

L'étude multifréquentielle de l'émission non-thermique des étoiles massives

Michaël De Becker

Cet article vise à présenter un aperçu des résultats principaux d'une campagne de recherche dédiée à l'étude de l'émission non-thermique des étoiles massives. Le contexte de chacun des éléments intervenant dans cette étude y est brièvement introduit, afin de rendre accessible ses principales étapes. La nature multifréquentielle de cette campagne y est particulièrement mise en évidence, en insistant sur les principaux apports des différents domaines spectraux exploités.

Les étoiles massives :

Les étoiles massives (de types spectraux O et B), c'est à dire les étoiles dont la masse dépasse les 10 masses solaires environ, sont connues pour être à l'origine de la production de vents stellaires puissants alimentés par la pression de radiation, elle-même due à leur forte luminosité. Ces étoiles peuvent en effet s'avérer cent mille à un million de fois plus lumineuses que notre Soleil. Les vents stellaires font perdre à ces étoiles des quantités de matière énormes : l'équivalent de la masse du Soleil en 1 million d'années, voire même en quelques dizaines de milliers d'années. Cette perte de masse subie par les étoiles massives, aussi appelées étoiles chaudes, joue un rôle prépondérant dans leur évolution. Ainsi, on considère que les étoiles de type Wolf-Rayet sont des étoiles massives évoluées, ayant subi une perte de masse suffisamment importante et prolongée pour exhiber leurs couches internes, dont la composition est altérée par les réactions nucléaires qui ont lieu en leur sein. Ceci étant, nous pouvons distinguer essentiellement deux types d'étoiles chaudes. D'une part, les étoiles de type O et B, dont les abondances de surface ne sont pas caractéristiques des couches internes. D'autre part, les étoiles de type Wolf-Rayet, plus évoluées, dont les vents stellaires sont plus puissants que ceux des étoiles O et B.

Première étape de la traversée du spectre électromagnétique : le domaine radio

Les études observationnelles dans divers domaines du spectre électromagnétiques ont révélé que les étoiles massives pouvaient être des sources de rayonnement intenses, et pas seulement dans le domaine visible.

Dans le domaine radio, de nombreuses observations ont mis en évidence un rayonnement significatif en provenance d'étoiles chaudes. Cette émission a rapidement été identifiée comme étant due au rayonnement de freinage (ou *bremsstrahlung*) émis par les électrons accélérés dans le champ électrostatique des ions constitutifs du plasma des vents stellaires. Dans ce cas, c'est bien le vent stellaire qui est la source de rayonnement et non pas l'étoile elle-même. Une propriété fondamentale de l'émission radio produite selon ce mécanisme doit être mentionnée dès à présent : il s'agit d'une émission *thermique*, ce qui signifie que les électrons impliqués dans ce processus sont distribués en énergie selon la loi de Maxwell-Boltzmann.

Les caractéristiques de ce rayonnement de freinage sont bien connues depuis le courant des années 70. Le spectre radio obéit à une loi de puissance. Autrement dit, le flux émis à une fréquence donnée est proportionnel à la fréquence affectée d'un exposant appelé indice spectral⁽¹⁾. Dans le cas des vents stellaires des étoiles massives, il a été démontré que cet indice spectral était proche de 0.6. Les observations d'étoiles chaudes dans le domaine radio ont abondamment confirmé cette valeur.

Le flux radio émis par le vent stellaire d'une étoile massive dépend essentiellement du taux de perte de masse de l'étoile. La relation étroite entre ces deux quantités est à la base

d'une méthode couramment utilisée pour déterminer le taux de perte de masse des étoiles massives.

Toutefois, alors que les observations d'étoiles chaudes se multipliaient dans le domaine radio, il est apparu que certaines étoiles détectées en radio (environ 40%) présentaient des anomalies dans leur spectre radio: la principale étant un indice spectral nettement inférieur à 0.6, pouvant même être négatif, ce qui n'est en aucun cas compatible avec l'émission thermique décrite ci-dessus. Cette découverte n'a certes pas remis en question la théorie maintenant bien établie de l'émission radio thermique des vents stellaires, mais elle a révélé un fait nouveau : certaines étoiles massives, dans des conditions qui restaient encore à élucider, pouvaient émettre du rayonnement radio au travers d'un processus différent du *bremsstrahlung* des électrons thermiques du plasma du vent stellaire. Une explication n'a cependant pas tardé à être proposée au milieu des années 80 (White 1985) : ce spectre atypique serait symptomatique de *rayonnement synchrotron*. Ce type de rayonnement, qualifié de *rayonnement non-thermique*, est émis lorsque des électrons évoluant à des vitesses *relativistes*, c'est à dire proches de la vitesse de la lumière, subissent l'influence d'un *champ magnétique*. Cela amena les astrophysiciens à se poser de nouvelles questions : *Comment sont accélérés les électrons dans les vents stellaires ? Quelle est l'origine du champ magnétique des étoiles massives ?*

Comment sont accélérés les électrons dans les vents stellaires ?

