9
<b>2</b>	<b>Redshift et effet Doppler.</b>	<b>11</b>
2.1	L'effet Doppler : présentation expérimentale. . . . .	11
2.1.1	L'effet Doppler : principe. . . . .	11
2.1.2	Modélisation expérimentale. . . . .	12
2.1.3	Exploitation de l'expérience. . . . .	13
2.1.4	Les limites de l'expérience : l'effet Doppler classique. . . . .	14
2.1.5	Les limites du modèle classique : l'effet Doppler relativiste . . . . .	15
2.2	Influence de l'effet Doppler sur un spectre. . . . .	16
2.2.1	Décalage de fréquence. . . . .	16
2.2.2	Elargissement des raies. . . . .	16
2.3	Interprétation du redshift . . . . .	17
2.3.1	Redshift : 3 Hypothèses. . . . .	17
2.3.2	Formulation des hypothèses. . . . .	18
2.3.3	Exploitation des hypothèses. . . . .	19
2.4	Application aux quasars : modélisation physique. . . . .	20
<b>3</b>	<b>Exploitation des quasars.</b>	<b>24</b>
3.1	Les quasars, astres de référence. . . . .	24
3.1.1	Distance des quasars. . . . .	24
3.1.2	Stabilité des quasars. . . . .	25
3.2	Les quasars, sondes de l'univers. . . . .	25
3.2.1	Composition de l'univers. . . . .	25
3.2.2	Température de l'univers. . . . .	26
3.3	Les quasars, témoins d'un modèle cosmologique. . . . .	26
3.3.1	Evolution des galaxies. . . . .	26
3.3.2	Expansion de l'univers. . . . .	28

<b>4 Annexes.</b>	<b>31</b>
4.1 Modélisation théorique de l'expérience. . . . .	31
4.2 Modélisation théorique de l'effet Doppler classique. . . . .	32
4.3 Modélisation théorique de l'effet Doppler relativiste. . . . .	33
4.4 Modélisation de l'effet Compton. . . . .	34
<b>5 Sources.</b>	<b>35</b>
5.1 Contact. . . . .	35
5.2 Bibliographie. . . . .	35
5.3 Informatique. . . . .	35

# Introduction :

On est souvent amené, pour étudier l'univers, à observer les corps qui s'y trouvent. Le bestiaire est riche, parfois exotique, et évolue sans cesse. Il contenait étoiles et planètes à l'Antiquité, et s'est enrichi au cours du temps. Aujourd'hui, on trie les étoiles, on classe les galaxies, on recense les trous noirs. Tous ces corps apportent des informations, mais certains plus que d'autres. Parmi les découvertes les plus récentes, les quasars constituent d'excellents informateurs.

Les quasars sont de puissantes sources d'énergies, situées aux confins de l'univers. Leurs rayonnements parcourent des distances gigantesques avant de nous parvenir. Ils sont donc susceptibles de nous renseigner à la fois sur les *limites* de notre univers, et sur l'espace qui nous en sépare. Pour exploiter ces informations, il est indispensable de comprendre ce qu'est précisément un quasar ou en tout cas d'en élaborer un modèle exploitable.

Il faut pouvoir deviner ce qui est réellement émis par le quasar pour déterminer les modifications que ce signal subi au cours de son trajet jusqu'à nous. La modélisation passe par une recherche de données, accumulées par des observations systématiques. On a alors un premier aperçu des propriétés physiques des quasars. L'ensemble de ces caractéristiques mettent en avant une importante *variabilité* du signal. Nous verrons que l'étude de l'effet Doppler permet non seulement d'expliquer cet effet, mais aussi de poser des hypothèses fondamentales pour comprendre comment fonctionnent les quasars. On peut alors analyser les signaux collectés, et tenter de percer certaines énigmes de l'univers. Les quasars deviennent alors des sondes cosmiques et témoignent de l'évolution cosmologique. Enfin, malgré les fluctuations de leurs rayonnements, ils constituent des points de référence pour le repérage spatial d'une remarquable *stabilité* grâce à leur position si particulière dans l'univers.

# Chapitre 1

## De l'observation aux caractéristiques physiques.

L'observation joue un rôle fondamental dans la compréhension des quasars. Elle s'est effectuée en trois temps : la découverte des "quasars", la collecte de données sur l'ensemble des corps observés, puis l'analyse systématique des données pour établir une liste de propriétés physiques. Deux types d'informations ont été particulièrement exploités dans le cas des quasars : on s'est tout d'abord servi des rayonnements radio, puis des propriétés optiques. Les points communs découverts entre les quasars et d'autres grandes structures de l'univers ont alors incité la communauté scientifique à regrouper ces objets en formant la classe des noyaux actifs de galaxie.

### 1.1 Premières observations.

1961 : l'analyse radio de la voûte céleste met en évidence une importante source : 3C48. Or l'analyse optique a montré que le seul corps présent dans la zone sondée n'était pas différenciable d'une étoile. Il s'agissait donc soit d'une radiosource majeure sous forme d'étoile, soit d'une étoile interposée entre la Terre et une radiosource. La seconde possibilité étant hautement improbable, la première a retenu le plus l'attention. L'analyse spectrale de 3C48 a abouti à un résultat surprenant : le corps semblait ne pas être composé de matière connue.

Une deuxième observation similaire a eu lieu en 1963 : 3C273 présentait des caractéristiques analogues à celles de 3C48, mais semblait plus brillante. Son spectre, lui aussi surprenant, a cependant pu être expliqué par le phénomène de redshift. Ce phénomène a permis de comprendre également le spectre de 3C48.

On a ainsi commencé à observer des corps très particuliers. 3C48 et 3C273 sont deux sources radio, semblables à des étoiles à l'observation, et présentant des redshifts élevés. Ce sont les deux premiers Quasars (Quasi-Stellar Radio Source) observés.

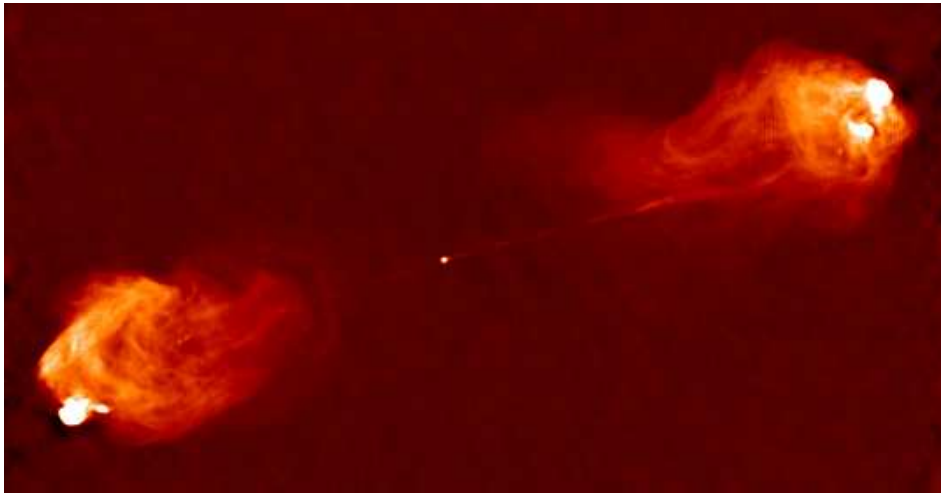
### 1.2 Propriétés radio.

Les premiers quasars observés ont été repérés à cause de leurs propriétés radio. Ils furent en effet identifiés comme de puissantes radiosources. L'analyse de leur rayonnement radio a beaucoup apporté sur la connaissance que nous avons d'eux à présent.

#### 1.2.1 Première description physique.

On a en effet pu topographier les premiers quasars à l'aide de leur rayonnement radio. Pour ce faire, il suffit de relever sur une carte l'intensité du rayonnement. On obtient alors une représentation commune à tous les quasars : ils semblent composés d'un corps central, de part et d'autre duquel des

jets sont émis sur plusieurs kiloparsecs<sup>1</sup> de long. Ces jets aboutissent en de grands lobes, dont les dimensions dépassent largement celles d'une galaxie standard.



Le rayonnement radio provient principalement du jet et des lobes. De plus, il nécessite la présence de deux modes d'émissions. On envisage en effet la coexistence d'un rayonnement thermique et d'un rayonnement synchrotron. Le premier est dû à la décélération de particules. Lorsque des particules se déplacent à des vitesses très élevées, puis ralentissent par frottement, elles émettent en effet un rayonnement radio. Le rayonnement synchrotron est lié quant à lui au mouvement très rapide de particules chargées, principalement des électrons, en présence d'un champ magnétique. Les électrons tournent alors en spirale sous l'effet de la force de Lorentz et émettent un puissant rayonnement.

Ces observations permettent d'esquisser la structure d'un quasar. Elles laissent supposer que le corps central est extrêmement dense. De la matière en est éjectée à grande vitesse, formant un long jet. Pris dans ce jet et propulsés à des vitesses relativistes, les électrons émettent un rayonnement synchrotron. Puis les frottements avec le milieu intersidéral ralentissent petit à petit la course des particules, jusqu'au moment où leur vitesse est trop faible pour conserver la cohérence d'un jet collimaté. La matière s'échauffe, émet un rayonnement thermique et s'accumule enfin dans les gigantesques lobes.

Il arrive qu'un quasar ne présente qu'un seul jet. On peut expliquer cette observation en s'appuyant sur le modèle qui sera développé plus tard dans ce dossier (voir 2.2.2 page 16). Supposons pour l'instant que les jets soient bien émis à des vitesses relativistes. La relativité prédit un phénomène de "boost Doppler" : une source qui vient vers nous voit son intensité augmenter, tandis qu'une source s'éloignant semble plus faible. Sous certains angles, une partie du jet peut donc nous être invisible, tandis que l'autre est bien visible.

---

<sup>1</sup>Un parsec est défini comme la distance pour laquelle une unité astronomique (=distance terre soleil) est vue sous un angle d'une seconde d'arc. 1 parsec = 3.2616 années lumière =  $3.1 \times 10^{16} m$



La galaxie M87 ne semble présenter qu'un seul jet.  
Il ne s'agit pas d'un quasar, mais le phénomène  
est régi par les mêmes mécanismes.

Enfin, l'analyse radio a permis d'établir une première approche de la répartition des quasars. En sondant dans toutes les directions, on peut en effet détecter les radio-sources correspondant à des quasars et déterminer leur disposition. Le nombre de quasars observés ne semble pas dépendre de la direction considérée : leur répartition est donc isotrope.

### 1.2.2 Limites de l'analyse radio.

Cependant, l'analyse ne permet pas de déterminer directement ni la taille d'un quasar, ni la distance qui nous en sépare. Une source d'une intensité donnée peut en effet être très puissante et très éloignée, ou faible mais proche. On ne peut donc pas déduire la distance. Or la taille d'un corps est calculée en fonction de cette distance : on la mesure en effet à partir du diamètre apparent, qui dépend de l'angle sous lequel l'objet est perçu, donc de sa distance. Les ordres de grandeurs donnés ci dessus sont donc en réalité l'aboutissement d'une théorie de modélisation, que nous allons retracer ici.

### 1.2.3 Evolution des observations.

Depuis les premières observations, un certain nombre de quasars dits radio-silencieux ont été découverts. On les appelle "radio-quiet", par opposition aux quasars "radio-loud" qui émettent des ondes radio. Il semble paradoxal de dire que des "radio sources quasi stellaires" sont radio-silencieuses. Ces objets présentent cependant suffisamment de points communs avec les quasars pour que la différence soit troublante. La principale différence réside dans l'absence de jet important. Il semble donc abusif d'employer le terme de quasar. Une autre appellation a été forgée, celle de QSO (Quasi Stellar Object), dans laquelle on différencie les objets radio émetteurs des radio silencieux. Par abus de langage, on regroupe cependant les quasars radio-quiet et les radio-loud sous le seul terme de quasar, même si celui-ci est inadapté.

## 1.3 Propriétés optiques.

Les quasars présentent des caractéristiques optiques singulières. Ce n'est pas leur aspect qui en fait des astres très particuliers. Sur une plaque photographique, un quasar apparaît comme une étoile, c'est à dire avec un diamètre angulaire inférieur à la demie seconde d'arc. C'est plutôt l'analyse de la lumière qui donne des résultats surprenants.

Pour étudier la lumière émise, on a recours en particulier à la photométrie et à la spectroscopie. La photométrie porte sur l'étude de la luminosité, la spectroscopie sur la décomposition et l'analyse de la lumière.

### 1.3.1 Photométrie.

En photométrie, on utilise la notion de magnitude apparente<sup>2</sup>. Cette grandeur magnitude représente la densité du flux perçu. On la définit en effet comme étant  $m_\lambda = -2.5 \ln(\frac{l}{l_0})$ , où  $l$  est la densité du flux et  $l_0$  une densité de référence. Plus le flux est dense, et plus  $m_\lambda$  est petit. A titre d'ordre de grandeur, l'oeil peut percevoir une magnitude de l'ordre de 5, tandis que les instruments optiques de pointes atteignent une magnitude de 25. Cependant, l'étude de la magnitude d'une source exploite rarement l'ensemble de la luminosité. En général, on se restreint en effet à des domaines précis, qui apportent des informations plus ciblées. On définit ainsi le système U,V,B, correspondant aux magnitudes des objets vus au travers d'un filtre ultraviolet (U), puis d'un filtre bleu (B), et enfin d'un filtre jaune (V, pour Visible).

