

# Les mystères de Navi

Gregor Rauw & Yaël Nazé

---

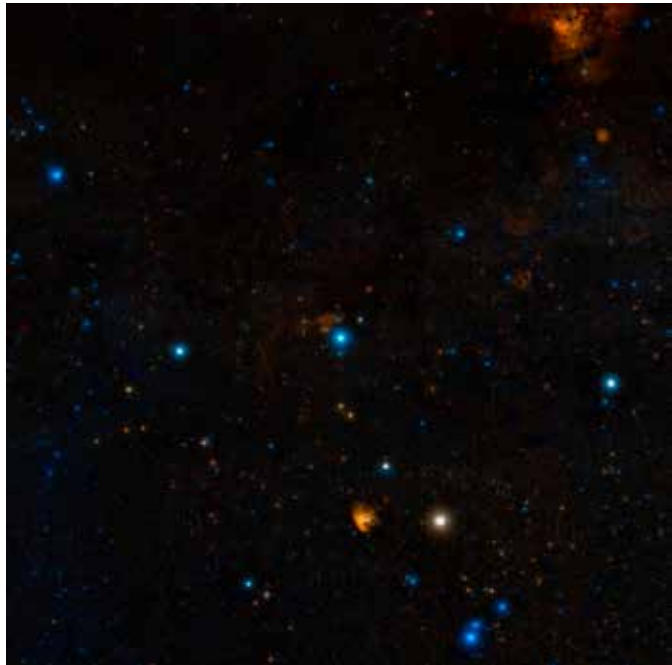
Parmi les 88 constellations du ciel, Cassiopée est particulièrement facile à reconnaître grâce à sa forme caractéristique qui rappelle la lettre W. L'étoile au milieu du W est connue par les astronomes sous le nom de  $\gamma$  Cassiopeiae ou  $\gamma$  Cas pour les intimes (Fig. 1). Son surnom « Navi » lui fut attribué par l'astronome américain Virgil Ivan « Gus » Grissom (1926 – 1967) qui utilisa son second prénom (Ivan) épelé à l'envers pour désigner cette étoile. En effet, en raison de sa facilité de repérage,  $\gamma$  Cas s'avérait particulièrement intéressante pour la navigation des vaisseaux spatiaux au début de l'ère des vols spatiaux habités.

Avec une magnitude visible proche de 2,5,  $\gamma$  Cas est la troisième étoile par ordre de brillance dans la constellation de Cassiopée. Dès lors, on pourrait supposer qu'un objet aussi brillant doit être parfaitement compris par les astrophysiciens. Hélas, il n'en est rien : à bien des égards,  $\gamma$  Cas cache bien son jeu sur sa véritable nature.

## Une étoile de type Be

Alors, commençons par le début... En 1867, l'astronome et prêtre jésuite Angelo Secchi (1818 – 1878), directeur de l'observatoire du Vatican, étudie la répartition

de l'énergie de la lumière en fonction de la longueur d'onde, ce qu'on appelle le spectre, de toute une série d'étoiles afin de rechercher des similitudes permettant de regrouper ces étoiles par classes. En observant  $\gamma$  Cas, Secchi découvre que le spectre de cette étoile est sillonné de raies brillantes, dites raies d'émission, de l'hydrogène, là où la plupart des étoiles affichent des raies sombres ou raies d'absorption.  $\gamma$  Cas devient ainsi le prototype d'une nouvelle catégorie d'étoiles que nous appelons aujourd'hui des étoiles Be classiques. Il s'agit d'étoiles jeunes de type B, c'est-à-dire d'objets massifs, relativement chauds (avec des températures de surface comprises

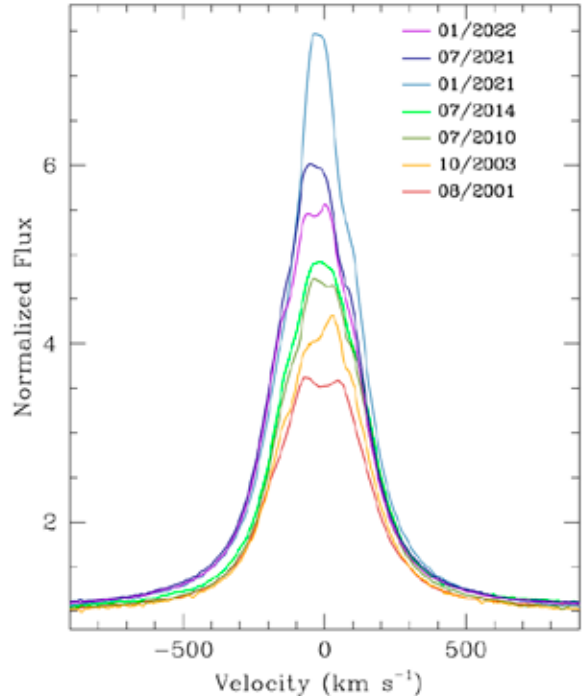


*Fig. 1 : Image sky-map.org de la constellation de Cassiopée.  $\gamma$  Cas est l'objet bleu au centre de l'image.*