L'existence de particules de très haute énergie, aussi appelées rayons cosmiques, a motivé les astrophysiciens à rechercher des mécanismes d'accélération capables de permettre à des particules (électrons, protons, ions...) d'atteindre des vitesses très élevées, parfois proches de la vitesse de la lumière. Ainsi, à la fin des années 70, des modèles ont été développés, envisageant l'accélération de particules en présence de chocs hydrodynamiques, par exemple ceux que l'on rencontre dans le cas des résidus de supernova. Ces modèles s'inspirent d'une idée proposée par Fermi dans les années 40, d'où le nom de mécanisme de Fermi attribué à ce modèle.

Dans le contexte de ce modèle, on considère que des particules, par exemple des électrons, bénéficient d'un gain d'énergie lorsqu'ils traversent le choc hydrodynamique. Il a aussi été démontré, également à la fin des années 70, que ces particules en accélération pouvaient interagir avec des phénomènes magnétohydrodynamiques complexes (turbulence magnétique, ondes de Alfvén...). En raison de cette interaction, les particules seraient alors diffusées de façon isotrope, avec pour conséquence une certaine probabilité de retraverser le choc dans l'autre sens. Le même processus peut alors se répéter à de multiples reprises, permettant à la particule de subir de nombreuses traversées, et ainsi de gagner de l'énergie à chaque passage. On obtient alors une population de particules relativistes distribuées en énergie selon une loi de puissance, caractérisée par un indice spectral donné⁽²⁾.

L'intérêt de ce mécanisme est qu'il est susceptible de s'appliquer partout où des chocs hydrodynamiques sont rencontrés : entre autres, dans le contexte des étoiles massives. En effet, les étoiles massives peuvent donner lieu à des chocs hydrodynamiques de deux types différents. D'une part, on sait que les vents stellaires d'étoiles isolées sont instables, et produisent des chocs intrinsèques entre parcelles de matière évoluant à des vitesses différentes en leur sein. Ces chocs sont notamment considérés comme étant responsables de l'émission X thermique des étoiles massives, au travers de l'échauffement du plasma causé par ces chocs (voir Encart 1). D'autre part, dans les systèmes binaires constitués d'étoiles massives, des

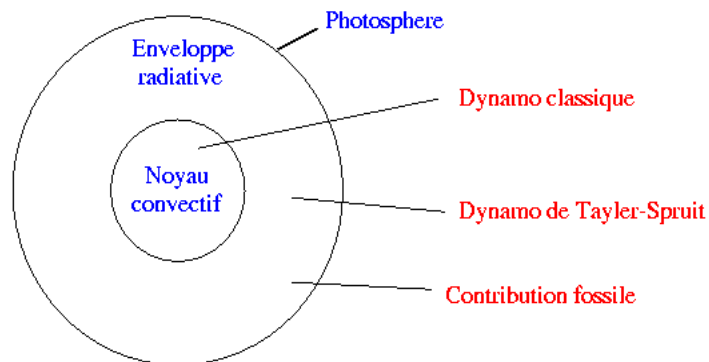
collisions peuvent se produire entre vents stellaires, donnant ainsi lieu à des chocs hydrodynamiques supplémentaires. Cela nous conduit donc à deux scénarios possibles : soit l'émission radio non-thermique peut s'expliquer par les chocs intrinsèques aux vents stellaires (le *scénario étoile isolée*), soit elle requiert l'interaction entre des vents stellaires (le *scénario système binaire*).