Appliquée aux quasars, la photométrie a donné des résultats surprenants : elle montre en effet une très grande variabilité du flux. On a tout d'abord observé des variations de valeur des magnitudes, passant d'une valeur à une autre en l'espace de quelques semaines. Cette évolution se fait sur l'ensemble du quasar (jet non compris). Pour qu'elle puisse l'affecter entièrement en une durée donnée, il faut nécessairement que le quasar en lui même soit plus petit que la distance parcourue par la lumière pendant cette durée. On en a donc déduit que les quasars avaient une taille maximale de l'ordre de la semaine lumière. Si cette taille peut paraître imposante à l'échelle de notre système solaire, elle est en réalité très modeste comparée aux tailles des galaxies.

De plus, ces variations affectent de la même façon l'ensemble des gammes de couleurs. On peut en déduire que le rayonnement lumineux est le résultat d'une seule forme d'émission. En effet, si ce n'était pas le cas, il faudrait expliquer ce phénomène par la coïncidence de changements affectant l'ensemble des sources présentes. Et comme ce phénomène s'observe sur la plupart des quasars, il faudrait que toutes les sources de tous les quasars changent par hasard au même moment. La probabilité est donc très faible et on peut écarter cette hypothèse.

Ainsi, la variabilité semble un élément important de la compréhension des quasars. Son étude a en effet permis de révéler des caractéristiques fondamentales.

### 1.3.2 Spectroscopie.

Parmi toutes les techniques d'observation, une a joué un rôle primordial : il s'agit de la spectroscopie. Elle a en effet permis de mettre en évidence de nombreuses caractéristiques physiques des quasars. Nous allons donc la décrire succinctement.

La matière est composée de molécules, assemblages d'atomes, eux-mêmes constitués d'un noyau chargé positivement autour duquel orbitent des électrons, chargés négativement. La physique quantique explique que ces électrons ne peuvent se trouver que sur des orbites strictement définies. Chaque type d'atome a des orbites qui lui sont propres. Chacune de ces orbites correspond à un niveau d'énergie : plus l'orbite est éloignée du centre (elle est dite haute), plus l'énergie de l'électron est importante. Un électron change de niveau d'énergie sous un apport extérieur, à cause de l'agitation thermique par exemple. Suivant un principe de stabilité, un électron sur une orbite haute a tendance à rejoindre un niveau plus bas. D'après la conservation de l'énergie, l'atome doit alors émettre un photon, qui emporte avec lui une partie de la différence d'énergie. On a donc  $-\Delta E_{electron} = E_{photon}$ .

Une formule fondamentale donne

$$E = h\nu$$

où  $E$  est l'énergie du photon,  $h$  la constante de Planck et  $\nu$  la fréquence<sup>3</sup> du photon.

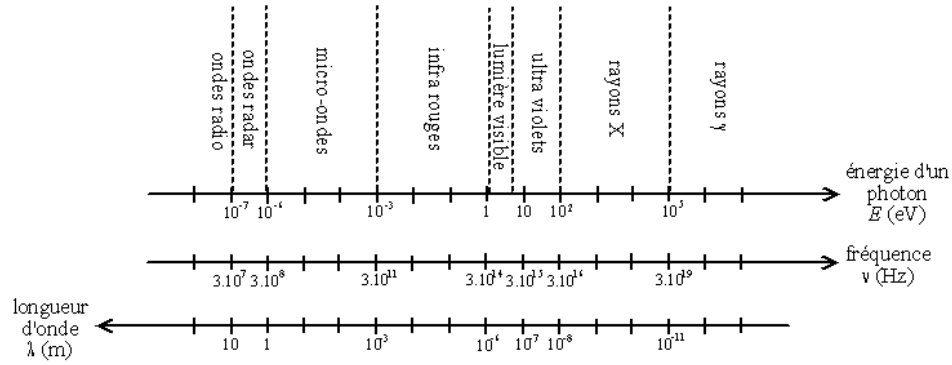
---

<sup>2</sup>La notion de magnitude absolue sera exploitée plus tard (voir 2.4 page 22). Elle nécessite en effet de connaître la distance Terre-Quasar.

<sup>3</sup>Pour rappel :  $\lambda \times \nu = c$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $\nu$  la fréquence et  $c$  la célérité de l'onde.



Cette formule montre que la fréquence d'un photon peut balayer toute une gamme de valeur, en déterminant son énergie. Les photons à basse énergie sont dans le domaine des ondes radio, les photons les plus énergétiques constituent les rayons  $\gamma$ .



Gamme du spectre électromagnétique :  
des rayons  $\gamma$  aux ondes radio.

La fréquence d'un photon est donc reliée à son énergie, qui dépend elle-même de l'énergie relâchée par l'électron, qui dépend des différences d'énergies entre deux orbites, qui dépendent elles mêmes de l'élément considéré. Un corps polyatomique est donc susceptible d'émettre une somme de radiations, chacune de ces radiations ayant une fréquence déterminée par l'atome d'où elle provient.

On peut donc décomposer la lumière émise par un corps, déterminer les radiations qui la composent, pour ainsi déterminer les atomes constituant l'objet et leur état. On appelle spectre d'absorption le graphe mettant en relation l'intensité d'un rayonnement en fonction de la longueur d'onde considérée. Ce spectre présente des raies aux longueurs d'ondes caractéristiques des différents éléments de la source. On peut donc établir des spectres étalons issus de corps purs pour trouver les raies de cet élément. Si une source présente les mêmes raies, alors elle est en partie constituée de l'élément.

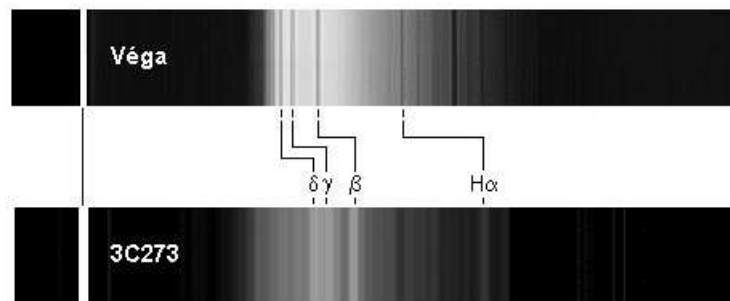
Elément	Raie	Longueur d'onde (Å)
Hydrogène	H ( $\text{Ly}\alpha$ )	1216
Oxygène	OII	3727
Carbone	CIV	1549

On se sert d'un certain nombre de ces raies étalons pour mesurer les caractéristiques physiques d'un corps. C'est en particulier le cas des raies de la série de Balmer et de Lyman, raies caractéristiques de l'hydrogène (et des groupes hydrogénoides en général).

C'est l'étude des spectres qu'on appelle spectroscopie.

### 1.3.3 Phénomène de décalage spectral : le redshift.

La spectroscopie a bien évidemment été appliquée aux spectres des quasars. Elle a mis en évidence un phénomène relativement courant, appelé *redshift*. Les raies observées dans le spectre d'un quasar sont décalées (shift) vers le rouge (red) par rapport à celles de référence obtenues en laboratoire.



Les spectres étant mis côte à côte, on voit bien le décalage de certaines raies présentes à la fois dans un spectre classique (Véga) et dans un spectre ayant subi un redshift (3C273,  $z = 0.158$ ).

Le redshift, noté  $z$ , correspond à la valeur de ce décalage. On le définit comme le rapport entre la variation de longueur d'onde observée sur la longueur d'onde de référence :

$$\lambda_{obs} = \lambda_{ref}(1 + z)$$

Soit

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{ref}}{\lambda_{ref}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{ref}}$$

Ce décalage est souvent observé en astrophysique. Ce n'est donc pas le redshift en lui-même qui est surprenant chez les quasars, mais sa valeur. Les redshifts d'étoiles sont souvent autour de 0,05. Les deux premiers Quasars observés, 3C48 et 3C273 présentent un redshift de 0.367 et de 0.158. Quelques dizaines de milliers de Quasars sont actuellement répertoriés. Le redshift le plus important jamais observé est de 6.4. Les spectres des quasars présentent donc toujours un décalage vers le rouge très important. Le redshift de 0.3 du quasar 3C48 a en effet suffi à faire passer son spectre pour inconnu!

### 1.3.4 Spectre des quasars.

L'analyse spectrale permet de déterminer la composition des quasars et les conditions y régnant. Il apparaît qu'un quasar est principalement composé, comme le reste des nébuleuses et des étoiles de l'univers, d'hydrogène. On remarque cependant la présence des raies "interdites". Ces raies sont émises par des éléments dans des états si instables qu'ils ne peuvent être atteints ni sur Terre, ni dans la plupart des étoiles. La matière ne peut se trouver dans cet état que dans des conditions de températures et de pressions si fortes qu'elles modifient les domaines de stabilité. Le corps des quasars doit donc être le théâtre de phénomènes particulièrement violents.

De plus, on a montré que toutes les raies ne peuvent pas être émises dans les mêmes conditions de température et de pression. Elles doivent donc être émises d'au moins deux zones différentes du quasar. Compte tenu de l'aspect ponctuel de l'image d'un quasar, on en a déduit que ces zones étaient concentriques, et présentaient des densités et des températures différentes.

Enfin, il faut se rappeler que les mesures sont effectuées sur Terre, au travers de l'atmosphère. Il se trouve que l'atmosphère ne laisse que peu (ou pas) passer les rayonnements ultra-violets et infrarouges. Ainsi, seule une partie de spectre est visible. Le spectre des quasars présente cependant un fort décalage vers le rouge. Des raies habituellement dans l'UV peuvent donc passer dans le domaine du visible, et traverser l'atmosphère. C'est en particulier le cas d'un des raies de l'hydrogène dite raie *Lyman $\alpha$*  (ou *Ly $\alpha$* ), sur laquelle nous aurons l'occasion de revenir.

## 1.4 Les noyaux actifs de galaxie (NAG).

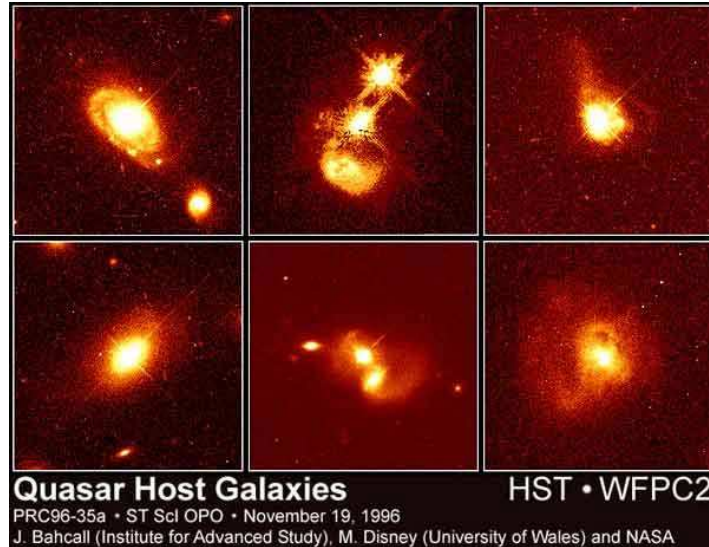
En 1943, Carl Seyfert avait déjà observé des galaxies jusqu'alors inédites. Ces galaxies portent aujourd'hui son nom : on parle des *galaxies de Seyfert*. Elles présentent un certain nombre de points communs avec les quasars. On observe en effet dans les deux cas des propriétés optiques et spectrales semblables. Ces similitudes ont amené à créer un nouveau groupe de corps célestes : les Noyaux Actifs de Galaxie.

Optiquement, les galaxies de Seyfert présentent un noyau qui brille d'un tel éclat qu'il éclipse le reste de la galaxie. Cette luminosité intense les a longtemps fait passer pour de simples étoiles. Les quasars émettent eux aussi un rayonnement trompeur. Cette caractéristique n'est pourtant pas très répandue dans l'univers. Elle tend donc à tisser des liens entre les objets qui la présente.

De plus, les galaxies de Seyfert émettent un spectre atypique. Il présente en effet des raies qui n'ont presque jamais été observées sur Terre. Il s'agit de raies interdites, ce qui laisse penser que les

conditions de température et de pression sont aussi intenses dans un quasar que dans une galaxie de Seyfert. Les raies sont de plus très larges dans le spectre des certaines de ces galaxies et étroites dans d'autres. Cette différence est importante. Elle a entraîné un changement de classification : les galaxies de Seyfert 1 présentent des raies larges, celles de Seyfert 2 des raies étroites. La largeur des raies peut être expliquée, d'après l'effet Doppler (voir 2.1 page suivante), par une température élevée. Enfin, tout comme les quasars, la plupart des galaxies de Seyfert émettent un rayonnement synchrotron.

Pour tenir compte de ces importants points communs, on a donc créé le groupe des noyaux actifs de galaxies. Par définition, un noyau (NAG) est le centre d'une galaxie active et l'éclat de son rayonnement dépasse de loin celui de la galaxie entière. Par l'observation, on peut confondre les galaxies hôtes avec des étoiles tant la luminosité du noyau presque ponctuel éclipe celle du reste de la galaxie. Cette intensité est expliquée par la mise en jeux d'énergies colossales.



La luminosité des NAG en général (et des quasars en particulier) rend la galaxie hôte difficile à observer : l'éclat du noyau central éclipe l'ensemble de l'hôte.

Il existe d'autres types de noyaux actifs de galaxie (BL Lacertides, Blazar...). Dans le cadre de ce projet, on se limitera cependant aux NAG présentant le plus de points communs avec les quasars : les galaxies de Seyfert.

Les quasars semblent partager un grand nombre de points communs avec les NAG. On est donc amené à se demander si tous font partie de cette catégorie. Pour répondre à cette question, il faut tout d'abord vérifier qu'aucune observation ne montre de différence majeure entre quasar et NAG. Il faut pour cela exploiter les résultats des observations, pour parvenir à modéliser les quasars. On sera alors en mesure de travailler à l'élaboration d'un modèle unifié, présentant à la fois quasars et galaxies de Seyfert.

