

Spectroscopie cohérente en astrophysique: SNR1987A, quasars, galaxies ...

jacques.moret-bailly@u-bourgogne.fr

Résumé: De nombreuses observations astronomiques paraissent inexplicables, "anormales" parce que, à l'exception de la réfraction, les interactions cohérentes de la lumière avec la matière sont ignorées. Comprendre la cohérence optique paraît difficile: Bien qu'Einstein expliqua émission et absorption de la lumière en 1917, la plupart des spectroscopistes ignorèrent le concept de cohérence jusqu'à la construction d'un maser par Townes. Le collier de perles de la supernova 1987A, les spectres des quasars, l'apparition de vides entre les galaxies, l'accélération anormale des sondes Pioneer, les relations entre le CMB et l'écliptique, etc. sont facilement expliqués.

Le modèle de Strömgen.

Strömgen a étudié un système constitué d'un vaste nuage homogène d'hydrogène sous basse pression, froid, à grande distance, contenant une source extrêmement chaude comme une étoile O ou B. A proximité de l'étoile, à une température T supérieure à 5.10^4K , l'hydrogène est complètement ionisé en protons et électrons. Plus loin, pour T voisin de 2.10^4K , il est sous forme atomique, et à grande distance, sous forme moléculaire.

Selon Strömgen, l'équilibre du système résulte principalement de l'absorption de la lumière de l'étoile aux fréquences discrètes ou non du spectre de l'hydrogène, et de l'émission spontanée de ces mêmes raies. Le plasma de protons et électrons, libres dans le gaz à basse pression, est transparent, de sorte que toutes les fréquences des rayons issus de l'étoile (dits ici rayons radiaux) sont transmis sans absorption jusqu'à ce que la température du plasma ait été assez refroidie (par diffusion ou par des effets optiques marginaux dus, par exemple, à des impuretés), pour que des atomes apparaissent.

Strömgen a montré que les atomes excités par collisions ou par absorption des rayons radiaux perdent spontanément et rapidement leur énergie en rayonnant le spectre de l'hydrogène atomique; la collision des atomes peu excités obtenus avec protons et électrons conduit à la formation de nouveaux atomes, dans un processus auto-accélééré. Strömgen a ainsi montré que la zone de transition entre plasma totalement ionisé (en protons et neutrons) et hydrogène atomique est relativement fine. Cette zone est appelée "coquille de Strömgen", et la sphère de gaz ionisé, de rayon R , "Sphère de Strömgen".

Alors que le rayonnement d'une étoile est en général à peu près isotrope, la matière qui a pu être éjectée, par exemple lors d'explosions d'une supernova est répartie plus irrégulièrement. La théorie de Strömgen reste qualitativement valide, mais la sphère devient une ou plusieurs surfaces susceptibles d'être mises en évidence par échos de photons si l'émission de lumière par l'étoile est variable (C. L. Martin, D. Arnett, ApJ 447:378 1995; B. E. K. Sugeran et al., arxiv:astro-ph/0502378.). En dépit de

leurs distorsions, nous parlerons de sphère et coquille de Strömgen.

Superradiance

La photographie (<http://imgsrc.hubblesite.org/lu/db/1997/03/images/a/formats/print.jpg>) de la supernova 1987A montre qu'elle est entourée d'anneaux. La densité de gaz en leur voisinage est de l'ordre de 10^{10} m^{-3} , ce qui donne, pour un chemin de l'ordre d'un centième du diamètre de l'anneau