Pour élucider la question de la multiplicité des émetteurs radio non-thermiques, des campagnes d'observation intensives sont mises en œuvre. Celles-ci se font essentiellement dans le *domaine visible*, et surtout par des études spectroscopiques susceptibles de révéler la signature d'un mouvement orbital dans un système binaire⁽³⁾. Ainsi, il s'avère que sur 17 étoiles de type Wolf-Rayet émettrices non-thermiques dans le domaine radio, à ce jour 12 sont des binaires confirmées et 2 de plus sont candidates binaires. Les 3 dernières n'ont pas encore fait l'objet d'études de multiplicité satisfaisantes. Pour les étoiles de type O, 11 émetteurs radio non-thermiques sur 16 recensés sont des binaires supposées ou, pour la plupart, confirmées. *En conséquence, d'un point de vue observationnel, il semble que le scénario binaire soit le plus adapté pour expliquer l'émission non-thermique des étoiles massives* (De Becker 2005). Cette affirmation est renforcée par des résultats théoriques récents montrant que les étoiles isolées sont vraisemblablement incapables d'expliquer l'émission radio non-thermique telle que nous l'observons (Van Loo 2005).

Quelle est l'origine du champ magnétique des étoiles massives ?

Les astrophysiciens n'ont pas attendu de constater l'existence de rayonnement synchrotron dans le cas de quelques étoiles massives pour se pencher sur la question de leur champ magnétique. Toutefois, la découverte de ce témoin indirect de leur présence mérite une brève mise au point des mécanismes proposés pour le magnétisme des étoiles massives.

La structure interne des étoiles massives se résume essentiellement à deux composantes : le noyau convectif (turbulent) situé au centre, et la zone radiative (non-turbulente) entourant le noyau central. Essentiellement, on y distinguera trois mécanismes différents, agissant éventuellement de concert (voir l'illustration ci-contre).



Résumé des principaux mécanismes proposés pour expliquer la présence d'un champ magnétique associé aux étoiles massives.

également été proposés pour permettre à ce champ magnétique interne d'être détectable en surface. Essentiellement, il s'agit de l'action d'une circulation méridienne (Charbonneau & MacGregor 2001) et de mouvements verticaux de cellules de plasma engendrés par la poussée d'Archimède (MacGregor & Cassinelli 2003). Ensuite, un second type de dynamo, dite de Tayler-Spruit, alimentée cette fois par la rotation différentielle, pourrait agir dans la zone

radiative de l'étoile (Spruit 2002). Et enfin, il se peut qu'une fraction du champ magnétique stellaire soit originaire du nuage proto-stellaire (champ magnétique fossile, par ex. Moss 2003). A ce jour, la question de l'origine du champ magnétique des étoiles massives n'est pas encore totalement élucidée. Toutefois, des mesures réalisées par spectro-polarimétrie ont conduit récemment à des déterminations du champ magnétique de 3 étoiles O et B⁽⁴⁾. De nouveaux résultats de l'application de cette méthode sont attendus dans les années à venir.

Processus de rayonnement non-thermique :

Indépendamment du rayonnement synchrotron déjà découvert dans le domaine radio pour certaines étoiles, pouvons-nous envisager l'existence d'autres processus d'émission non-thermique ? La réponse est oui.

Tout d'abord, il faut savoir que le processus synchrotron pourrait produire du rayonnement non-thermique également dans le domaine des hautes énergies. Toutefois, cela nécessiterait une population d'électrons relativistes de très haute énergie et une intensité du champ magnétique très élevée, et ces conditions sont peu vraisemblablement satisfaites dans le cas des étoiles massives.

Ensuite, quand des électrons relativistes sont sous l'influence du champ électrostatique de particules chargées (protons ou ions), ils subissent une décélération accompagnée d'émission de rayonnement de haute énergie. C'est ce qu'on appelle du rayonnement de freinage, aussi appelé émission libre-libre⁽⁵⁾. Signalons dès à présent que ce mécanisme requiert des densités de milieu importantes qui ne sont probablement pas atteintes dans les vents stellaires des étoiles massives.

Enfin, lorsqu'un électron relativiste interagit avec un photon de basse énergie (visible ou ultra-violet), il peut transférer une partie de son énergie au photon, qui se verra déplacé jusqu'aux hautes énergies (rayons X ou rayons gamma). Ce processus est appelé diffusion Compton inverse, par opposition à la diffusion Compton où c'est un photon de haute énergie qui transfère une fraction de son énergie à un électron au repos. Ce processus est d'autant plus efficace qu'il dispose d'une grande abondance de photons de basse énergie, ce qui le rendra très efficace dans le cas des étoiles massives, étant donné qu'elles constituent des sources brillantes dans ces domaines d'énergie. Ce processus produira une composante de haute énergie en loi de puissance⁽⁶⁾.