## Chapitre 2

# Redshift et effet Doppler.

Les observations analysées précédemment mettent en évidence l'importance du décalage du signal perçu. Ce phénomène de décalage, le *redshift*, semble faire partie de ce qui définit le plus précisément un quasar. Il est donc nécessaire de travailler à son interprétation pour parvenir à un modèle général. Il participe en effet largement au processus d'élaboration d'un modèle pour les quasars, qui sert en réalité à décrire l'ensemble des noyaux actifs de galaxie.

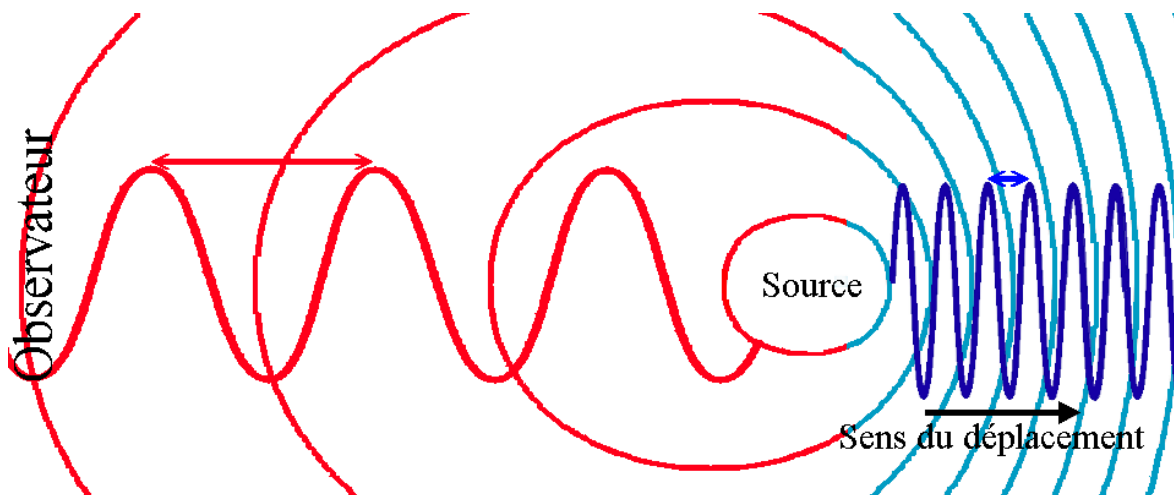
### 2.1 L'effet Doppler : présentation expérimentale.

L'effet Doppler-Fizau a été découvert en 1845, et retravaillé en 1848, par les physiciens éponymes. Il constitue un phénomène physique classique et entraîne une modification de la fréquence d'une onde. Or, les quasars présentent tous une caractéristique commune : un fort décalage vers le rouge, qui correspond à une diminution de la fréquence l'onde électromagnétique émise. On peut donc se demander si l'effet Doppler peut expliquer un tel décalage.

#### 2.1.1 L'effet Doppler : principe.

L'effet Doppler est un phénomène relativement familier. Son illustration la plus connue est celle de l'ambulance. Lorsque, dans la rue, on entend une ambulance passer, le son nous semble de plus en plus aigu lorsqu'elle approche, puis de plus en plus grave lorsqu'elle s'éloigne.

Cet effet s'explique par une variation de fréquence : un son plus aigu correspond à une fréquence plus haute, un son plus grave à une fréquence plus basse. L'ambulance émet toujours le même son à la même fréquence, mais sa vitesse propre va porter l'onde vers nous, ou au contraire l'en éloigner.

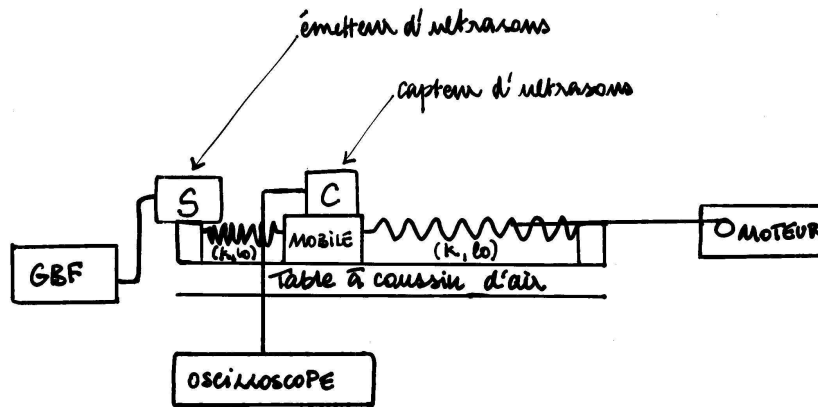


Le phénomène dépend assez clairement de la vitesse relative de la source. Le son émis par une ambulance immobile ne subit pas l'effet Doppler. De plus, la vitesse radiale semble avoir un rôle particulier. Si la source tourne autour du capteur selon une trajectoire circulaire, on n'observe pas d'effet Doppler. On peut donc tenter de comprendre l'effet Doppler en se servant de la vitesse radiale comme paramètre.

Pour étudier l'effet Doppler, nous l'avons tout d'abord modélisé par ordinateur, en créant un programme de simulation en BASIC, dont est issue la figure ci dessus. Ensuite, nous avons tenté de le repérer expérimentalement.

### 2.1.2 Modélisation expérimentale.

1. On cherche à déterminer le rapport entre la fréquence perçue et la vitesse de déplacement d'une source d'émission. Pour cela, on joue sur la vitesse radiale, qui semble le paramètre principal du phénomène. Comme tous les mouvements ont lieu suivant la même direction  $\vec{U}_x$ , on considère directement les valeurs projetées sur cet axe.
2. Le décalage décrit par l'effet Doppler dépend également de la vitesse de la perturbation. Or, la lumière se déplace à  $c = 3.10^8 m.s^{-1}$ . Il serait impossible de concevoir un dispositif expérimental se déplaçant à des vitesses non négligeables devant  $c$ . On est donc amené à faire une analogie avec une perturbation de célérité moindre. On peut, comme dans l'expérience suivante, envisager le son, perturbation mécanique se déplaçant dans l'air à  $c = 340 m.s^{-1}$ .
3. Montage expérimental :



**Description :** Un mobile auto-porteur est attaché par deux ressorts de longueur à vide et de constantes de raideurs identiques. Un des ressorts est relié à un moteur, qui délivre une force périodique de période réglable. On attache sur le mobile un capteur ultrason, faisant face à un émetteur fixe. Le capteur est relié à un oscilloscope, l'émetteur à un GBF.

**Matériel :**

Ressort : longueur à vide  $L_0 = 15cm$ , constante de raideur  $k = 27.06 N.m^{-1}$

Moteur : Délivre une force  $F = F_0 \cos(\omega t)$ ,  $F_0$  étant inconnue,  $\omega$  étant réglable.

Mobile auto porteur + récepteur + fils de masse totale = 855g

Emetteur + GBF

**Réglage :**

L'analyse théorique prédit une résonance en vitesse pour  $\omega = \omega_r = \sqrt{\frac{2k}{m}}$  correspondant à une fréquence  $f = 1.35 Hz$ .

Pour rester dans le domaine ultrason, de façon à ne pas perturber les mesures par le bruit ambiant, on règle la fréquence du GBF sur 40 000 Hz.

4. Mesures :

La description totale de l'expérience est présente en annexe.

**Vitesse** : Le mobile est assimilable à un oscillateur forcé. La position autour de la position d'équilibre est donc de la forme  $x = \frac{AB}{2} \sin(\omega t)$ , avec  $AB$  = envergure du mouvement . On obtient une expression de la vitesse atteinte à la fréquence de résonance :

$$v = \frac{AB}{2} \omega_r \cos(\omega_r t)$$

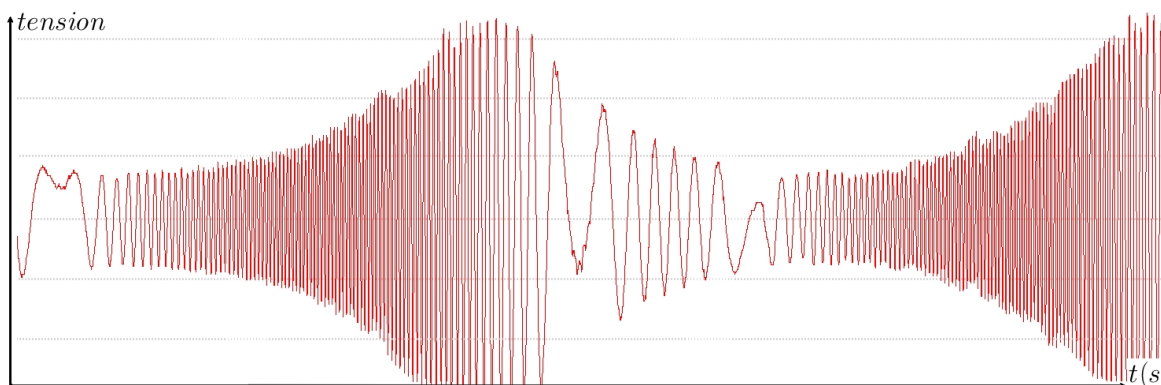
**Fréquence** : On acquiert simultanément le signal perçu par le récepteur à l'aide du matériel informatique adapté (Synchronie). Le signal présente une fréquence de l'ordre de la dizaine de kilohertz. Cette fréquence est très grande devant celle du mouvement du mobile (de l'ordre du Hertz). On peut donc bien mesurer des fréquences perçues au cours du mouvement. Une analyse de Fourier effectuée sur le signal décomposé en intervalles brefs permet de déterminer la fréquence perçue.

5. Exploitation :

On a défini  $z = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_{ref}}$ . Par l'expérience, on a obtenu des valeurs de la vitesse et de la fréquence en fonction du temps. On peut donc établir le graphe du décalage en fréquence par rapport à la fréquence émise en fonction de la vitesse (voir paragraphe suivant).

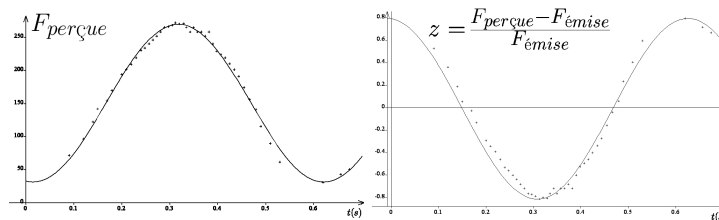
### 2.1.3 Exploitation de l'expérience.

Le capteur étant relié à un oscilloscope, on peut mesurer la tension qu'il reçoit au cours de temps. Cette tension est délivrée par la source à une fréquence déterminée. Le graphe obtenu met en évidence un décalage de la fréquence au cours du temps. La variation d'amplitude correspond quant à elle à l'éloignement du capteur à la source. Plus il en est éloigné, plus le signal qu'il perçoit est faible.



Tension reçue en fonction du temps (courbe expérimentale).

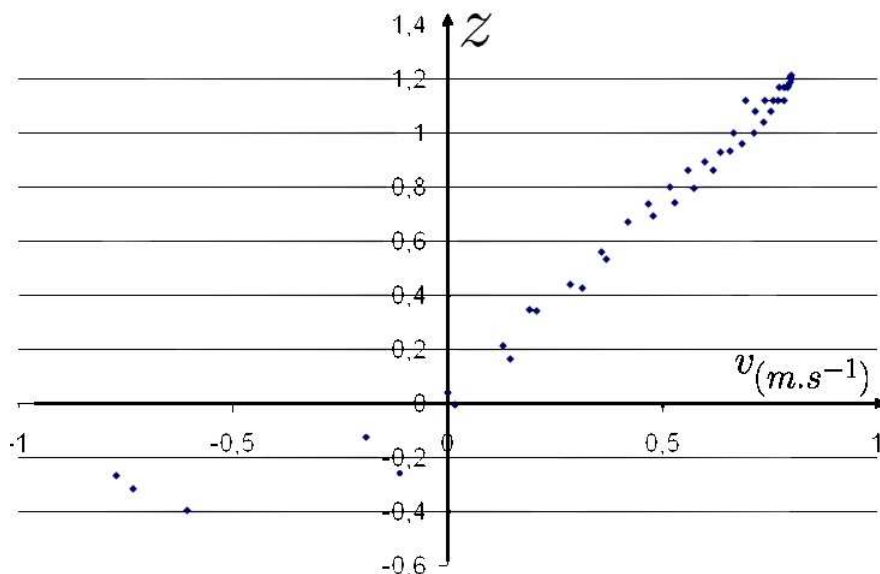
A tout instant, on peut effectuer une analyse de Fourier pour déterminer la fréquence du signal perçu. On obtient ainsi un graphe donnant la fréquence perçue en fonction de temps. En appliquant  $z = \frac{\Delta f}{f}$ , on peut alors tracer  $z$  au cours du temps. Ces deux graphes sont sinusoïdaux, ce qui est cohérent avec le mouvement décrit par le capteur. Lui même possédait en effet une vitesse radiale sinusoïdale.



A gauche, la fréquence perçue en fonction du temps.

A droite, le décalage en fonction du temps.

L'analyse mécanique de l'expérience permet de déterminer l'expression de la vitesse au cours du temps. On peut donc représenter le décalage  $z$  en fonction de la fréquence. On obtient alors une droite, d'équation  $z = \frac{v}{c}$ , où  $v$  est la vitesse du capteur et  $c$  la célérité de la perturbation (ici le son).



