

Bras spiraux enveloppant des étoiles super-massives

**Par les Dr Alex Lobel et Ronny Blomme
(Observatoire Royal de Belgique)**

Une équipe d'astronomes de l'Observatoire Royal de Belgique (ORB) a découvert d'énormes ondes s'enroulant en forme de spirale autour d'une étoile parmi les plus lourdes et les plus chaudes de notre Galaxie. Depuis quelques dizaines d'années, déjà, les astrophysiciens soupçonnaient l'existence d'ondes de gaz autour de ce type d'étoiles. Mais, aujourd'hui, pour la première fois, à l'aide d'un nouveau superordinateur, les chercheurs de l'ORB ont entièrement simulé les caractéristiques de ces ondes singulières.

1. Étoiles bleues massives

Les étoiles sont les plus fortes sources d'énergie rayonnantes dans l'Univers. Par leur rayonnement, nous pouvons décoder la plupart des informations concernant l'Univers, et c'est aussi dans cet environnement des étoiles que des systèmes planétaires se forment. Au cours du demi-siècle passé, il est devenu évident pour les astronomes que les vents stellaires des étoiles jouent un rôle décisif dans certaines étapes de l'évolution de presque toutes les étoiles à un certain point de leur évolution. Le vent stellaire d'une étoile nourrit son entourage d'énergie et de nouvelles substances chimiques créées dans son intérieur. De plus, les vents stellaires forment beaucoup de structures qui sont visibles parmi le gaz interstellaire. Lors des premières et dernières étapes de l'évolution stellaire, l'interaction des étoiles avec leurs environnements – les substances dont elles sont issues, et qu'elles éjectent par la suite – est très importante. La perte de masse par les vents stellaires dicte les phases finales de l'évolution des étoiles de toute masse. Dans une étoile massive (d'environ quinze fois plus que la masse du Soleil) la perte de masse, diffusée par rayonnement, est assez grande pour réduire de manière significative la masse de l'étoile durant son existence, en modifiant, de ce fait, le cours des processus physiques internes. La détermination précise de son taux de perte de masse est donc cruciale



Figure 1 : Le satellite IUE © ESA

pour comprendre correctement l'évolution d'une étoile.

2. Perte de masse des étoiles massives

Depuis quelques années, on a découvert que les taux de perte de masse par les étoiles massives ont été surestimés considérablement et systématiquement. Ceci est dû au fait que leurs vents ne sont pas des pertes régulières de matériau stellaire, mais ils sont fréquemment composés de structures de gaz de densité et de vitesse complexes. De nombreuses observations montrent, à l'évidence, que les vents des étoiles massives chaudes ne sont pas réguliers, mais très structurés. Suite à la structure interne de ces vents, les taux de perte de masse changent continuellement, ce qui est important pour les calculs de l'évolution des étoiles et de notre Galaxie. Il est très important d'obtenir une meilleure compréhension des processus physiques qui causent ces structures dans les vents de ces étoiles massives.

La détermination précise de l'étendue de la structure de vent et de la perte de masse apparentée est, pour cette raison, d'un intérêt capital pour la compréhension de l'évolution des étoiles massives.

Le problème principal de la recherche concernant les étoiles massives chaudes est de trouver une explication pour la formation de la structure à grande échelle de ces vents. L'existence de ces structures est déduite des composantes d'absorption discrète (*Discrete Absorption Components* en anglais) qui apparaissent dans les profils des raies particulières du spectre ultraviolet (UV). Les astronomes appellent ces profils « P Cygni », parce que leur forme caractéristique de raie a été observée pour la première fois dans l'étoile P de la constellation du Cygne. Ces structures de vent à grande échelle sont formées par des zones interactives tournant autour de l'étoile. Au cours des trois dernières années, la recherche à l'ORB a partiellement expliqué les propriétés physiques de ces régions interactives tournantes, à partir, à la fois, d'observations et de calculs. Lors de cette recherche, nous avons développé des modèles tridimensionnels (3-D) qui montrent la structure interne du vent, à partir des calculs du passage 3-D de la lumière. La recherche s'est concentrée sur l'écriture d'un code d'ordinateur sophistiqué (dénommé Wind3D) pour calculer le transfert radiatif en trois dimensions dans des modèles détaillés de ces vents. Wind3D calcule l'influence de la structure interne du vent sur la forme des raies spectrales théoriques qui, ensuite, ont été comparées avec les composantes d'absorption discrète observées. Le code simule très précisément le passage de la lumière à travers les vents fortement dispersant de ces étoiles massives. Les calculs tiennent compte des