Considérant tout ce qui précède, nous voyons donc qu'un schéma théorique général peut être proposé pour tenter de cerner la physique sous-jacente à l'émission non-thermique des étoiles massives (voir Figure 2, et De Becker 2005 pour de plus amples détails). En particulier, nous venons de voir que les conditions semblent réunies pour que des processus d'émission non-thermiques soient aussi actifs dans les hautes énergies. *Dès lors, nous pouvons éventuellement envisager l'existence d'une contrepartie de haute énergie à l'émission non-thermique déjà connue dans le domaine radio.* Pour explorer cette éventualité, nous allons devoir franchir une nouvelle étape dans notre traversée du spectre électromagnétique, et étudier dans un premier temps les *rayons X* émis par ces étoiles massives.

Les rayons X :

Si les étoiles massives présentent une émission non-thermique également dans le domaine X, celle-ci doit donc se manifester par une loi de puissance, en supplément de l'émission thermique bien connue de ces étoiles (voir Encart 1). Il est cependant clair que cette composante d'émission en loi de puissance ne sera détectable que si son intensité est suffisante pour ne pas être submergée par l'émission thermique.

Pour tenter de mettre en évidence cette émission non-thermique dans le domaine X, une série d'émetteurs radio non-thermiques ont été observés ces dernières années avec le satellite X européen XMM-Newton : 9Sgr (Rauw et al 2002), HD168112 (De Becker et al. 2004a), HD167971 (De Becker et al. 2005), Cyg OB2 #8A (De Becker et al. 2006) et Cyg OB2 #9 (Rauw et al. 2005). A ce jour, aucune de ces observations d'étoiles massives dans le domaine des X mous (entre 0.5 et 10.0 keV) n'a indubitablement révélé l'existence d'une telle composante d'émission en loi de puissance. Cela signifie-t-il qu'il n'y a pas d'émission non-thermique par diffusion Compton inverse produite par les électrons relativistes révélés par l'émission radio synchrotron? Pas forcément.

On constate en effet que ces émetteurs radio non-thermiques sont soit des binaires confirmées, soit des binaires supposées, et dans chaque cas la période orbitale

(connue ou estimée) est relativement longue (la plus courte est de 21 jours, les plus longues sont de quelques années). Dans de tels systèmes, les interactions des vents stellaires se produisent suffisamment loin des surfaces des étoiles pour que ces vents atteignent leur vitesse terminale, ou du moins une fraction importante de celle-ci. Les vitesses pré-choc sont donc relativement élevées. L'émission X thermique produite par la collision des vents (en plus de l'émission X intrinsèque de ces derniers) s'étend significativement dans tout le domaine de sensibilité des instruments de XMM-Newton. On parlera dès lors d'émission thermique *dure*. Dans le cas de ces systèmes, l'émission X apparaît comme étant de nature thermique dans tout le domaine s'étendant de 0.5 à 10 keV.

Par contre, l'observation avec XMM-Newton d'une binaire massive de courte période (environ 3.3 jours) révèle une émission thermique *molle*, donc peu intense dans la partie de plus haute énergie du spectre. D'autre part, le spectre X suggère la présence éventuelle d'une composante en loi de puissance en-dessous de 10 keV. Il s'agit de l'étoile nommée HD159176 (De Becker et al. 2004b). Si cette détection est réelle, il pourrait s'agir du premier

Encart 1 : L'émission X thermique des étoiles massives :

De manière générale, les *étoiles massives* sont des *émetteurs thermiques confirmés* dans le domaine X. Dans le cas des étoiles massives individuelles, les chocs intrinsèques aux vents stellaires sont responsables d'une élévation de la température du plasma post-choc jusqu'à des valeurs de quelques millions de K. De telles températures s'expliquent par la vitesse typique des chocs responsables de cet échauffement : quelques centaines de km/s. De tels plasmas sont responsables d'une émission thermique dans le domaine X. Celle-ci consiste en une émission continue libre-libre, à laquelle se superpose une série de raies spectrales produites entre autres par des ions d'éléments tels que l'oxygène, l'azote, le néon, le silicium, le magnésium, ou encore le fer.