Décalage en fonction de  $v$ .  
Les axes ne sont pas adaptés.

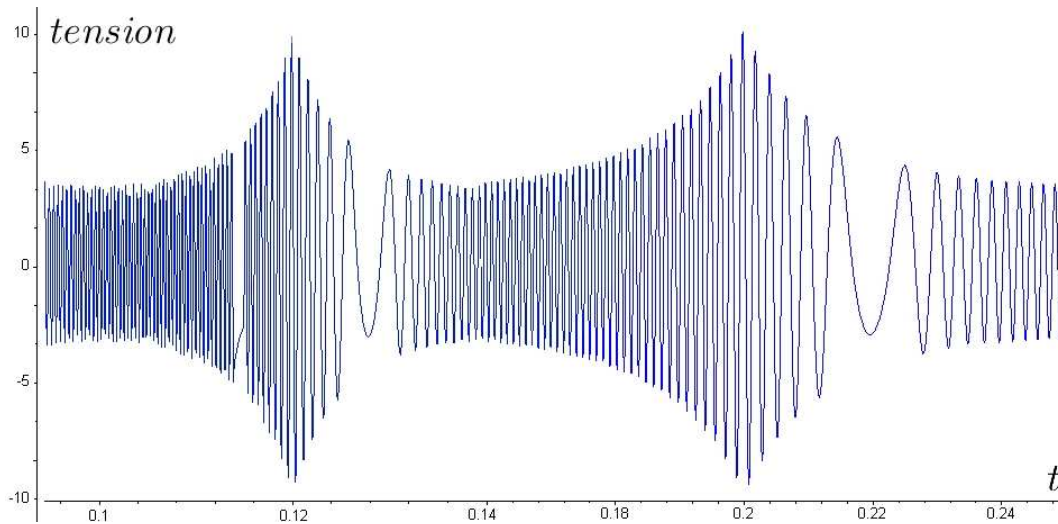
## 2.1.4 Les limites de l'expérience : l'effet Doppler classique.

Parallèlement, on peut déterminer les valeurs théoriques du décalage lié à l'effet Doppler.

La description théorique complète de l'effet Doppler est faite en annexe. 4.1 page 31

On trouve ainsi une expression théorique de  $z$  :  $z = \frac{v}{c-v}$ , où  $v$  est la vitesse radiale de la source et  $c$  est la célérité de l'onde. Dans le cas de notre expérience, on considère une onde sonore, se déplaçant donc à une célérité  $c = 340 \text{ m.s}^{-1}$ .

Appliquée à l'expérience, cette expression donne des valeurs qui concordent bien avec celles obtenues précédemment. On observe en effet une bonne similitude entre les courbes expérimentale et théorique.



Tension en fonction du temps (courbe théorique).

L'expression du décalage n'est pas tout à fait la même que celle déterminée expérimentalement. On peut cependant remarquer que la deuxième est le développement limité à l'ordre 1 de la première.

A petite vitesse ( $v \ll c$ ), les résultats sont donc similaires. Dans l'expérience décrite précédemment, le capteur se déplaçait à des vitesses très petites devant la vitesse du son. Cela explique la concordance observée entre l'analyse théorique et l'analyse empirique.

### 2.1.5 Les limites du modèle classique : l'effet Doppler relativiste

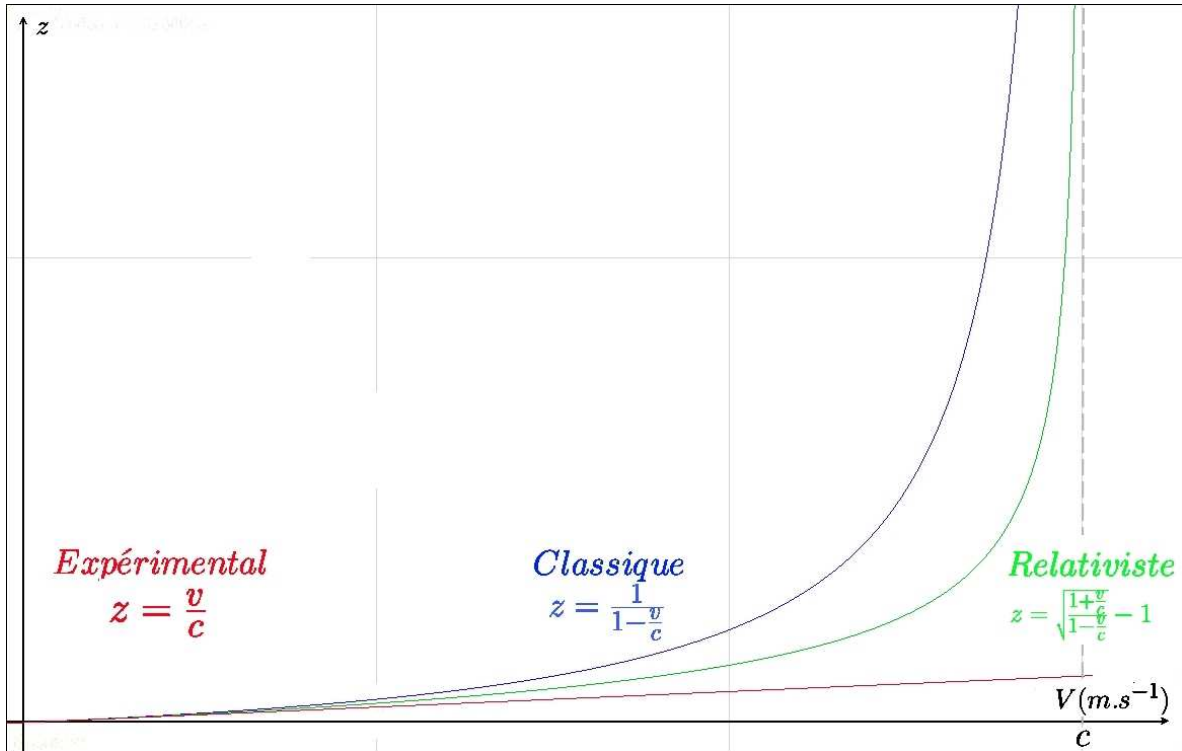
Dans le cadre de l'étude des quasars, l'onde considérée est électromagnétique, et non une onde mécanique telle que le son.

Il existe une limite à l'analogie que nous avons faite initialement entre son et lumière. Lorsqu'un corps se déplace à une vitesse proche de celle de la lumière, la physique quitte en effet le cadre classique pour rejoindre celui de la relativité. Les dilatations des durées dues à la vitesse entraînent l'apparition du facteur de Lorentz  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ . Ce facteur doit être appliqué au calcul théorique du redshift, en suivant la même méthode que celle présentée en annexe. On détermine alors une nouvelle expression de  $z$  :

$$z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1$$

A nouveau, on peut remarquer que par développement limité à l'ordre 1 (si  $v \ll c$ ), on retrouve l'expression déterminée expérimentalement, à savoir  $z \simeq \frac{v}{c}$ .

L'effet Doppler déterminé expérimentalement est donc proche de l'effet Doppler classique à des vitesses suffisamment faibles et le classique n'est lui même qu'une approximation de l'effet Doppler relativiste.



Présentation des 3 modèles de l'effet Doppler.  
A faible vitesse, les 3 concordent.

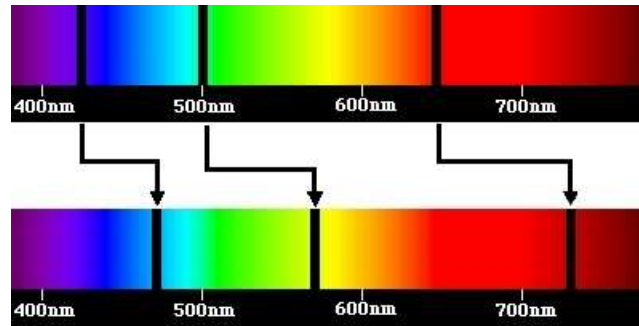
Les quasars présentent tous un redshift important. On peut donc raisonnablement penser que leur vitesse n'est pas complètement négligeable devant celle de la lumière. On exploitera donc la valeur relativiste de  $z$ , pour se prémunir des erreurs de la physique classique. A faible vitesse, cependant, la différence entre effet Doppler relativiste et effet Doppler classique est négligeable.



## 2.2 Influence de l'effet Doppler sur un spectre.

### 2.2.1 Décalage de fréquence.

Sur un signal sinusoïdale, l'effet Doppler entraîne un décalage de fréquence. D'après la décomposition de Fourier, n'importe quel signal périodique peut se décomposer comme une somme de fonctions sinusoïdales. Lorsque la source se déplace, chacune des composantes du signal émis va donc subir un décalage. Dans un spectre composés de plusieurs raies, chacune va donc être déplacée. Par définition,  $\lambda'$  dépend à la fois de la valeur de  $\lambda$  et de celle de  $z$ . Par conséquent, pour un même  $z$ , plus  $\lambda$  est grand, plus la valeur  $\lambda' - \lambda$  est importante. Sur le spectre, on observe donc des raies de plus en plus éloignées. Il est important de noter que c'est le rapport  $\frac{\lambda' - \lambda}{\lambda}$  qui reste constant.



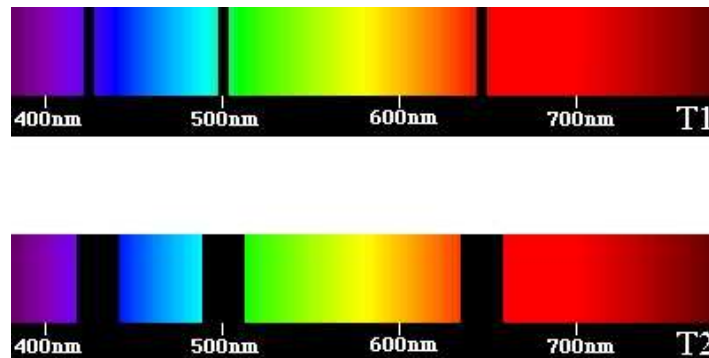
Décalage d'un spectre pour  $z = 0.13$ .

### 2.2.2 Elargissement des raies.

L'effet Doppler a également une influence sur la largeur des raies du spectre. Les atomes ne sont pas immobiles : ils s'agitent dans tous les sens, dans un mouvement brownien. Leur vitesse est directement reliée à la température : plus le milieu est chaud, plus les atomes se déplacent rapidement. Si cette vitesse est loin d'être relativiste, elle n'est pas pour autant négligeable.

Les atomes se déplacent suivant des directions parfaitement aléatoires. Selon des règles statistiques, la même quantité se dirige donc dans chaque direction. Pour un observateur sondant la source, une partie des atomes s'approche donc, une autre partie s'éloigne. Or, nous avons vu que les raies d'un spectre sont déterminées par la longueur d'onde de photons émis par la désexcitation d'un atome, et qu'une longueur d'onde émise est décalée vers le rouge ou vers le bleu selon le mouvement de sa source. Appliqués aux mouvements des atomes, ces informations expliquent un nouvel aspect de l'effet Doppler. En effet, les atomes qui viennent vers l'observateur semblent rayonner un peu plus vers le bleu qu'à l'ordinaire, tandis que ceux qui s'éloignent semblent émettre des rayonnements légèrement plus décalés vers le rouge. Plus la source est chaude, plus les décalages peuvent être importants.

Lorsqu'on observe le spectre de l'ensemble de la source, on voit donc se superposer des bandes à gauche et à droites des raies initiales. Cet effet donne une impression d'élargissement des raies : là où il n'y avait qu'une raie mince, il y a maintenant une somme de bandes formant une raie plus épaisse.



Une même source à des températures  $T_1$  et  $T_2 > T_1$  présente les mêmes raies, mais avec des largeurs différentes.

## 2.3 Interprétation du redshift .

### 2.3.1 Redshift : 3 Hypothèses.

Le décalage par effet Doppler n'est pas le seul phénomène physique qui puisse expliquer les observations. Dans l'élaboration d'une théorie sur le fonctionnement des quasars, trois hypothèses susceptibles d'expliquer un décalage en fréquence ont été évoquées.

1. Décalage gravitationnel :

Le premier d'entre eux est le décalage gravitationnel. Ce décalage repose sur la conservation de l'énergie et l'existence d'une énergie potentielle. Un corps à une distance  $R$  d'un astre de masse  $M$  est soumis à la force de gravité exercée par cette masse. Il en tire une certaine *énergie potentielle* : s'il ne subit aucune autre force, il va spontanément tomber vers l'astre. Il tombera d'autant plus vite que l'astre est massif et proche. Pour s'extraire de l'attraction gravitationnelle, le corps doit donc s'affranchir de cette énergie. Un photon subit les mêmes effets. Il est émis à la surface du quasar et part à l'infini, où il ne ressent plus les effets de l'attraction. Or, son énergie doit se conserver. Initialement, il dispose de la somme de son énergie propre ( $E = h\nu$ ) et de son énergie potentielle. Lorsqu'il s'éloigne, il doit donc céder une partie de son énergie propre pour compenser l'énergie potentielle rendue. Cette perte dépend exclusivement de la masse et du rayon de l'astre<sup>1</sup>. On obtient l'expression suivante de  $z$  :

$$z = \frac{GM}{Rc^2}$$

2. Décalage par effet Doppler dû au déplacement du quasar :

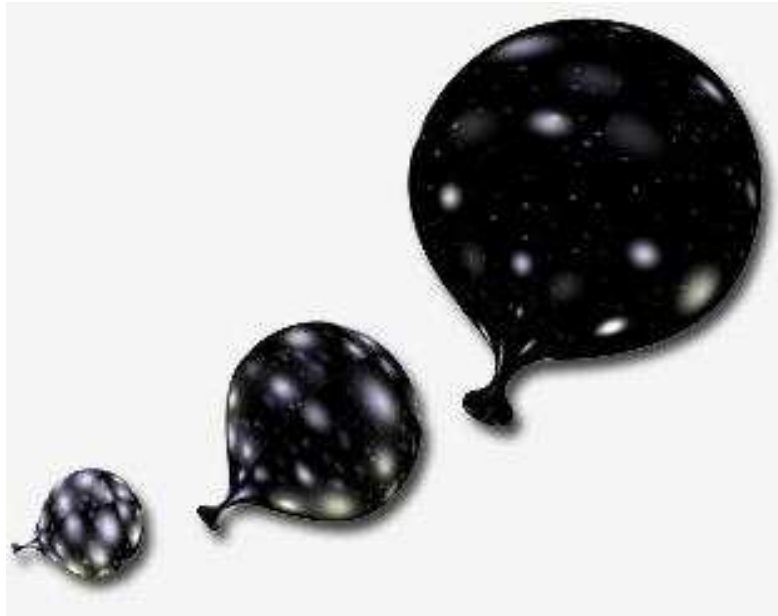
L'effet Doppler tel que nous l'avons décrit peut lui aussi expliquer le décalage : c'est bien pour cela que nous l'avons étudié. S'il était les causes des variations, alors elles dépendraient de la vitesse de déplacement du quasar, comme nous l'avons vu précédemment.