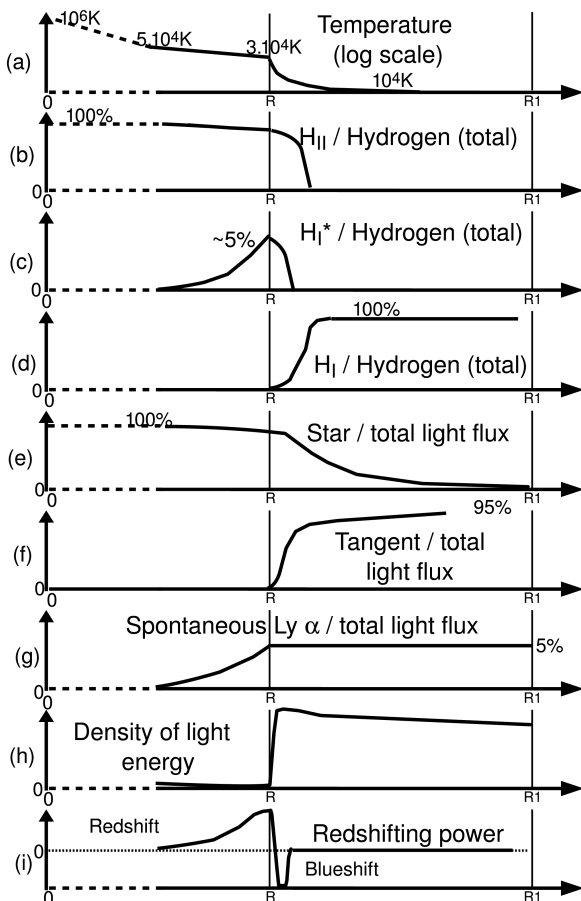


Illustration 1: Variation, en fonction de la distance R à l'étoile, de l'état du gaz et du rayonnement.

central, soit 0,01 année-lumière (environ 10^{14} m), une "densité de colonne" de 10^{24} m^{-2} de l'ordre du produit la densité de colonne de gaz actif d'un laser par la qualité de sa cavité. Dans ces conditions le spectre d'une raie superradiante se réduit, comme dans un laser, au pic de Dicke, et du fait de la compétition des modes, comme dans un laser, le nombre de rayons brillants est faible. Ces rayons correspondent à un parcours maximal dans le milieu amplificateur: ici les rayons sont tangents à la sphère de Strömgen définie par l'amorçage de la superradiance (fig. 1,f). Comme les rayons superradiants sont intenses, ils extraient énergiquement l'énergie des atomes excités HI^* (fig. 1,c), y compris des électrons et protons HII en état de collision (fig. 1,b). En conséquence, le refroidissement du gaz est encore plus brutal que dans le modèle original de Strömgen (fig1,a).

Soient m, n, p, q quatre niveaux d'énergie croissante de l'atome; la stimulation de l'émission de la raie de transition de p vers n dépeuple p et peuple n , ce qui favorise une émission de q vers p et de n vers m . Il se forme ainsi des cascades qui favorisent, en particulier, l'émission de l'ensemble des transitions alpha. La nonlinéarité qui apparaît lie les éléments de la cascade en une émission multiphotonique. Les rayons émis tangentiellement sont portés, dans une direction donnée, par les génératrices d'un cylindre et vus comme formant un anneau; cet anneau est discontinu en raison de la compétition des modes. Comme les émissions aux diverses fréquences d'une cascade sont liées, les modes correspondants sont liés aussi bien que leur permettent leurs différentes diffractions.

Diffusion induite.

Les rayons radiaux émis par l'étoile peuvent pomper les atomes jusqu'à des niveaux excités, y compris dans le continuum d'ionisation. En raison de la très grande luminance de ces rayons, ces pompes peuvent être multiphotoniques, de sorte que l'absorption ne se limite pas aux seules raies, mais concerne tout le spectre continu. Ensuite, des cascades induites par les superradiances peuvent desexciter les atomes. Mais tout le processus fait intervenir des rayons de haute ou moyenne énergie, de sorte que les transitions élémentaires sont liées en un processus de diffusion multiphotonique qui transfère l'énergie du spectre continu radial en raies spectrales de rayons tangentiels. Ce processus est "paramétrique", c'est à dire il n'excite pas de façon permanente les atomes, mais les "habille", c'est à dire mêle transitoirement l'état initial des atomes à une petite proportion d'états excités. Il est conforme aux lois de la thermodynamique car il transfère de l'énergie des rayons radiaux dont la température déduite de leur luminance par la loi de Planck est très élevée (10^6K) vers les rayons superradiants moins chauds.

Les températures des rayons radiaux et tangentiels tendent à s'équilibrer; comme l'étoile est vue sous un angle solide beaucoup plus faible que les taches qui forment les anneaux, elle est invisible. En raison de l'affaiblissement des rayons radiaux dans la coquille, les taches sont plus brillantes sur le bord interne de l'anneau.

Effet Raman Cohérent agissant sur la Lumière Incohérente (CREIL).