Dans le cas des systèmes binaires composés d'étoiles massives, la collision des vents stellaires est responsable de chocs hydrodynamiques supplémentaires pour lesquels les températures post-choc peuvent être de l'ordre de quelques dizaines de millions de K. Les vents stellaires sont animés d'une vitesse faible près de la surface de l'étoile, et cette vitesse augmente alors que ces vents sont accélérés par la pression de radiation jusqu'à atteindre une valeur asymptotique appelée *vitesse terminale*. Les vitesses pré-choc peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 2000 km/s si les vents ont atteint leur vitesse terminale avant d'entrer en collision (systèmes de relativement longue période, à savoir plus de quelques semaines). La vitesse pré-choc sera nettement plus faible, éventuellement de l'ordre de 1000 km/s, si les vents n'ont pas encore atteint leur vitesse terminale lorsqu'ils interagissent (systèmes de relativement courte période, à savoir pas plus de quelques jours). La température post-choc qui résultera de ces chocs sera d'autant plus élevée que la vitesse pré-choc sera élevée. De plus, l'énergie atteinte par les photons X émis par ce plasma sera d'autant plus élevée que cette température post-choc sera élevée. On parlera alors d'émission thermique *dure* si elle est relativement intense dans les hautes énergies du spectre X, et d'émission thermique *molle* dans le cas contraire.

cas d'émission non-thermique rapportée pour une étoile massive dans le domaine des X mous. Ce résultat s'avère donc capital pour l'étude de l'émission non-thermique des étoiles massives, et c'est a priori d'autant plus surprenant que HD159176 n'est pas un émetteur non-thermique dans le domaine radio!

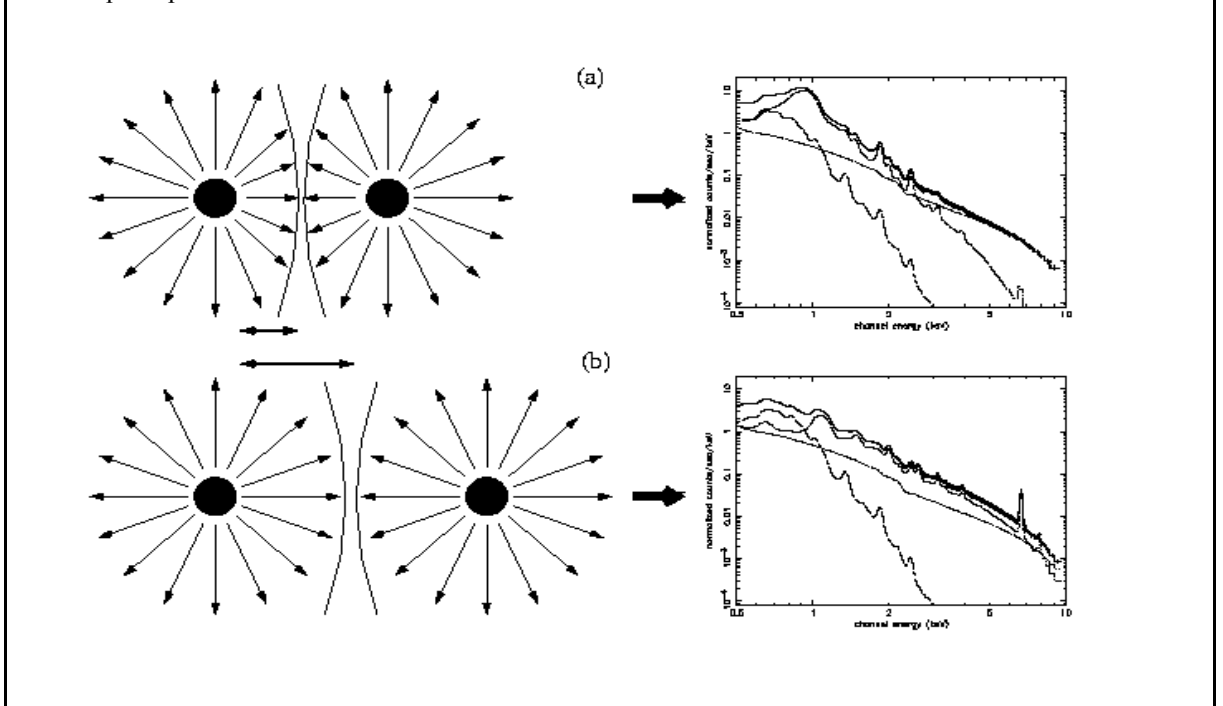
Encart 2 : Effet de la séparation sur l'émission X :