3. Décalage dû à l'expansion de l'univers :

L'effet Doppler considéré ci dessus est donc une conséquence du déplacement propre du corps. Les modèles cosmologiques modernes incitent cependant à réfléchir à une autre approche du mouvement. On considère en effet aujourd'hui que l'univers est en expansion. Cette expansion n'a pas lieu autour d'un point fixe : c'est l'ensemble de l'espace qui s'étend. On peut en première approche voir cette inflation de l'espace comme le gonflement d'un ballon. Sur la membrane, tous les points s'éloignent les uns des autres, sans pour autant qu'un seul soit fixe. De la même façon, les corps de l'univers s'éloignent en permanence, à cause du mouvement d'expansion de l'univers.

---

<sup>1</sup>On considère une masse fictive  $m = \frac{h\nu}{c^2}$ , passant d'une position initiale à la surface d'un corps de rayon  $R$  de masse  $M$  à une distance finale située à l'infini. D'après la conservation de l'énergie totale du photon,  $E_{initiale} = E_{finale} \Leftrightarrow h\nu_i + \frac{GMm}{R} = h\nu_f \Leftrightarrow h(\nu_i - \nu_f) = \frac{GM}{R} \times \frac{h\nu_i}{c^2}$ , d'où le résultat.



Métaphore classique de l'expansion de l'univers :  
toutes les galaxies s'éloignent les unes des autres  
sans qu'aucune ne soit centrale.

Sur le ballon, plus deux points sont éloignés, plus ils s'éloignent vite. De la même façon, la vitesse d'éloignement de deux corps dans l'univers dépend de la distance qui les sépare. Cette vitesse est purement radiale. Elle ne peut être prise en compte que pour des corps très éloignés. En effet, sur des distances trop courtes, l'expansion de l'univers est négligeable.

Ce déplacement induit lui aussi un décalage que l'on peut modéliser par effet Doppler. Il engendre donc un redshift. Les distances nous séparant des objets lointains sont colossales. Les vitesses d'éloignement sont donc elles aussi très importantes. C'est pourquoi on utilise l'expression relativiste, et non classique, pour déterminer le redshift. On a donc :

$$z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1$$

Il est important de prendre en compte les limitations de ce modèle. En effet, on a modélisé l'expansion de l'univers par une simple vitesse  $v$ . Or l'expansion de l'univers implique, lorsqu'on s'intéresse à des corps lointains, une modification non négligeable de l'espace et du temps. Il est donc difficile de parler de vitesse (c'est à dire de distance par unité de temps) lorsque les dimensions ne sont pas uniformes. On admet toutefois cette simplification, sans laquelle l'approche des limites de l'univers est bien plus complexe.

### 2.3.2 Formulation des hypothèses.

Il existe donc plusieurs phénomènes pouvant engendrer le redshift observé. De plus les observations ont apporté un certain nombre d'informations sur les quasars en eux même. On sait qu'il s'agit de corps de taille modeste, émettant un fort rayonnement radio. On peut émettre un certain nombre d'hypothèses permettant d'envisager l'ensemble de ces éléments.

Hypothèse 1 : Les quasars sont proches. Ils sont également massifs et petits, donc compacts. Le redshift est dû au décalage gravitationnel.

Hypothèse 2 : Les quasars sont lointains, le redshift est dû à l'effet Doppler. Il s'agit de galaxies de Seyfert, et leur éclat particulier est en réalité dû au phénomène de lentille gravitationnelle<sup>2</sup> qu'on observe lorsqu'un corps massif s'interpose entre source et capteur.

Hypothèse 3 : Les quasars sont proches. Ils se déplacent très vite. Le redshift est donc dû à l'effet Doppler engendré par leur vitesse propre.

Hypothèse 4 : Les quasars sont lointains. Ce sont des corps extrêmement lumineux, ce qui explique qu'on les perçoive malgré la distance. Le redshift est dû à l'expansion de l'univers.

### 2.3.3 Exploitation des hypothèses.

Deux de ces hypothèses sont faciles à écarter.

On a montré que l'émission d'un quasar doit provenir de deux sources, de densité et de températures différentes. On sait de plus que ces deux zones sont concentriques (voir 1.3.4 page 9). Le rayon de l'une est donc plus grand que le rayon de l'autre. Pourtant, la valeur de décalage des longueurs d'onde est la même pour tout le spectre. Ce ne serait pas le cas si le décalage était de nature gravitationnel. On observerait en effet des décalages différents, en raison de la différence des rayons. On peut donc éliminer l'hypothèse 1.

L'hypothèse 2 nécessite une coïncidence : il faut qu'une galaxie s'interpose entre la source et la Terre pour amplifier le signal. Si cette possibilité n'est pas irréalisable, elle est improbable. On recense cependant, dans le VLQC<sup>3</sup> plus de 100 000 quasars. Il semble impossible que 100 000 lentilles gravitationnelles se soient interposées entre 100 000 galaxies de Seyfert 1 et nous. On peut donc considérer que l'hypothèse 2 est erronée.

Les deux dernières hypothèses sont plus difficiles à départager. Si les quasars sont extrêmement éloignés, alors ils doivent libérer une énergie colossale pour être vus depuis la Terre. Si l'on accepte cette hypothèse, alors il faut trouver une source d'énergie suffisamment puissante pour rayonner jusqu'à nous.

L'hypothèse 3 soulève cependant un problème plus grave. Elle pose en effet la question de l'origine des quasars. S'ils sont proches de nous, alors d'où viennent ils ? Leur très grande vitesse laisse penser qu'ils auraient pu être éjectés lors d'explosions au centre de galaxies. On doit alors choisir entre deux possibilités :

- Les quasars ont été éjectés d'une galaxie qui n'est pas la nôtre.

Lors d'une telle éjection, ils ont du partir dans toutes les directions. Un certain nombre d'entre eux devraient donc venir vers nous. Or un objet se rapprochant présente, d'après l'effet Doppler, un blueshift. Tous les corps identifiés comme quasars montrent au contraire un redshift.

Pour conserver cette hypothèse, il faut donc supposer que tous les quasars éjectés vers nous ont déjà dépassé le système solaire, et continuent de s'éloigner. Cela sous entend qu'il existe une vitesse minimale,  $V_0$ , telle que *temps ecoule depuis l'ejection*  $\times V_0 = \text{distance galaxie} - \text{Terre}$ . La distance considérée n'est pas négligeable, la valeur de  $V_0$  est donc relativement élevée. Il est très difficile de trouver une raison pour laquelle il existerait une limite inférieure à la vitesse. On peut donc écarter cette possibilité.

- Les quasars ont été éjectés de notre galaxie.

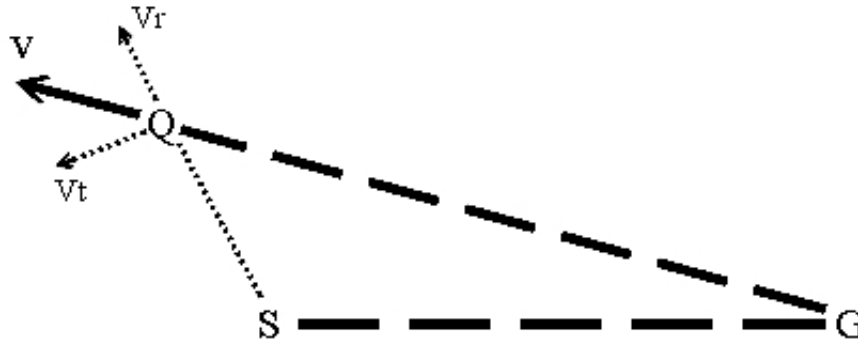
Dans ce cas, la limite inférieure  $V_0$  est faible, car le soleil est relativement proche du centre de la galaxie (environ 50 000 al). On peut de plus penser que ceux qui viennent vers nous sont difficilement observables, car ils sont alignés avec le centre de la galaxie. Les deux principaux problèmes semblent donc écartés.

Il existe cependant une limite à cette hypothèse. Si les quasars viennent du centre de notre galaxie et sont émis dans toutes les directions, alors un certain nombre ne sont pas émis vers le Soleil, et certain parmi eux doivent être proches de nous. Par conséquent, on devrait observer un mouvement relatif des quasars par rapport aux étoiles lointaines, du fait de la parallaxe.

---

<sup>2</sup>Cet effet est une conséquence de la relativité générale. La présence d'un corps massif courbe le continuum espace temps, sur lequel la lumière se déplace en suivant des géodésiques (ie les lignes de trajet le plus court). Le trajet de la lumière est donc dévié par la présence d'un corps massif, et deux rayons initialement parallèles peuvent se mettre à converger : on observe alors une amplification du signal : une lentille gravitationnelle

<sup>3</sup>Very Large Quasar Catalogue, à l'élaboration duquel nous allons travailler.



Eloignement d'un quasar par rapport au soleil. G représente le centre de la galaxie, S le soleil, Q le quasar et V sa vitesse, décomposée en vitesse radiale ( $V_r$ ) et tangentielle ( $V_t$ ).

Dans le schéma, la composante suivant  $V_t$  donne l'impression d'un déplacement sur la voûte céleste depuis le système solaire. Or aucun des quasars observés ne semble se déplacer par rapport aux étoiles lointaines. Cette hypothèse doit donc elle aussi être écartée.

Une seule hypothèse reste donc envisageable. Les quasars sont des corps très éloignés, libérant une énorme quantité d'énergie. Considérant cette approche, on peut essayer de proposer un modèle physique des quasars.

## 2.4 Application aux quasars : modélisation physique.

Le modèle doit permettre d'expliquer des propriétés caractéristiques du quasar. Il doit donc proposer

1. Une source d'énergie suffisante pour expliquer les formidables quantités d'énergie libérées.
2. Une justification à l'existence un rayonnement thermique et synchrotron.
3. Une explication aux importants redshifts en exploitant l'expansion de l'univers.
4. Une cause aux variations observées.

L'ensemble doit présenter une structure de petite taille correspondant aux observations.

**Energie :** Les réactions nucléaires classiques intervenant dans les étoiles fournissent bien trop peu d'énergie pour permettre d'expliquer les émissions observées. De plus, il faut que la source tienne dans un volume très restreint. Ces deux conditions sont très fortes et elles imposent d'importantes restrictions. Les théories actuelles considèrent qu'au centre du quasar se trouve un *trou noir super massif*, d'une masse de l'ordre du million, voire du milliard, de masse solaire. Sous son influence gravitationnelle, la matière tournerait en formant un disque, avant de passer l'horizon. Elle forme ainsi un *disque d'accrétion*, tournoyant à des vitesses très élevées. A cause de cette vitesse, elle est échauffée par frottements<sup>4</sup>, jusqu'à des températures de plusieurs dizaines de milliers de degrés (jusqu'à de  $10^5$  K). Sous ces températures, la matière est entièrement sous forme de plasma. La lumière observée serait alors due non seulement au rayonnement thermique du plasma mais aussi à l'énergie potentielle de gravitation du trou noir.

**Radio :** Parmi les particules constituant le disque d'accrétion se trouvent des particules chargées. Leur rotation engendre un champ magnétique perpendiculaire au plan de rotation et les lignes de ce champ se rejoignent aux pôles du trou noir. Dans le disque, la matière est soumise à des forces de pression colossales. Des particules sont donc susceptibles de sortir du disque. Elles sont alors violemment expulsées et suivent les lignes du champ magnétique. Elles quittent le noyau à des vitesses relativistes (parfois à plus de 90% de la vitesse de la lumière), en passant par les pôles. C'est ce phénomène d'expulsion dû au champ magnétique

<sup>4</sup> En réalité, il n'agit pas de frottements atomiques, mais de viscosité de perturbation : le plasma forme des tourbillons, et dissipe ainsi une partie de son énergie.

qui crée les jets.

Dans les jets, les particules chargées se déplacent rapidement et sont soumises au champ magnétique. Sous l'effet de la force de Lorentz, elles décrivent donc une spirale, en émettant le rayonnement synchrotron. Petit à petit, elles ralentissent en frottant contre le milieu intersidéral et forment les énormes lobes. On explique donc ainsi l'existence et l'importance du rayonnement radio.