En technologie laser, on utilise des effets cohérents (qui ne modifient pas la géométrie des rayons), paramétriques (dans lesquels la matière n'échange pas de l'énergie de façon permanente) pour combiner, multiplier, déplacer les fréquences des rayons, par exemple obtenir un rayon bleu à partir d'un laser infrarouge. Ces interactions sont intenses, mais il est difficile d'obtenir la cohérence car les longueurs d'onde dépendent des fréquences, à part quelques exceptions, comme l'utilisation de deux indices de réfraction d'un cristal. On peut obtenir les mêmes surfaces d'onde si deux fréquences sont assez proches et les raies assez larges pour se recouvrir; alors les deux ondes interfèrent en une onde unique ayant une fréquence intermédiaire. Ce résultat est d'autant plus facilement obtenu que les raies sont rendues plus larges par limitation de la durée des impulsions de lumière; dans les meilleures conditions, le glissement de fréquence obtenu est inversement proportionnel au cube de la durée des impulsions, de sorte que des observations aisées dans une fibre optique avec des impulsions femtosecondes requièrent des parcours 10^{18} fois plus longs avec les impulsions nanoseconde qui

forment la lumière naturelle: des parcours astronomiques sont nécessaires.

Pour que l'effet soit paramétrique, il faut combiner au moins deux effets Raman impulsionnels cohérents agissant sur au moins deux rayons se croisant dans le milieu actif; il y a alors transfert d'énergie du chaud aux froids; en pratique, selon la loi de Planck, la lumière est habituellement chaude, les ondes radio, en particulier le rayonnement thermique, sont froides. Il faut que la raie Raman diffusée soit assez proche de la raie excitatrice: la fréquence 1420 MHz de recouplage de spins dans l'état fondamental est trop élevée, alors que les fréquences 178 MHz de l'état $2S_{1/2}$, 59 MHz de l'état $2P_{1/2}$, et 24 MHz de $2P_{3/2}$ conviennent (Moret-Bailly J., AIP Conf. Proc., **822**, 226, 2006).

Application du CREIL à SNR1987A.

La raie Ly α est émise spontanément dans la région externe de la sphère de Strömgren par les atomes d'hydrogène excités. La décroissance de la température pour une augmentation de la distance au centre r permet la formation d'une densité croissante d'atomes donc un accroissement de l'émission spontanée de la raie (fig. 1,g). Ces atomes produisent aussi des transferts d'énergie paramétriques entre les rayons émis spontanément, les rayons radiaux et thermiques, le bilan étant un rougissement du rayonnement spontané d'autant plus important que le parcours est plus grand, donc l'émission plus profonde et plus faible: la raie Lyman α est élargie, son intensité décroît lorsque sa longueur d'onde croît. Lorsque ce rayonnement pénètre dans la coquille de Strömgren, il reste encore un peu d'hydrogène excité (fig. 1,c), alors que le flux tangential commence à être intense (fig. 1,f). Comme les rayons tangentiels s'éloignent beaucoup plus lentement de l'étoile que les rayons radiaux, la densité d'énergie de rayons chauds est beaucoup plus grande que dans la sphère. Ainsi, il apparaît un effet CREIL intense, mais sur une courte longueur. Comme la lumière spontanée est faible donc relativement froide, elle acquiert de l'énergie et la raie est globalement déplacée vers les courtes longueurs d'onde. (Michael E., McCray R., Filippenko A. V., Lundqvist P. et al., *Astrophys. J.*, **593**, 809, 2003).

Les raies émises dans la coquille ne sont pas notablement déplacées en dépit d'un long parcours dans H_I (non excité).

Applications à d'autres problèmes d'astrophysique.

Beaucoup d'observations de glissements de fréquence sont maintenant qualifiées de "anomalous", "peculiar", "puzzling" etc. Ces glissements se produisent toujours en présence d'hydrogène atomique excité (H_I^{*}) et non dans son état fondamental (H_I) (fig.1,i). H_I^{*} peut résulter d'une excitation thermique dans un plasma stable, du refroidissement d'un plasma très chaud ou d'une excitation

d'hydrogène atomique relativement froid par de l'ultraviolet lointain.

Ce dernier cas conduit à définir plusieurs types de régions dans l'espace contenant de l'hydrogène atomique H_I :

- Dans une région "A", l'absorption d'une fraction de l'énergie lumineuse d'un spectre continu à la fréquence de la raie Lyman α est suffisante pour déplacer par effet CREIL le spectre de la largeur de cette raie. Ainsi, les rayons peuvent pomper les atomes sur les niveaux 2p sur tout leur chemin; tout leur spectre subit le glissement de fréquence, de sorte que les absorptions ou amplifications de lumière ont la largeur des rougissemments, sont faibles, pratiquement inobservables.

- Dans une région "B", l'intensité à la fréquence Lyman est trop faible, en l'absence de rougissemment notable la raie Lyman α est totalement absorbée, les raies du gaz sont absorbées ou amplifiées.