Les deux situations extrêmes sont représentées dans l'illustration ci-dessous. Dans les deux cas, la partie gauche de la figure illustre les deux étoiles du système binaire et leurs vents stellaires entrant en collision. A droite, un spectre X simulé est représenté tel qu'il serait observé par XMM-Newton entre 0.5 et 10 keV. Trois composantes d'émission sont représentées dans chaque cas : (1) une composante thermique de basse température (T_1 = quelques millions de degrés), caractéristique de l'émission X des vents d'étoiles isolées, (2) une composante thermique de plus haute température (T_2 = une dizaine de millions de degrés pour le cas (a), et T_2 = quelques dizaines de millions de degrés pour le cas (b)), (3) une composante en loi de puissance, représentant l'émission non-thermique produite par diffusion Compton inverse. Les doubles flèches désignent la séparation entre la surface de l'étoile et la zone de collision (CZ) : une plus grande distance permet aux vents d'atteindre une vitesse plus élevée. Par souci de simplicité, on considérera que les vents sont de force similaire, d'où la présence de la zone de collision à mi-chemin entre les deux étoiles.

Dans le cas (a), la période orbitale est au maximum de quelques jours, et les étoiles sont assez proches l'une de l'autre. En conséquence, les vents stellaires entrent en collision alors qu'ils n'ont pas encore atteint une vitesse élevée. Cela est illustré par les flèches plus courtes dans la partie gauche de la figure. Si la vitesse pré-choc est relativement faible, la température post-choc sera également faible. L'émission X thermique produite par la zone de collision sera donc relativement molle : c'est à dire qu'elle sera principalement de faible énergie dans le spectre X. La composante d'émission thermique chute donc rapidement quand on se déplace vers les plus hautes énergies. Cela a pour effet de révéler la composante d'émission non-thermique (NT) au-delà de 3 ou 4 keV.

Dans le cas (b), la période est d'au moins quelques semaines et la séparation est suffisante pour que les vents atteignent leur vitesse terminale avant d'entrer en collision. La température post-choc est donc plus élevée et l'émission X thermique sera plus dure (décroissance moins rapide de l'émission thermique quand l'énergie augmente). Cette émission thermique plus dure se traduit notamment par une raie très intense à environ 6.7 keV. Celle-ci est due au Fe, et est habituellement considérée comme caractéristique d'une émission thermique de haute température. Le spectre X simulé montre bien que dans ce cas il n'est pas envisageable de détecter la loi de puissance (NT), tant celle-ci est submergée par l'émission thermique (T_2) de haute température.

Cette discussion simplifiée tient essentiellement compte de l'effet de la séparation sur l'émission thermique de haute température produite par la zone de collision des vents. Il n'est pas tenu compte ici de l'effet de la séparation sur la composante d'émission non-thermique. La prise en compte de ce dernier effet requiert une connaissance des processus d'émission non-thermique dans les systèmes binaires massifs qui n'est pas encore acquise à ce jour. Toutefois, cette discussion fournit un cadre d'interprétation satisfaisant pour expliquer les résultats principaux des observations actuelles.



Vers un scénario général...

Pour réconcilier les résultats en apparence contradictoires obtenus pour différents types de systèmes binaires, émetteurs radio non-thermiques ou non, il est dès lors tentant de distinguer deux cas généraux (Encart 2) : les systèmes dits de *longue période*, et les systèmes dits de *courte période* (De Becker 2005).

Considérons les systèmes de *longue période*, à savoir ceux qui sont caractérisés par des périodes orbitales *supérieures à quelques semaines*. Dans ce cas, l'émission X thermique produite par la collision des vents est plutôt dure, ce qui réduit la probabilité de détecter une composante d'émission non-thermique éventuelle. De plus, cette émission non-thermique produite par diffusion Compton inverse requiert un flux UV relativement intense pour être significative. La zone de collision de vents (aussi région d'accélération des électrons relativistes) est assez éloignée des surfaces des étoiles (sources du rayonnement UV) dans ces systèmes de longue période, ce qui est défavorable à l'émission non-thermique en X. En revanche, dans le domaine radio, la grande séparation permet à une fraction significative du rayonnement synchrotron de s'échapper des vents stellaires combinés, et ces étoiles pourront apparaître comme des émetteurs non-thermiques dans le domaine radio.