**Redshift :** Cette approche permet également d'expliquer les importants redshifts observés. Nous avons vu que ce phénomène dépend de la distance qui nous sépare des quasars. Un quasar, s'il suit ce modèle, consomme énormément d'énergie. Il épuise son stock de matière relativement rapidement. Il a par conséquent une durée de vie limitée. Or, les quasars observés actuellement sont très éloignés de nous. La lumière qu'ils nous envoient met beaucoup de temps pour nous parvenir. Nous les observons tels qu'ils étaient il y a très longtemps, peut être même aux premiers temps de l'univers. Si les quasars étaient présents à cette période, ils ont déjà dû épuiser leurs ressources. Par conséquent, il n'y a plus de quasars proches. De plus, le modèle d'expansion de l'univers donne à chaque corps une vitesse d'éloignement radiale d'autant plus importante que la distance est grande. Les quasars étant tous très loin, ils ont tous une vitesse apparente très élevée, ce qui explique l'importance des redshifts observés.

**Variabilité :** On a considéré que les émissions du quasar étaient liées à la chute de matière vers le trou noir et à la dissipation de l'énergie du disque d'accrétion. Des variations de densité au sein du disque ou une variation ponctuelle du champ magnétique, sont donc susceptibles d'affecter les rayonnements, ce qui peut expliquer les brusques variations observées.

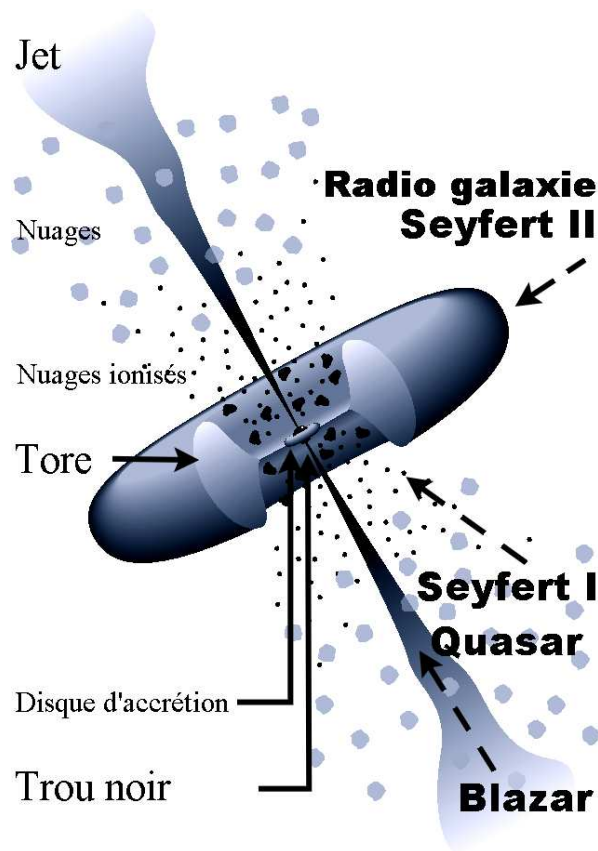
Cette approche des quasars répond donc bien aux conditions nécessaires. Elle permet même d'aller plus loin et de prévoir certains phénomènes.

On peut tout d'abord supposer que toute la matière n'est pas en permanence sous la forme d'un fin disque d'accrétion. Il faut en effet qu'une certaine quantité de matière soit accumulée quelque part pour assurer la durée de vie au quasar. On envisage l'existence d'un tore de poussière, un anneau situé loin du trou noir et qui alimente le disque.

De plus, le jet n'est sans doute pas parfaitement collimaté. Une certaine quantité de matière doit le quitter avant d'atteindre les lobes, formant ainsi des nuages de poussière. Si la matière sort du jet à une courte distance du centre du quasar, elle doit posséder encore la plus grande partie de son énergie initiale. A l'inverse, si elle s'échappe plus loin, une partie de cette énergie a déjà été dissipée par frottement dans le milieu intersidéral. On peut donc supposer l'existence de nuages ionisés, composés de matière sous haute énergie et de nuages électriquement neutres, situés plus loin du centre du quasar.

Le modèle ainsi décrit semble bien répondre à l'ensemble des conditions nécessaires à l'existence d'un quasar et se montre même un peu plus exhaustif.

En réalité, ce modèle ne se limite pas aux quasars. Il a été proposé pour décrire l'ensemble des Noyaux de Galaxie Actifs, c'est à dire les galaxies de Seyfert I et II, les quasars, mais aussi certaines radio-galaxies. Tous seraient en fait un seul et même type d'objet, vu sous différents angles.



Modèle unifié des Noyaux Actifs de Galaxie.  
 Selon l'angle sous lequel il perçoit l'objet, un observateur distant voit une forme ou une autre de NAG.

**Blazar :** D'après ce modèle, lorsque le jet est dirigé directement vers l'observateur, celui-ci voit un blazar. Etant très éloigné de notre objet d'étude, le thème du blazar ne sera pas développé ici.

**Quasar/Seyfert I :** Sous un angle un peu plus grand, l'observateur peut voir, au travers des nuages de poussière, le disque d'accrétion central. Il perçoit également au moins un des deux jets (celui dans sa direction) et parfois les deux. Cet angle lui donne à voir un quasar ou une galaxie de Seyfert I. Ces dernières présentent beaucoup de caractéristiques analogues à celles des quasars. On avait d'ailleurs envisagé que les quasars ne soient en réalité que des galaxies de Seyfert I amplifiées par lentille gravitationnelle.

La différence principale qui permet de juger de l'identité du corps observé, est la quantité d'énergie rayonnée. Pour évaluer cette énergie, on a recours à la *magnitude absolue*. Cette grandeur est égale à la magnitude apparente qu'aurait l'objet s'il se trouvait à 10 parsecs de la Terre. On considère qu'un quasar libère plus d'énergie qu'une galaxie de Seyfert I. On définit l'objet observé comme un quasar si sa magnitude absolue est inférieure à -23, comme une galaxie de Seyfert sinon. De plus, les Seyfert I sont radio-silencieuses.

On peut envisager que cette différence soit liée à l'âge de l'objet observé. Une diminution de magnitude peut en effet être la conséquence d'un épuisement des ressources de matière. Ainsi, une galaxie de Seyfert I pourrait être un ancien quasar, qui aurait fini de flamber ses réserves.

Cette approche a le mérite d'expliquer l'étrange largeur des raies des spectres émis par les galaxies de Seyfert I. Le spectre est issu du disque d'accrétion, c'est à dire de particules tournant à très grande vitesse. Cette vitesse entraîne un effet Doppler, donc un élargissement des raies, comme expliqué en 2.2.2 page 16.

Seyfert II/Radio galaxie : Observé orthogonalement à l'axe des jets, le modèle donne à voir le tore de poussière, assimilé à une galaxie de Seyfert II ou une radio-galaxie. A nouveau, on trouve un justification satisfaisante au spectre obtenu. Le tore tourne plus lentement que le disque d'accrétion. Il est cependant constitué de la même matière. Ceci explique la présence de raies similaires dans les spectres des galaxies de Seyfert I et II, tout en justifiant l'étroitesse de celles des Seyfert II.

On a vu que les propriétés radio provenaient principalement des lobes et des jets. Lorsque le NAG commence à s'épuiser, ces structures diminuent, entraînant une baisse des émissions radio. On voit donc une radio galaxie lorsque les deux jets sont encore fortement actifs, entraînant de fortes émissions. La galaxie décline peu à peu en QSO radio-silencieux, qu'on identifie comme une galaxie de Seyfert II.

On peut envisager une autre explication aux NAG radio-silencieux. Le rayonnement radio est en effet dû à la colimation des jets. La matière peut ne pas être éjectée en suivant précisément un jet, mais être émise en un "vent". Dans ce cas, le NAG continue de rayonner, sans pour autant présenter une émission radio observable sur Terre.

Ainsi, en exploitant l'effet Doppler, on a pu retracer l'élaboration d'un modèle complet, qui sert aujourd'hui à décrire l'ensemble des noyaux actifs de galaxie. Dans le cas particulier des quasars, ce modèle propose une explication à l'ensemble des propriétés caractéristiques. Il présente en effet un source d'énergie de taille restreinte (matière tombant dans un trou noir), entraînant une structure (disque d'accrétion et jet) susceptible d'expliquer les divers rayonnements. Enfin, le modèle permet de comprendre les variations observées dans l'ensemble des émissions.



# Chapitre 3

## Exploitation des quasars.

Nous nous sommes donc servis des observations pour établir un certain nombre de caractéristiques des quasars. En utilisant l'explication sur le redshift fournie par l'étude de l'effet Doppler, nous sommes parvenus à établir un modèle physique simplifié d'un quasar, auquel on peut relier l'ensemble des Noyaux Actifs de Galaxie. Nous allons à présent exploiter ce modèle pour déterminer un certain nombre d'informations sur l'ensemble de l'univers.

### 3.1 Les quasars, astres de référence.

Les quasars sont à présent utilisés comme repères. C'est en particulier le cas dans le cadre des systèmes de référence célestes de l'observatoire de Paris, sous la responsabilité de Jean Souchay. Les quasars sont ici exploités pour la position si particulière qu'ils occupent, à cause de la distance qui les sépare de nous.

#### 3.1.1 Distance des quasars.

On a déterminé, par hypothèse, que les quasars sont loin de la Terre. Il s'agit à présent de déterminer la valeur de cette distance. Pour cela, il existe différentes méthodes que l'on peut recouper pour obtenir le résultat le plus précis possible.

On peut tout d'abord exploiter le redshift en lui-même. Il est en effet lié à la vitesse d'expansion de l'univers, et cette vitesse apparente dépend elle-même de la distance nous séparant du quasar. Le rapport  $\frac{\text{vitesse d'éloignement}}{\text{distance}} = \frac{\dot{R}}{R}$  est noté  $H$ , et est appelé *constante de Hubble*. On a mesuré sa valeur. On considère aujourd'hui que  $H \simeq (75 \pm 25) \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$ . Cette valeur signifie qu'un point situé à 1 mégaparsec s'éloigne à environ 75 kilomètres par seconde, tandis qu'un point situé 2 fois plus loin s'éloigne deux fois plus vite. À partir de l'expression relativiste de  $z$ , on peut déterminer la vitesse radiale en fonction du redshift :  $\dot{R} = v = c \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}$ . On peut donc déterminer le rayon  $R$  nous séparant d'un quasar. C'est ainsi que l'on s'est aperçu que les quasars faisaient tous partie des corps les plus lointains jamais observés. La plupart d'entre eux semblent en effet distants de plusieurs milliards d'années lumières.

Il existe d'autres méthodes pour calculer l'éloignement des quasars. Elles sont certes plus précises, mais également bien plus complexes. On peut par exemple employer l'effet Sunyaev Zel'dovich (noté SZ). Il se base sur un effet Compton inverse. Dans un Compton classique, on considère un photon à une longueur d'onde  $\lambda$  donnée. Ce photon heurte un électron immobile. Il lui transmet alors une partie de son énergie, repartant avec une longueur d'onde  $\lambda^1$ , tandis que l'électron est mis en mouvement. Une démonstration complète de l'effet Compton est présentée en annexe.

Dans l'effet Compton inverse, c'est un électron qui perd de l'énergie en la donnant à un photon. Ce phénomène est rare et nécessite des conditions très particulières qu'on trouve dans les structures

---

<sup>1</sup> la formule exacte est  $\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta)$ , avec  $h$  constante de Planck,  $m_e$  la masse de l'électron et  $c$  la vitesse la lumière.

particulièrement massives. En particulier, les NAG et les quasars sont susceptibles d'engendrer cet effet. Des photons nous proviennent des confins de l'univers. Une partie de ces photons traverse des objets (dont les quasars), l'autre partie nous parvient directement. Les premiers subissent donc un décalage par Compton inverse, les seconds restent intacts. C'est cette différence entre photons ayant traversé un objet massif et le fond cosmique intact que l'on nomme effet Sunyaev Zel'dovich.

Plus l'objet traversé est dense en électron, plus le décalage de l'effet SZ est important. On a montré que la densité en électron constitue en réalité le paramètre principal de cet effet. On peut, en mesurant le décalage, déterminer sa valeur. D'un autre côté, les électrons interviennent également dans le rayonnement X de l'objet. Ce que nous percevons de ce rayonnement dépend de la densité en électron de la source, mais aussi de la distance  $D$  qui nous en sépare. On connaît donc à la fois la densité grâce à l'effet SZ et le rayonnement X grâce aux observations : on peut déterminer l'inconnue  $D$ .

Ainsi, par différentes méthodes aboutissant aux mêmes résultats, on peut déterminer avec une assez bonne précision la distance nous séparant des quasars. On a ainsi compris que certains d'entre eux se trouvaient aux confins de l'univers : les plus lointains d'entre eux sont à plus de 13,7 milliards d'années lumière de la Terre.

### 3.1.2 Stabilité des quasars.

Toutes les méthodes de calcul concordent : les quasars sont donc extrêmement éloignés. Ils sont entraînés par l'expansion de l'univers à des vitesses très élevées. De plus, ce mouvement est exclusivement radial. Par conséquent, quelque soit leur mouvement propre, les quasars semblent pour nous s'éloigner dans une direction constante, le long de la droite Terre-quasar. La direction donnée par un quasar est donc extrêmement stable. On peut donc s'en servir comme de points fixes pour déterminer des axes. Dans le passé, on avait défini les trois directions orthogonales du référentiel de Copernic en les pointant vers des étoiles lointaines. Il semble plus pertinent aujourd'hui de les rattacher aux quasars, et c'est à partir de ce à quoi travaille la section des systèmes de référence célestes de l'Observatoire.