influences importantes des effets non-locaux sur l'équilibre thermodynamique de la formation des raies spectrales dans les vents étendus de ces étoiles superlumineuses (comme par exemple les profils P Cygni dans le spectre UV). Wind3D a été développé et intensivement testé à l'aide des modèles hydrodynamiques qui ont été calculés avec un autre code sophistiqué pour ordinateur parallèle, surnommé Zeus (voir en fin d'article).

Nos modèles récemment calculés ont, ainsi, pu prouver que des vents rapides (intenses) enlèvent en soufflant d'énormes quantités de gaz de ces étoiles chaudes et lourdes et les enroulent (en spirale) autour de l'équateur (comme le fil d'une bobine). Ces nouvelles modélisations représentent d'importantes nouvelles avancées pour résoudre l'énigme de la manière dont ces étoiles massives et fortement lumineuses parviennent à expulser autant de masse au cours de leur courte vie.

3. L'étoile HD 64760 dans la constellation de la Poupe

Nous avons examiné les raies spectrales d'une étoile massive – appelée HD 64760 – dans la constellation de la Poupe. Ses raies spectrales ont été observées en 1995 par un satellite scientifique (*l'International Ultraviolet Explorer – IUE*), avec une précision et une qualité exceptionnelle inégalées jusqu'à présent. Les figures 1 et 2 montrent le satellite IUE dans l'espace et entièrement monté dans la chambre propre du *Goddard Space Flight Center* (Maryland, États-Unis) avant son envoi vers Cap Canaveral pour son lancement par une fusée Delta au début de 1978. Le miroir de son télescope, de type Ritchey-Chrétien, a un diamètre de 0,45 mètre et il y avait à bord quatre caméras pour l'ultraviolet : une caméra primaire pour les ondes longues (175-330 nm), une caméra primaire pour les ondes courtes (115-197 nm), et une caméra de réserve pour chacune d'elles. IUE était un vaisseau spatial stabilisé par gyroscope qui pouvait positionner sa direction de pointage avec une précision meilleure que ± 1 seconde d'arc. Ses panneaux solaires fixes, s'étendant à l'opposé du corps du vaisseau spatial, ont été inclinés pour fournir une puissance optimale à l'instrument sur un grand éventail d'angles (par rapport du Soleil). Il a été placé sur une orbite géosynchrone, au-dessus de l'océan Atlantique. Jusqu'en octobre 1995, IUE était en opération continue, commandé quotidiennement pendant seize heures à partir d'un observatoire et d'une station au sol sur la côte Est américaine et les huit heures restantes par l'observatoire de l'ESA IUE, près de Madrid. Quoique sa méthode d'observation (la spectroscopie) n'ait pas été aisément compréhensible par le grand public, la mission d'IUE est l'un des plus grands exemples de succès de la science spatiale. À l'heure de son arrêt d'opération, en 1996, IUE était le

satellite au plus long exercice et le plus productif dans l'histoire de l'astronomie spatiale. Après plus de 18 ans, IUE fonctionnait toujours 24 heures sur 24, récoltant de nouvelles informations pour les astronomes. Les observations principales ont inclus celles de la comète de Halley pendant sa visite en 1986, les premières observations spatiales de l'événement d'une supernova visible à l'oeil nu, depuis 300 ans, dans la galaxie voisine LMC, en 1987, et le programme d'observation étendu de l'atmosphère de Jupiter, après l'impact de la comète Shoemaker-Levy, en 1994. Les astronomes continuent d'ailleurs toujours à travailler avec les importantes données maintenant stockées dans les archives définitives d'IUE.