Un rayon traversant une région "A" subit un fort rougissemment. L'application de la loi de Hubble accroît apparemment son chemin. Ainsi les régions A sont gonflées dans la direction de l'observation, leurs étoiles sont éloignées, la région paraît vide.

Dans le gaz froid d'une région "B", des raies d'absorption s'inscrivent dans les spectres continus.

Lorsque les rayons passent ensuite dans une région "A", ces raies arrêtent les rougissemments, la lumière passe dans une région "B" où les raies sont à nouveau écrites, de sorte que le processus recommence, avec une périodicité qui dépend de la distance de raies d'absorptions à la raie Lyman α . Cet effet est observé dans les spectres des quasars, où l'absorption due aux raies Lyman β et γ crée la périodicité de Karlsson (Karlsson K. G. 1971, Astron. Astrophys., 13, 333).

Une explication de la loi de Hubble peut être un effet CREIL dans de l'hydrogène atomique excité. L'hypothèse nécessaire d'une densité faible mais constante d'hydrogène atomique excité n'est sûrement pas vérifiée à proximité des astres brillants situés dans des régions où il existe des nuages d'hydrogène. Ainsi une représentation du ciel dans l'espace, sur laquelle les rayons issus de la Terre sont gradués en rougissemments, n'est pas une véritable carte en raison des distorsions dues à la présence de régions "A" anormalement gonflées radialement, de sorte qu'elles apparaissent vides. Une périodicité des régions vides a été observée par W. G. Tifft, ApJ.179, 29, 1973, redécouverte et précisée par B. N. G. Guthrie et W. M. Napier MNRAS 243, 431, 1990. Cette périodicité correspond à des rougissemments beaucoup plus faibles. Il semble que son mécanisme soit le même que le mécanisme des rougissemments des quasars, mais en remplaçant les raies d'absorptions de l'hydrogène atomique par des raies beaucoup plus proches de la raie Lyman alpha, peut-être des raies de l'hydrogène moléculaire.

Les récentes représentations des galaxies lointaines, étudiées par transformation de Fourier spatiale (J.G. Hartnett · K. Hirano, Astrophys Space Sci ; DOI 10.1007/s10509-008-9906-4) montrent qu'en

appliquant la loi de Hubble, la Terre est le centre de l'Univers. En effet des "vides" s'alignent sur des cercles dont la Terre est le centre.

Il est nécessaire de corriger les échelles radiales pour faire disparaître cette illusion. Il nous paraît clair que les vides correspondent à des régions riches en hydrogène atomique excité qui rougissent fortement la lumière sur de courtes distances, invalidant la loi de Hubble. Dans les directions d'observation, l'actuelle représentation des galaxies paraît semblable à une éponge cellulosique qu'il faudrait comprimer pour que ses vides disparaissent. Une méthode de dégonflage serait de réduire les coefficients de Fourier des développements radiaux pour s'approcher d'une isotropie.

L'"accélération anormale" des sondes Pioneer 10 et 11 apparaît où le vent solaire commence à se condenser en atomes d'hydrogène excité, au delà de 5 unités astronomiques. Dans cette région, le rougissement de la lumière émise par le Soleil fournit aux signaux radio une énergie qui accroît leur fréquence comme le ferait un effet Doppler. Cette amplification explique aussi que l'anisotropie du rayonnement thermique dit cosmologique est liée à l'écliptique.

Il est probable que les étonnants glissements de fréquence des raies d'émission du Soleil dans l'ultraviolet lointain résultent d'un effet CREIL dans les couches denses externes du Soleil (arxiv, physics, 0507141).

Il semble que la loi de Hubble résulte d'un transfert d'énergie des rayonnements stellaires vers les fréquences thermiques. Elle suppose ainsi une densité constante d'hydrogène atomique excité. Cette hypothèse n'est pas valable au voisinage des astres très chauds dont le rayonnement dissocie et excite l'hydrogène interstellaire et intergalactique.

Conclusion

A l'exception de la réfraction, les interactions cohérentes de la lumière avec la matière ne sont pas prises en compte en astrophysique alors que les vastes milieux gazeux intergalactiques sont propices à ces types d'interactions. Ces interactions bien connues des spécialistes des lasers donnent des interprétations élémentaires, sans nouvelle physique, de nombreux effets "anomalous", "peculiar", "puzzling". Les résultats actuels sont évidemment grossiers, mais une spectaculaire amélioration ne semble pas demander beaucoup de travail.