A cette première catégorie, nous pourrions opposer la seconde, à savoir celle des binaires de *courte période*, donc caractérisées par des périodes de l'ordre de *quelques jours tout au plus*. Dans ce cas, la séparation est faible et les vents n'atteignent pas leur vitesse terminale avant d'entrer en collision. L'émission X thermique sera donc plutôt molle, ce qui permet éventuellement à une composante d'émission non-thermique d'être révélée dans la partie la plus dure du spectre X. De plus, la courte séparation est très favorable à la diffusion Compton inverse étant donné que la source de photons UV est très proche du site d'accélération des électrons (c'est-à-dire, la zone de collision des vents stellaires). Cette situation est donc plus favorable à la détection d'une émission non-thermique éventuelle dans le domaine X. Par contre, une composante d'émission radio synchrotron produite dans cette région de collision sera vraisemblablement très significativement absorbée par la matière des vents stellaire, étant donné que cette même région est profondément enfouie en leur sein. Ces systèmes de courte période n'apparaîtront donc pas comme étant des émetteurs radio non-thermiques.

L'opposition entre ces deux catégories conduit au corollaire suivant : *la détection simultanée de rayonnement non-thermique dans le domaine radio et celui des X mous (en-dessous de 10 keV) est peu probable. Une détection simultanée pourrait toutefois être possible si les hautes énergies sont explorées, là où l'émission thermique n'est plus gênante, à savoir au-delà de 10 keV*. Cette émission thermique chute en effet très rapidement lorsqu'on se déplace vers les plus hautes énergies. Par conséquent, des études dans les X durs (au-delà de 10 keV) et les rayons gamma s'imposent pour prolonger l'étude multifréquentielle de l'émission non-thermique des étoiles massives.

Dernière étape de la traversée du spectre électromagnétique : les très hautes énergies :

A ce jour, aucune émission non-thermique de haute énergie (au-delà de 10 keV) n'a pu être détectée pour un émetteur radio non-thermique de type O ou WR. De manière générale, les étoiles massives devraient au mieux être des sources faibles à de telles énergies. D'ailleurs, les tentatives de détection de composantes d'émission non-thermiques d'étoiles massives dans les X durs avec le satellite européen INTEGRAL se sont avérées infructueuses (De Becker 2005).

A l'avenir, des projets d'observatoires de haute énergie tels que NEXT (Japon) ou encore Symbol-X (France-Italie) devraient permettre d'explorer sérieusement le domaine des rayons X durs, jusque quelques dizaines de keV, et ainsi contraindre les propriétés de l'émission non-thermique de haute énergie des étoiles massives. De telles études devraient permettre de sonder la physique de l'accélération des particules dans les collisions de vents des binaires massives, ainsi que de contraindre l'intensité du champ magnétique local dans la région d'interaction des vents. La convergence du développement de nouveaux modèles théoriques et la mise en œuvre de moyens d'observation sans cesse plus performants devrait permettre de faire progresser notre connaissance de ces phénomènes complexes dans les années à venir...

Notes:

⁽¹⁾ La loi de puissance de l'émission radio est du type $S_\nu \propto \nu^\alpha$, où S_ν est la densité de flux à la fréquence ν et α est l'indice spectral.

⁽²⁾ La distribution des électrons relativistes en fonction de l'énergie est une loi de puissance du type $N(E) \propto E^{-n}$, où n est l'indice spectral de la loi de puissance, aussi appelé l'indice d'électrons lorsque les particules considérées sont des électrons relativistes.

Cet indice spectral est directement lié aux propriétés hydrodynamiques du choc responsable de l'accélération des particules : $n = (\chi + 2) / (\chi - 1)$. Dans cette relation, χ est le rapport de compression du choc, c'est à dire le rapport des densités dans les régions post-choc et pré-choc. Dans le cas des chocs dits forts, χ est égal à 4 et n vaut 2.

⁽³⁾ En spectroscopie, le mouvement orbital dans un système binaire peut être révélé par un déplacement Doppler périodique des raies spectrales associées aux deux étoiles du système, alors que celles-ci s'éloignent et se rapprochent alternativement de l'observateur.

⁽⁴⁾ Les étoiles massives dont le champ magnétique a été estimé sont β Cep, θ^1 Ori C et ζ Cas, avec des intensités respectives de 360 G (Donati et al. 2001), 1100 G (Donati et al. 2002) et 335 G (Neiner et al. 2003). Les erreurs relatives sur ces mesures sont l'ordre de 15 à 20%.