Les spectres obtenus de HD 64760 comprennent plusieurs raies du type P Cygni. Dans ces raies, on observe des absorptions supplémentaires qui se déplacent épisodiquement et que les astronomes attribuent aux longues tresses de gaz s'échappant de la surface de l'étoile. Ce phénomène particulier a souvent été observé parmi les étoiles chaudes et lourdes. Bien qu'on ait pu observer des vagues semblables dans le système solaire, depuis les années soixante, les modèles théoriques étaient insuffisamment détaillés pour calculer correctement et expliquer entièrement les propriétés physiques de ces données spectrales. Nous avons pu réaliser une nouvelle avancée grâce à l'achat récent d'un superordinateur qui est utilisé, entre autres, pour les prévisions météorologiques de l'IRM, à Bruxelles, et sert aussi à l'Institut d'Aéronomie Spatiale et à l'Observatoire. Nous avons calculé un grand nombre de modèles 3-D compliqués de l'environnement de HD 64760, jusqu'à ce que nous ayons trouvé un accord parfait d'un des modèles avec les observations de l'IUE. Le meilleur modèle trouvé par l'ordinateur démontre quelque chose d'étonnant : cette étoile possède deux trainées de gaz se développant en spirale autour de son équateur, avec des dimensions, qui si elles étaient calculées pour le Soleil, atteindraient l'orbite de Mars. Une reproduction artistique des vagues en spirale autour HD 64760 est montré à la figure 3.



Figure 2 : Le satellite scientifique IUE au Goddard Space Flight Center Source photo : NASA – STScI



Figure 3 : Reproduction artistique des vagues en spirale autour de l'étoile massive HD 64760. © A. Lobel & R. Blomme

4. Modèle 3-D du vent stellaire

Le modèle trouvé par ordinateur pour HD 64760 démontre, en outre, que les bras spiraux si étendus consistent, en fait en l'augmentation de la densité du vent qui, bien plus rapide que la vitesse du son, s'échappe de cette lourde étoile. Ils naissent de deux taches claires de la surface de l'étoile qui tournent autour de son équateur. Nous avons récemment publié ces résultats dans *The Astrophysical Journal*, disponibles en ligne sur <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008ApJ...678..408L>. L'article fournit de nouvelles évidences que les composantes d'absorption discrète sont, en fait, des structures de la densité et de la vitesse de gaz se développant en spirale à grande échelle, dans le vent essentiellement équatorial de l'étoile. Un modèle hydrodynamique 3-D avec deux taches d'éclat et de taille inégaux de part et d'autre de l'étoile sur l'équateur, avec des angles d'ouverture d'un diamètre de $20 (\pm 5)$ et $30 (\pm 5)$ degrés, et qui sont respectivement 20 % (± 5) et 8 % (± 5) plus lumineuses que la surface stellaire, expliquent précisément les composantes d'absorption discrète observées.

La figure 4 montre la densité du gaz autour de l'étoile. Les deux vagues en spirale surgis-

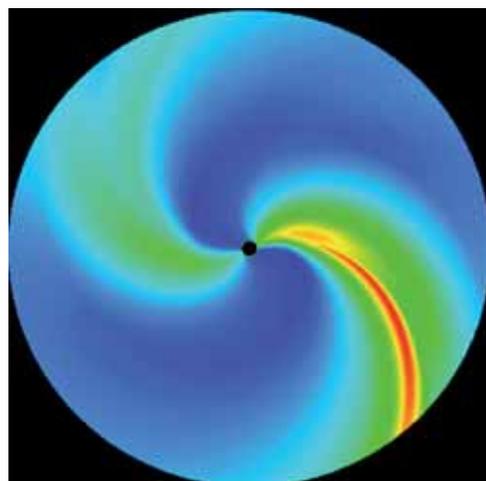


Figure 4 : La densité de gaz autour de HD 64760. Les couleurs sont artificielles. Le rouge et jaune pour une densité de gaz plus élevée que pour le vert et bleu. © A. Lobel & R. Blomme

sent des deux taches lumineuses inégales tournant à la surface de l'étoile dans le plan de l'équateur. Le vent de l'étoile ralentit à l'intérieur de ces bras spiraux (tournant dans le sens contraire des aiguilles d'une montre), où la variation de la densité est la plus grande (montré dans des couleurs vertes, jaunes, et rouges ; les couleurs sont artificielles et soulignent de petites différences de densité). Les particules de vent expulsées par l'étoile massive suivent des chemins radiaux presque rectilignes vers l'extérieur. Quand elles croisent les spirales radialement, les particules ralentissent temporairement et augmentent, de ce fait, la densité locale du vent. La masse supplémentaire apportée par les taches extérieures lumineuses crée deux bras en spirale stables par lesquels le vent rapide de l'étoile s'écoule (en bleu clair et bleu foncé). La forme des bras est comparable à celle du jet d'eau d'un arroseur de jardin rotatif.