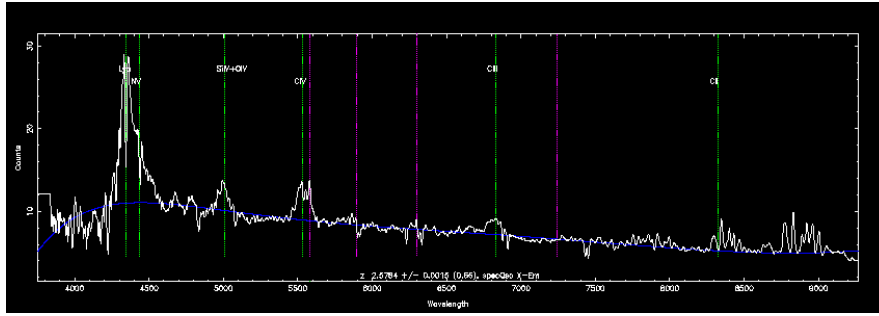
## 3.2 Les quasars, sondes de l'univers.

Au delà de repères proches de la Terre, les quasars peuvent apporter des informations sur de nombreux points.

### 3.2.1 Composition de l'univers.

En particulier, ils sont susceptibles de nous renseigner sur le contenu de l'univers compris entre eux et nous (c'est à dire sur l'ensemble de l'univers).

On peut par exemple exploiter la raie *Lyman $\alpha$* . Entre le quasar et nous se trouvent un certain nombre de nuages d'hydrogène. Lorsque la lumière émise traverse ces nuages, les atomes absorbent certaines longueurs d'onde caractéristiques. En particulier, la longueur d'onde à 1216Å est souvent absorbée. Quand la source est au repos, cette valeur correspond à la raie *Lyman $\alpha$* . Mais nous avons vu qu'un décalage résulte d'un déplacement, et que les quasars s'éloignent du fait de l'expansion de l'univers. Les nuages interposés restent pour la plupart suffisamment loin pour recevoir un rayonnement décalé par effet Doppler. Par conséquent, le signal qu'ils reçoivent est modifié. La longueur d'onde 1216Å ne correspond pas dans leur référentiel au pic *lyman $\alpha$*  émis par le quasar. Lorsque le nuage absorbe cette longueur d'onde, il ne touche donc pas au pic, mais affecte le spectre à côté. On observe donc de nombreuses raies d'absorption juste à côté de la raie *Lyman $\alpha$* . Chacune correspond à un nuage qui a perçu le signal avec un décalage qui lui est propre. L'ensemble de ces raies forment une "forêt de *Lyman $\alpha$* ". En étudiant cette "forêt", on peut déterminer le redshift avec lequel le rayonnement était perçu dans les nuages d'hydrogène, donc leur distance au quasar. Connaissant notre propre éloignement, on peut donc cartographier les nuages d'hydrogène dans l'univers.



Sur la gauche de spectre, derrièr le grand pic de la raie Lyman $\alpha$ ,  
l'accumulation de raies d'absorption forment la  
forêt de Lyman.

### 3.2.2 Température de l'univers.

L'étude des quasars permet également de déterminer la température d'une région de l'univers. Cette température est due aux photons issus du fond cosmique qui baignent l'univers tout entier. Dans la théorie du big-bang, la création de l'univers s'est accompagnée de très fortes pressions et températures, qui sont petit à petit allées en décroissant. Durant une longue période, la matière a donc été dans un état de plasma dense et opaque. Avec la baisse des températures, la matière s'est condensée et l'univers est devenu transparent. On date cette période à 300 000 ans après le Big Bang. Des photons ont alors commencé à s'extraire de la matière, et à traverser l'univers.

Cette traversée est loin d'être évidente. En effet, l'expansion de l'univers entraîne une perte d'énergie, correspondant à un décalage de la longueur d'onde, comme nous l'avons déjà vu. Les photons étaient très énergétiques lorsqu'ils ont été émis. Le décalage leur a fait traverser toute la gamme du spectre électromagnétique : on observe à présent ces photons sous la forme d'un rayonnement radio, diffus et isotrope. On peut dresser le spectre de ce rayonnement, c'est à dire déterminer son intensité en fonction de la longueur d'onde. On s'aperçoit alors qu'il est semblable à celui émis par un corps quelconque chauffé à la température de  $2.73K^2$ . On peut donc considérer que l'univers a, à notre époque<sup>3</sup>, une température de  $2.7K = T_0$ .

On a montré ci dessus que l'intensité du rayonnement est atténuée par l'expansion de l'univers. Par conséquent, des régions plus éloignées de nous dans l'univers, donc plus proches dans le temps du big bang, doivent présenter une température plus élevée. On a pu montrer qu'une région présentant pour nous un redshift de  $z$  baigne dans une température  $T_z$  telle que

$$T_z = T_0(1 + z)$$

Les quasars permettent d'obtenir assez facilement une valeur du redshift, ils permettent donc de déterminer la température de la région dans laquelle ils se trouvent.

## 3.3 Les quasars, témoins d'un modèle cosmologique.

Les quasars sont également utilisables par la physique cosmologique. Ils témoignent en effet d'un certain nombre d'éléments cosmologiques importants.

### 3.3.1 Evolution des galaxies.

Les quasars apportent en particulier des informations sur la formation et l'évolution des galaxies. En effet, étant très éloignés dans l'espace, ils le sont également dans le temps. Les galaxies-hôtes sont donc elles-même bien moins avancées dans leur histoire que celles qui nous entourent. Rien n'empêche

<sup>2</sup>Pour rappel :  $0K = \text{zéro absolu} = \text{zéro kelvin} = -273^\circ C$ .

<sup>3</sup>donc dans une région spatiale autour de la nôtre

de penser que les galaxies plus proches, que nous observons (presque) telles qu'elles sont actuellement, étaient il y a fort longtemps des quasars. Toute information sur la formation des quasars peut donc contribuer à la connaissance que nous développons sur la vie des galaxies.

On envisage que les quasars aient pu se former par "merger", c'est à dire par collision entre deux galaxies. Lorsque deux galaxies sont suffisamment proches l'une de l'autre pour que leurs attractions gravitationnelles respectives ne soient pas négligeables, elles sont attirées l'une vers l'autre, et finissent par former une galaxie plus importante.

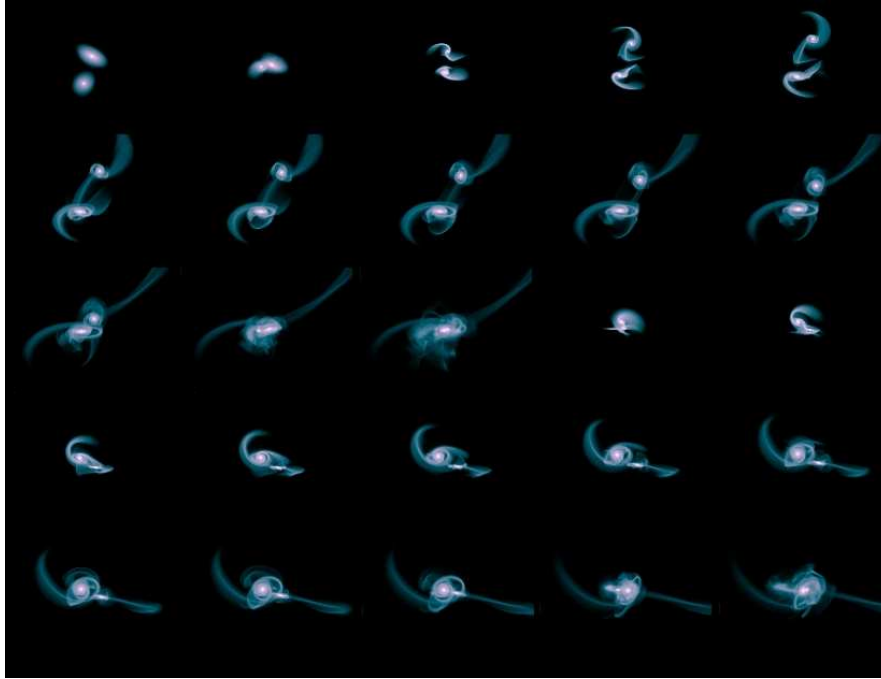


Illustration de merger de galaxies.

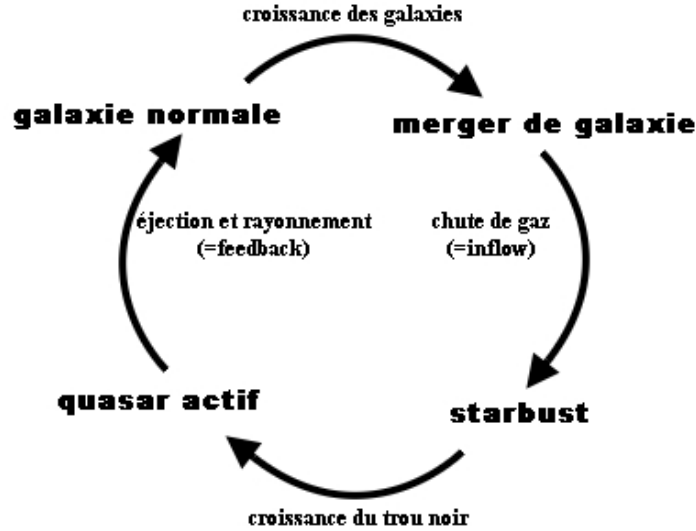
On peut remarquer l'éclat de la galaxie finale.

Cet éclat, conséquence du merger, est lié à la formation de nombreuses étoiles.

Cette hypothèse de formation a le mérite d'expliquer un certain nombre de phénomènes. Tout d'abord, lors d'un tel évènement, la matière évacue une partie de son moment angulaire. En d'autres termes, une partie de la matière perd de la vitesse de rotation. Au lieu de tourner en orbite autour du centre de la galaxie, elle va donc tomber plus rapidement, presque en chute libre vers le trou noir central. Cette chute de matière est capitale : c'est elle qui rend un noyau de galaxie actif. On a en effet vu que l'énergie rayonnée provient essentiellement de la chute de matière dans l'astre central. Si la matière tourne sur une orbite plus haute que le rayon de l'horizon du trou noir (rayon de Schwarzschild), alors le trou noir est dit *dormant*. Un trou noir reste dormant jusqu'à ce qu'assez de matière s'approche de lui pour qu'il redevienne actif.

De plus, le rapprochement de deux galaxies perturbe très fortement leur environnement. Il arrive alors que les nuages de gaz qui les entourent s'effondrent sur eux-mêmes, en formant très rapidement de nombreuses étoiles. On parle alors de *starburst*.

On peut donc envisager un cycle galactique. Une galaxie standard, au trou noir dormant, croît en attirant à elle la matière qui passe sous son influence gravitationnelle. Elle grossit, exerçant sa force de plus en plus loin. Elle peut alors finir par interagir avec une autre galaxie. Les deux corps fusionnent alors, en un merger de galaxie. Sous l'effet de concentration des gaz présents, des étoiles sont créées, durant une phase de *starburst*. L'absorption de matière tombant vers le centre de la nouvelle galaxie entraîne une croissance du trou noir. Si suffisamment de matière est ainsi attirée et accrétée, le trou noir peut redevenir actif. On peut alors observer un quasar, jusqu'à ce que l'éjection l'épuise. Le NAG redevient alors dormant, et la galaxie redevient standard.



Ainsi, on peut obtenir des informations sur l'évolutions des galaxies à partir de l'étude de quasars.

### 3.3.2 Expansion de l'univers.

En plus des galaxies, les quasars apportent des indications sur le modèle cosmologique.

La modélisation même des quasars découle du modèle considéré. Nous avons envisagé un univers expansion, et cette approche a permis d'expliquer les observations faites sur les quasars. Si ce modèle n'avait pas permis de trouver une description correspondant aux critères des quasars, alors il n'aurait pu être pertinent. A défaut de montrer la validité du système, le modèle des quasars ne montre en tout cas pas de défauts.

Certaines expériences ont même permis d'écarter d'autres cosmologies au profit du modèle adopté. On a pu déterminer par l'observation la température d'un nuage proche d'un quasar de redshift  $z = 1.78$ . La température mesurée est de  $\simeq 7.4K \pm 0.8K$ , en très bon accord avec la valeur de 7.58 fixée par la théorie (voir 3.2.2).

De plus, les quasars observés sont tous très distants. Ils sont pour la plupart situé à une distance<sup>4</sup>  $z > 2$ . Cette observation laisse penser à un déficit de quasar au temps actuel. Cette observation va elle aussi dans le sens de l'expansion de l'univers. En effet, on considère que les quasars résultent de processus particulièrement violents et énergétiques, telles que la fusion des galaxie. Or l'expansion de l'univers entraîne une dispersion de son contenu. Il paraît donc cohérent de ne plus observer de merger à notre époque, donc dans notre périphérie proche. Un autre processus pourrait expliquer la formation de quasar. On envisage en effet que l'univers a été bien plus actif que maintenant lors de ces premières (centaines de millions d') années. Dans un tel milieu, où la matière était plus présente et plus concentrée, on peut envisager que la formation des quasars ait eu lieu plus facilement que maintenant.