⁽⁵⁾ Il s'agit du même processus que celui qui est responsable de l'émission thermique dans le domaine radio, si ce n'est que dans le cas présent les électrons sont de très haute énergie, ce qui conduit les photons produits par ce mécanisme à atteindre les rayons X et les rayons gamma.

⁽⁶⁾ La diffusion Compton inverse produit également un spectre en loi de puissance du type $F(E) \propto E^{-\alpha}$, caractérisé par un indice spectral $\alpha = (n - 1)/2$. Cet indice spectral est donc directement relié à l'indice d'électrons de la population d'électrons relativistes. Dans le cas des chocs forts, on s'attend à un indice spectral égal à 0.5,

Références :

Charbonneau, P., MacGregor, K.B., 2001, Magnetic fields in massive stars: I. Dynamo models, *The Astrophysical Journal*, 559, 1094

De Becker, M., 2005, A multiwavelength observational study of the non-thermal emission from O-type stars, Thèse de doctorat, Université de Liège

De Becker, M., Rauw, G., Blomme, R., Pittard, J.M., Stevens, I.R., Runacres, M.C., 2005, An XMM-Newton observation of the multiple system HD167971 (O5-8V + O5-8V + (O8I)) and the young open cluster NGC6604, *Astronomy & Astrophysics*, 437, 1029

De Becker, M., Rauw, G., Blomme, R., Waldron, W.L., Sana, H., Pittard, J.M., Eenens, P., Stevens, I.R., Runacres, M.C., Van Loo, S., Pollock, A.M.T., 2004a, Quasi-simultaneous

- XMM-Newton and VLA observation of the non-thermal radio emitter HD168112 (O5.5III(f⁺)), *Astronomy & Astrophysics*, 420, 1061
- De Becker, M., Rauw, G., Pittard, J.M., Antokhin, I.I., Stevens, I.R., Gosset, E., Owocki, S.P., 2004b, An XMM-Newton observation of the massive binary HD159176, *Astronomy & Astrophysics*, 416, 221
- De Becker, M., Rauw, G., Sana, H., Pollock, A.M.T., Pittard, J.M., Blomme, R., Stevens, I.R., Van Loo, S., 2006, XMM-Newton observations of the massive colliding wind binary and non-thermal radio emitter Cyg OB2 #8A (O6If + O5.5III(f)), *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 371, 1280
- Donati, J.-F., Babel, J., Harries, T.J., Howarth, I.D., Petit, P., Semel, M., 2002, The magnetic field and wind confinement of θ^1 Orionis C, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 333, 55
- Donati, J.-F., Wade, G.A., Babel, J., Henrichs, H.F., de Jong, J.A., Harries, T.J., 2001, The magnetic field and wind confinement of β Cephei: new clues for interpreting the Be phenomenon?, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 326, 1265
- MacGregor, K.B., Cassinelli, J.P., 2003, Magnetic fields in massive stars. II. The buoyant rise of magnetic flux tubes through the radiative interior, *The Astrophysical Journal*, 586, 480
- Moss, D., 2003, The survival of fossil magnetic fields during pre-main sequence evolution, *Astronomy & Astrophysics*, 403, 693
- Neiner, C., Geers, V.C., Henrichs, H.F., Floquet, M., Frémat, Y., Hubert, A.-M., Preuss, O., Wiersema, K., 2003, Discovery of a magnetic field in the Slowly Pulsating B star ζ Cassiopeiae, *Astronomy & Astrophysics*, 406, 1019
- Rauw, G., Blomme, R., Waldron, W.L., Corcoran, M.F., Pittard, J.M., Pollock, A.M.T., Runacres, M.C., Sana, H., Stevens, I.R., Van Loo, S., 2002, A multi-wavelength investigation of the non-thermal radio emitting O-star 9 Sgr, *Astronomy & Astrophysics*, 394, 993
- Rauw, G., De Becker, M., Linder, N., 2005, XMM-Newton of the Cyg OB2 association, in *JENAM 2005: Massive Stars and High-Energy Emission in OB Associations*, Liège, eds. G. Rauw et al., 103
- Spruit, H.C., 2002, Dynamo action by differential rotation in a stably stratified stellar interior, *Astronomy & Astrophysics*, 381, 923
- Van Loo, S., 2005, Non-thermal radio emission from single stars, Thèse de doctorat, Katoliek Universiteit Leuven
- White, R.L., 1985, Synchrotron emission from chaotic stellar winds, *The Astrophysical Journal*, 289, 698