5. Recherche future de HD 64760

Nous intensifions la recherche sur HD 64760 suivant la nouvelle percée. Un résultat principal, en ce qui concerne les taches claires équatoriales, est qu'elles tournent environ cinq fois plus lentement que la surface visuelle. Les ondes en spirale sont, à l'évidence, trop faibles pour intervenir sensiblement dans la perte de masse de l'étoile. La perte de masse, dans le modèle, cède moins de 1 % de la perte de masse dans un modèle de vent sans structure interne.

Il y a plusieurs explications quant à la formation des taches claires sur ces étoiles. Une explication considère des champs magnétiques très réguliers qui pourraient localement modifier l'éclat extérieur de l'étoile. Une autre possibilité serait que des ondes périodiques causeraient des pulsations non-radiales. Les ondes voyageraient à la circonférence de l'étoile et gagneraient en force quand elles se cognent à ces régions claires autour de l'équateur. Des observations visuelles obtenues récemment à l'ESO (le *European Southern Observatory* au Chili) de HD 64760 soutiennent le modèle des ondes qui se cognent. La future recherche consistera à établir des liens fermes entre la physique des atmosphères et la physique des environnements des étoiles les plus massives dans la Galaxie.

Articles scientifiques en anglais sur Internet :

<http://www.astro.oma.be/HOTSTAR/CIR/CIR.html>

<http://alobel.freeshell.org/hotstars.html>

Nous utilisons deux codes informatiques pour comprendre les caractéristiques physiques de la structure du vent des étoiles. Le premier code (Zeus) est utilisé pour déterminer la structure hydrodynamique du vent. Le second code (Wind3D) calcule le transfert radiatif et le spectre résultant, ainsi que la façon dont le spectre change au cours du temps. Ces deux codes ont été parallélisés sous OpenMP. En simulant un grand nombre de modèles et en les comparant avec les observations, nous pouvons déterminer le modèle le plus approprié.

Les codes informatiques sont exécutés sur un ordinateur SGI Altix 4700 (voir la photo des auteurs) partagé par l'Observatoire Royal de Belgique, l'Institut Royal Météorologique et l'Institut d'Aéronomie Spatiale. Cet ordinateur à haute performance a 192 cœurs. Il est équipé de processeurs Itanium 64-bit d'Intel à double cœur, cadencés à 1,67 GHz. Le total des 576 Go de mémoire est partagé par tous les processeurs, à travers une interconnexion NUMalink avec une bande passante de 6,4 Go/s. La machine est refroidie par une porte arrière à eau directement raccordée sur le système de réfrigération.

Le système d'exploitation est Novell SUSE Linux Enterprise 10. Parce que l'ordinateur est partagé entre des utilisateurs des trois institutions, un système de file d'attente en lots (*batch queue*) a été installé pour optimiser les temps de calcul. Outre les travaux décrits ici, la machine est également utilisée par l'Institut Royal Météorologique pour calculer les prévisions météorologiques sur un domaine limité à la Belgique.