L'objectif de tels raisonnements est de déterminer une hypothèse cosmologique correcte. Il en existe 3 principales aujourd'hui. Elles décrivent l'univers comme étant hyperbolique (croissance infinie), parabolique (croissance jusqu'à atteindre une taille maximale stable) ou elliptique (phase de croissance suivie d'un effondrement). Ces 3 horizons dépendent du rapport entre la force de gravitation, qui tend à rassembler l'univers, et la vitesse d'expansion, qui pousse au contraire à le disperser. Ces théories reposent sur trois grandeurs :  $\rho_0$ , la densité moyenne,  $H$ , la constante de Hubble et  $q_0$ , le paramètre de décélération. Le terme le moins bien connu est  $q_0$ . On a donc cherché à le déterminer au moyen de mesures indirectes. On a espéré que l'étude des quasars permettrait d'approcher ce facteur. Malheureusement, la variation de magnitude empêche l'élaboration de courbes satisfaisantes. Le paramètre de

<sup>4</sup>Comme le redshift est lié à la vitesse due l'expansion de l'univers, elle même liée à la distance nous séparant de l'objet, on peut mesurer une distance en redshift.

décération, dont la valeur va déterminer l'avenir de notre univers, reste donc aujourd'hui complètement inconnu.

# Conclusion :

L'effet Doppler est donc bien au coeur de l'étude des quasars. Il apparait dès les premières observations : c'est en effet l'importance de leur redshift qui a tout d'abord attiré l'attention sur les quasars. Cet effet est également sous-jacent dans un certain nombre de propriétés physiques. Le phénomène de boost Doppler en constitue un bon exemple. Il représente donc une étape indispensable dans la compréhension des quasars en général et de leur variabilité en particulier.

Son analyse théorique peut être soumise à une vérification par simulation informatique et expérimentale. Elle joue un rôle essentiel dans l'élaboration d'un modèle décrivant non seulement les quasars, mais aussi l'ensemble des noyaux actifs de galaxie. Elle permet en effet de soulever plusieurs hypothèses susceptibles d'expliquer les observations, puis de les éliminer méthodiquement pour ne conserver que la plus adaptée : le redshift est sans doute engendré par l'expansion de l'univers, mais reste modélisable par l'effet Doppler relativiste.

Cette approche détermine le paradigme actuel des noyaux actifs de galaxie, qui vérifie un ensemble des conditions nécessaires. Elle présente un trou noir comme source compact d'énergie, explique le rayonnement radio par un champ magnétique, propose une structure avec un disque d'accrétion adaptée aux propriétés physiques qui concorde avec les observations et justifie les importantes variations du flux observées.

Enfin, l'effet Doppler permet de traiter les signaux émis par les quasars. Cette analyse permet non seulement de localiser ces sources aux confins de l'espace, mais aussi d'obtenir des informations sur tout l'univers et de tester la validité de modèles cosmologiques. On exploite enfin la stabilité des directions données par les quasars pour établir des systèmes de références spatiales.

Appliquée aux quasars, l'étude de l'effet Doppler permet donc d'avoir un aperçu de l'univers. Si elle ne constitue ni la méthode la plus précise, ni la plus efficace, elle donne néanmoins une première approche assez approfondie et peut servir de base à des théories plus complexes.

# Chapitre 4

## Annexes.

### 4.1 Modélisation théorique de l'expérience.

**Système :** {mobile autoporteur + émetteur ultrason, assimilés à un point M de masse  $m=855\text{g}$ }

**Référentiel :** celui du laboratoire, supposé galiléen

**Bilan des forces :**

Poids :  $\vec{P} = m\vec{g} = mg\vec{U}_z$

Réaction :  $\vec{R} = R\vec{U}_z$

Tensions du ressort 1 :  $\vec{T}_1 = -k(x - l_0)\vec{U}_x$

du ressort 2 :  $\vec{T}_2 = +k(d - x - l_0)\vec{U}_x$

Frottements fluides :  $\vec{f} = -\alpha\dot{x}\vec{U}_x$

Force excitatrice :  $\vec{F} = F_0\cos(\omega t)\vec{U}_x$

**Application du Principe fondamental de la dynamique**

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{P} + \vec{T} + \vec{f} + \vec{F} + \vec{T}_1 + \vec{T}_2$$

On projette sur  $\vec{U}_x$  :  $m\ddot{x} = -k(2x - d) - \alpha\dot{x} + F_0\cos(\omega t)$

On effectue deux changements de variables  $X = x - \frac{d}{2}$  et  $k' = 2k$ .

On a donc  $\ddot{X} + \frac{\alpha}{m}\dot{X} + \frac{k'}{m}X = \frac{F_0}{m}\cos(\omega t)$ , soit en terme de vitesse :

$$\ddot{X} + \frac{\alpha}{m}\dot{X} + \frac{k'}{m} \int \dot{X} = \frac{F_0}{m}\cos(\omega t)$$

On cherche une solution  $\dot{X}$  de la forme  $\dot{X} = \dot{X}_m\cos(\omega t + \phi)$

On passe aux complexes : on pose  $\dot{X} = \text{Re}(\dot{X}_m e^{j\phi} e^{j\omega t})$

On trouve donc

$$\dot{X}_m e^{j\phi} = \frac{H_o}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

avec  $H_o = \frac{F_0}{\alpha}$ ,  $Q = \frac{1}{\alpha}\sqrt{k'm}$ ,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k'}{m}}$ . On détermine donc  $\dot{X}_m = |\dot{X}_m e^{j\phi}|$ , et  $\phi = \text{arg}(\dot{X}_m e^{j\phi})$

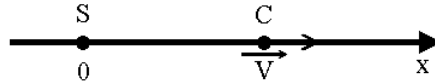
En travaillant à la pulsation de résonance  $\omega = \omega_0$ , on a  $\dot{X} = \frac{F_0}{\alpha}\cos(\omega_0 t)$ .

Pour déterminer le rapport inconnu de  $\frac{F_0}{\alpha}$ , on mesure les positions extrêmes A et B atteintes par M. On a alors  $AB = \int \dot{X}(t)dt = \int \frac{F_0}{\alpha}\sin(\omega_0 t)$ , en changeant l'origine des temps. On a alors  $AB = \frac{2F_0}{\alpha\omega_0}$  donc  $\frac{F_0}{\alpha} = \frac{AB}{2}\omega_0$ .



## 4.2 Modélisation théorique de l'effet Doppler classique.

On considère un mouvement du capteur (C), la source (S) restant fixe. Le capteur se déplace exclusivement selon l'axe  $\vec{U}_x$ , à la vitesse  $\vec{V}$ . La source émet avec une période T un "bip", se déplaçant suivant l'axe à une vitesse c.



Soit  $x_0$  la distance initiale entre S et C.

La position de C à un instant t est donnée par  $x(t) = x_0 + vt$

La source émet un "bip" à l'instant  $t_1$ . Ce signal est reçu par C en  $t'_1$  tel que

$$c(t'_1 - t_1) = x_0 + vt'_1$$

(soit à l'instant où le bip a parcouru autant de distance que l'éloignement Source-Capteur).

Un deuxième bip est émis en  $t_2 = t_1 + T$ . De la même façon, il est perçu en  $t'_2$  tel que

$$c(t'_2 - t_2) = x_0 + vt'_2$$

On a alors  $T = t_2 - t_1$ . De plus, la période perçue par le capteur est définie par  $T' = t'_2 - t'_1$ . En soustrayant les deux égalités obtenues, on a :  $c(T' - T) = vT'$ , soit

$$f' = f\left(1 - \frac{v}{c}\right).$$

En passant aux longueurs d'onde, on obtient :  $\frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{\lambda}\left(1 - \frac{v}{c}\right)$  ce qui aboutit à :

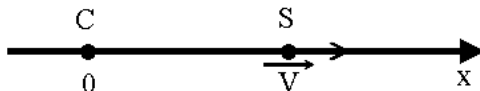
$$\lambda' = \lambda\left(1 + \frac{v}{c - v}\right)$$

**Remarque :** Pour  $v \ll c$ , on obtient  $\lambda' = \lambda\left(1 + \frac{v}{c}\right)$ , qui correspond bien au même  $DL_1$  que l'expression relativiste.

### 4.3 Modélisation théorique de l'effet Doppler relativiste.

Le référentiel joue un rôle tout particulier dans la physique relativiste. Comme on considère la réception d'une onde, on va considérer le capteur comme étant immobile, et la source en mouvement. Toutes les grandeurs liées au capteur sont notées avec des '.

La situation est toujours celle d'une source (S) envoyant des "bips" à la période  $T'$  vers le capteur C.



On considère donc :

$R'$  : référentiel lié à C.

$R$  : référentiel lié à S, en translation dans  $R$  à la vitesse  $\vec{V}$ .

D'après la dilatation de temps, une durée  $\Delta t$  dans  $R$  correspond à  $\Delta t' = \gamma \Delta t$  dans  $R'$ , avec  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$  le facteur de Lorentz.

A  $t = 0$ , la source S est confondue avec le point C.

A  $t_1 = T$  dans  $R$ , la source émet un bip. Cet évènement a donc lieu à  $t'_1 = \gamma T$  dans  $R'$ .

Le bip atteint C à l'instant  $t'_2$  tel que  $(t'_2 - t'_1)c = t'_1 v$ , donc

$$t'_2 = T' = t'_1 \left(1 + \frac{v}{c}\right) = T \gamma \left(1 + \frac{v}{c}\right) = T \frac{\left(1 + \frac{v}{c}\right)}{\sqrt{\left(1 + \frac{v}{c}\right)\left(1 - \frac{v}{c}\right)}}.$$

$$\text{On a donc : } T' = T \times \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$$

Comme  $\lambda = cT$ , on a  $\lambda' = \lambda \times \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$ . Enfin, par définition,  $\lambda' = \lambda(z + 1)$ . On trouve donc l'expression de  $z$  :

$$z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1$$

## 4.4 Modélisation de l'effet Compton.

On considère une collision entre un photon et un électron.

**Avant le choc :**

Electron : énergie :  $E_{e1} = m_e c^2$

quantité de mouvement :  $\vec{p} = \vec{0}$

Photon : énergie :  $E_1 = h\nu = p_1 c$

quantité de mouvement :  $\vec{p}_1 = \frac{h\nu}{c} \vec{U}_x$

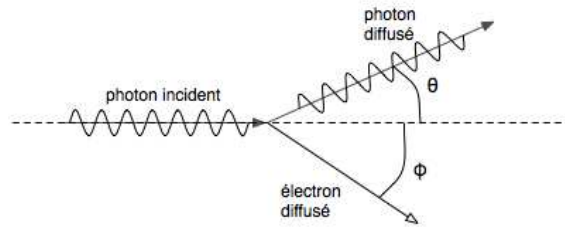
**Après le choc :**

Electron : énergie :  $E_{e2} = \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2}$

quantité de mouvement :  $\vec{p}_e$

Photon : énergie :  $E_2 = h\nu' = p_2 c$

quantité de mouvement :  $\vec{p}_2 = \frac{h\nu'}{c} \vec{U}_\theta$



Diffusion Compton: Collision d'un photon avec un électron au repos

On applique les lois de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie :

**Conservation de la quantité de mouvement :**

$\vec{p} + \vec{p}_1 = \vec{p}_e + \vec{p}_2$ , ce qui donne, projeté convenablement ,

$$p_1 = p_2 \cos\theta + p_e \cos\phi$$

$$0 = p_2 \sin\theta - p_e \sin\phi$$

On isole  $p_e$ , puis on applique les règles de trigonométrie, pour obtenir :

$$p_e^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos\theta$$

**Conservation de l'énergie :**

$p_1 c + m_e c^2 = p_2 c + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2}$ , soit en isolant  $p_e$ ,

$$p_e^2 = (p_1 - p_2)^2 + 2(p_1 - p_2)m_e c$$

On trouve alors

$-2p_1 p_2 \cos\theta = -2p_1 p_2 + 2(p_1 - p_2)m_e c$ . Avec  $p_1 = \frac{h}{\lambda}$  et  $p_2 = \frac{h}{\lambda'}$ , on obtient

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

# Chapitre 5

## Sources.

### 5.1 Contact.

Dans le cadre de l'étude des quasars, Jean Souchay, responsable du service des systèmes de référence célestes et directeur adjoint du laboratoire de l'Observatoire de Paris, nous a accueilli et proposé un stage de deux semaines cet été dans son département.

Ce stage consistera principalement à recueillir, comparer et compiler les données accumulées dans les catalogues de quasars existants. Cette compilation prend place dans le cadre de l'élaboration par l'Observatoire du Very Large Quasar Catalogue. Elle nécessitera en particulier l'apprentissage de la programmation en fortran et du traitement de données.

M Souchay nous a également proposé d'assister à un séminaire "temps et espace" réalisé par Hélène Sol sur le sujet : "Les Noyau Actifs de Galaxie : à la croisée des chemins". Il nous a enfin permis d'assister à une observation à l'observatoire.

### 5.2 Bibliographie.

La spectroscopie, Jean Terrien, Que sais-je? (1951)

Les quasars, Philippe Veron, édition Que sais-je? (1967)

Les trous noirs, Jean Pierre Luminet, Points Science (1987, mise à jour en 1992)

Les galaxies et la structure de l'univers, Dominique Proust et Christian Vanderriest, Points Science (1997)

Les raies d'absorption dans le spectre des quasars, Patrick PetitJean, Annales de physique (1999)

Les quasars, Daniel Kunth, Collection Dominos, Edition Flammarion (2002)

La gravitation : l'univers sous influence, dossier pour la science (2003)

L'histoire de l'Univers, dossier pour la science (oct 2004)

Astronomie, astrophysique, Agnès Acker, Dunod (2005)

### 5.3 Informatique.

Programme de modélisation de l'effet Doppler écrit en DARK BASIC.

Sloan Digital Sky Survey : <http://www.sdss.org/>

Futura science : site : <http://www.futura-sciences.com/>

forum astronomie : <http://forums.futura-sciences.com/forum27.html>

forum physique : <http://forums.futura-sciences.com/forum32.html>

Astro files : <http://www.astrofiles.net/index.php>

Wikipédia

portail astronomie : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Portail:Astronomie>

portail physique : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Portail:Physique>