entre 10 000 et 30 000 degrés), entourées d'un disque de matière dans lequel se forment les raies d'émission. Depuis l'époque de Secchi, les étoiles de type Be ont fait l'objet de très nombreuses études. C'est ainsi qu'on sait aujourd'hui, qu'environ 20% des étoiles de type B présentent des caractéristiques Be. Parmi les questions les plus débattues, il y a celle de l'origine du disque des Be. Contrairement aux disques d'accrétion qu'on trouve notamment autour de trous noirs ou encore autour d'étoiles en phase de formation, le disque des étoiles Be est un disque de décrétion, à savoir une structure alimentée en matière par l'étoile elle-même. Alors, comment l'étoile fait-elle pour éjecter cette matière? La rotation y est certainement pour quelque chose! En effet, les étoiles Be tournent à des vitesses vertigineuses, tellement vite que la force centrifuge à l'équateur les mène près de la limite de rupture. Prenons le cas de  $\gamma$  Cas : sa vitesse de rotation à l'équateur dépasse les 350 km/s. Mais est-ce pour autant suffisant pour créer un disque de décrétion? Pas vraiment. Il faut un ingrédient supplémentaire. Selon certains astronomes, cet ingrédient trouverait son origine dans des pulsations de l'étoile. Dans les régions équatoriales, ces pulsations donneraient le petit coup de pouce nécessaire pour que la matière atteigne la vitesse requise pour se détacher de l'étoile et se mettre en orbite autour de celle-ci. Mais le débat n'est pas clos pour autant, car si cela semble marcher pour expliquer des épisodes d'éjection de masse pour certaines étoiles Be, la situation paraît nettement moins claire pour d'autres. Qui plus est, certaines Be perdent leur disque à certains moments pour mieux le reconstruire quelques années plus tard. Ainsi,  $\gamma$  Cas elle-même a connu une époque

de variations spectaculaires dans les années 1930 – 1940 allant jusqu'à la disparition complète des raies d'émission en 1944, avant de reformer un disque dont la taille et la densité ont augmenté au fil du temps, culminant en un épisode d'émissions très intenses en 2020 – 2021 (Fig. 2). Le mécanisme d'éjection de matière des Be n'est donc nullement une opération one-shot, mais un phénomène qui peut se reproduire épisodiquement.

Une autre question épineuse concerne l'origine de la rotation rapide des étoiles Be. Est-elle acquise dès la formation de l'étoile ou est-elle le résultat de l'interaction avec une autre étoile? À l'heure actuelle, la balance semble plutôt pencher en faveur du deuxième scénario. En effet, de plus en plus d'études montrent que beaucoup d'étoiles Be vivent en couple avec une autre étoile, moins massive et nettement moins lumineuse. Cependant, cette compagne, actuellement si discrète, aurait en réalité été au départ l'étoile la plus massive



**Fig. 2** Illustration de variations de l'intensité et du profil de la raie d'émission  $H\alpha$  dans le spectre visible de  $\gamma$  Cas. L'étoile est passée par un maximum d'émission en janvier 2021.

du système. Arrivée au bout de ses réserves de combustible nucléaire, elle aurait gonflé au point que sa matière s'est approchée de sa compagne, l'actuelle étoile Be, qui en aurait alors accréte une bonne partie. Cette accréction n'entraîne pas seulement une inversion du rapport de masse, mais en raison de la vitesse de la matière qui tombe sur la future Be, elle lui communique une impulsion qui accélère la rotation de la Be jusqu'à l'amener tout près de la vitesse de rupture. Selon les modèles d'évolution stellaire, la compagne à l'origine de cette interaction deviendrait soit une sous-naine riche en hélium et très chaude, soit une naine blanche, ou encore, après une explosion de supernova, une étoile à neutrons. Dans tous les cas, cette compagne se trouve donc être un objet de moindre luminosité difficile à débusquer, telle que l'éclat de la Be domine la lumière émise par ce couple. Néanmoins, comme dans le cas des exoplanètes, les astronomes ont réussi à mettre en évidence la présence de compagnes autour de nombreuses étoiles Be car en réalité les deux étoiles tournent autour de leur centre de masse commun, donc la Be bouge un rien et ce mouvement peut être repéré. En général, cette technique ne nous apprend toutefois pas quelle est la nature (sous-naine chaude, naine blanche ou étoile à neutrons ?) de la compagne. Ainsi,  $\gamma$  Cas possède une compagne qui tourne autour d'elle en 203,5 jours. La masse probable de la compagne (autour de 1,1 masse solaire, alors que la Be a une masse de 16 masses solaires), est compatible avec les trois possibilités, même si celle de l'étoile à neutrons paraît moins probable dans ce cas précis.