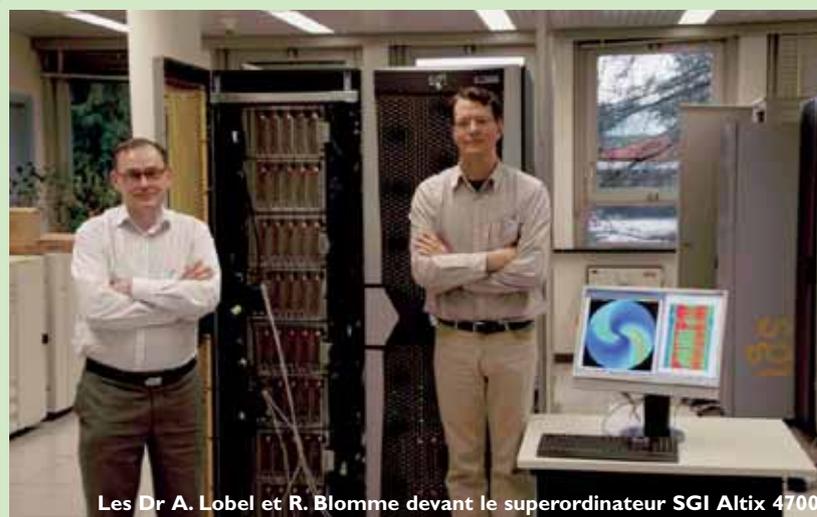
Même sur une machine de cette puissance, le temps de calcul d'un seul modèle atteint presque une journée. La partie hydrodynamique du calcul (en utilisant le code hydrodynamique Zeus) prend environ cinq heures, tournant sur quatre CPUs. Ce code résout les équations de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Nous avons modifié le code pour inclure la force due à la pression de rayonnement qui gouverne le vent stellaire de ces étoiles très lumineuses. Nous avons, en outre, ajouté une ou deux taches brillantes sur la surface stellaire, ce qui augmente localement cette force. Ces taches déterminent la structure à grande échelle dans le vent de l'étoile.

Le calcul du transfert radiatif prend davantage de temps, parce que la dimensionnalité du problème est grande. Les calculs doivent être effectués dans les cellules d'une grille en trois dimensions, dans laquelle les rayons de lumière sont suivis dans des directions différentes – ce qui prend deux dimensions supplémentaires – et à différentes longueurs d'onde (une dimension en plus). Un calcul typique du passage 3-D de lumière est effectué à $71 \times 71 \times 71$ points, avec 80×80 direc-

tions de rayonnement et 100 longueurs d'onde, ce qui dure six heures de temps effectif sur seize CPUs. Ensuite, un deuxième calcul doit être effectué sur une grille plus fine de $701 \times 701 \times 701$ points et dans 36 directions pour calculer le spectre et déterminer comment ce spectre change au cours du temps. Ce traitement prend six heures supplémentaires.

Remerciements

Nous remercions la Politique Scientifique Fédérale de Belgique pour le soutien accordé à cette recherche, entre décembre 2005 et décembre 2007, par le mandat de retour de A. Lobel à l'ORB. Nous remercions l'institution d'accueil, l'ORB, pour la mise à disposition de l'infrastructure informatique nécessaire à cette recherche. Nous remercions le Dr A. ud-Doula pour la mise à disposition de sa version du code Zeus.



Les Dr A. Lobel et R. Blomme devant le superordinateur SGI Altix 4700

Dr Alex Lobel

Licence en Physique (VUB, 89), Licence Spéciale en Informatique (VUB, 90), Doctorant de la *Netherlands Organization for International Cooperation au Space Research Organization of the Netherlands* à Utrecht (SRON, 90-93), Aspirant du Fonds de la Recherche Scientifique (VUB, 93-97), Docteur en Sciences (VUB, 97), *Post-Doctoral Research Assistant* à l'*Armagh Observatory*, Irlande du Nord (97-99), Astrophysicien (chercheur principal, bourse NASA) au *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* à Cambridge aux États-Unis (99-05), Chef de Travaux au département d'Astrophysique de l'ORB (décembre 05). Il étudie les environnements et les vents des étoiles massives moyennant l'hydrodynamique de rayonnement et la spectroscopie quantitative. Il a conduit des recherches scientifiques avec le télescope spatial Hubble à Harvard, et combine la recherche de l'astrophysique avec l'informatique.
Site internet : alobel.freeshell.org. **E-mail :** alobel@sdf.lonestar.org

Dr Ronny Blomme

Docteur en Sciences (VUB, 90), il a d'abord travaillé à la VUB, et par la suite au département d'Astrophysique de l'ORB. Il étudie la perte de masse des étoiles massives moyennant des observations, surtout aux longueurs d'onde radio en utilisant, entre autres, le *Very Large Array* à Socorro aux États-Unis, et le *Swedish ESO Submillimeter Telescope* à la Silla au Chili. Il développe aussi des modèles théoriques pour interpréter ces observations.
Site internet : www.astro.oma.be. **E-mail :** Ronny.Blomme@oma.be