### ***150 millions de degrés***

Toutefois, la principale énigme de  $\gamma$  Cas réside ailleurs. En effet, elle concerne son émission dans le domaine des rayons X qui se distingue nettement de celle des autres étoiles massives.

Pour comprendre, penchons-nous d'abord sur l'émission de rayons X par les étoiles massives « ordinaires ». Celle-ci a été observée pour la première fois en 1979 grâce

au satellite EINSTEIN. Elle prend son origine dans un gaz très chaud avec une température typique d'environ 7 millions de degrés. D'où vient ce gaz chaud, alors que la température de surface de l'étoile n'est « que » de 30 000 à 40 000 degrés ? Pour y répondre, il faut rappeler que les étoiles massives éjectent un vent stellaire dans toutes les directions. Ce vent, est environ un milliard de fois plus dense que le vent solaire, et atteint des vitesses de l'ordre de 2 000 km/s. Cependant, le vent peut subir toutes sortes de collisions, soit parce que des parcelles de gaz se déplaçant à des vitesses différentes se rencontrent, soit parce que le vent rencontre celui d'une autre étoile massive, soit encore parce qu'un champ magnétique dévie l'écoulement du vent vers l'équateur de l'étoile. Dans tous ces cas, il en résulte des chocs qui transforment une partie de l'énorme énergie cinétique du vent en chaleur, résultant donc en ces températures de plusieurs millions de degrés.

À côté de ce mécanisme basé sur le vent stellaire, on observe des émissions X très intenses dans ce qu'on appelle les binaires X massives. Ici, l'émission résulte d'une forme de cannibalisme stellaire où un cadavre stellaire très compact (étoile à neutrons ou trou noir) gravite autour d'une étoile massive et accrete de la matière de celle-ci. Ce faisant, cette matière dégage des quantités colossales d'énergie dont une très grosse partie est rayonnée sous forme de rayons X.

Alors qu'y-a-t-il de spécial avec  $\gamma$  Cas ? La particularité de cette étoile vient de ce que son émission X est beaucoup plus intense (typiquement 100 fois plus) que celle d'une étoile massive ordinaire, mais environ 100 fois moins intense que celle d'une binaire X massive. De plus, elle provient d'un gaz ultra chaud avec des températures de l'ordre de 150 millions de degrés ! Aucun vent stellaire, aussi puissant soit-il, ne dispose d'assez d'énergie cinétique pour rendre compte d'une telle température. Et il en va de même de la luminosité X qui dépasse de loin tout ce que l'on peut observer dans une étoile produisant son émission X via le vent stellaire. C'est d'ailleurs cette luminosité anormalement élevée qui a valu

à  $\gamma$  Cas d'être découverte comme source de rayons X dès 1976, soit trois ans plus tôt que les étoiles massives ordinaires. Pendant longtemps, on a cru qu'il s'agissait d'un cas isolé, en quelque sorte une fluctuation statistique parmi les binaires X massives. Mais là encore les propriétés observées ne cadrent pas avec cette interprétation. Ni le spectre en rayons X ni les variations temporelles ne correspondent aux caractéristiques des binaires X. Et puis, un autre problème de taille est venu s'ajouter. Grâce à des études de plus en plus affinées du ciel en rayons X avec les satellites Chandra (NASA), XMM-Newton (ESA), et tout récemment avec l'instrument allemand eROSITA sur le satellite russe SRG, le nombre d'étoiles présentant cette anomalie est passé à plus de 30. Autrement dit,  $\gamma$  Cas n'est pas seule, mais est en réalité le prototype (une fois encore !) d'une nouvelle classe d'objets. Avoir une binaire X massive aux propriétés anormales, on pourrait encore y croire, mais plus de 30, là ce n'est plus une fluctuation statistique, mais bien un phénomène nouveau !

Qu'est-ce qui se cache donc derrière cette émission X aux propriétés si étranges ? Quatre scénarios ont été élaborés par les astrophysiciens. Trois de ces quatre scénarios nécessitent l'action d'une compagne. Cela tombe bien, vu que nous avons indiqué plus haut que  $\gamma$  Cas en possède une, comme d'ailleurs beaucoup d'étoiles de type Be. Mais regardons cela de plus près.

Tout d'abord, il reste la possibilité de l'accrétion par une compagne étoile à neutrons. Comme indiqué plus haut l'émission de  $\gamma$  Cas ne cadre pas avec les propriétés des binaires X massives. Mais il y a peut-être une piste à creuser du côté de ce qu'on appelle en anglais les propellers (hélices). Il s'agit en fait d'étoiles à neutrons avec un champ magnétique très fort et en rotation rapide. Lorsque la matière accrétée arrive à proximité de l'étoile à neutrons, elle rebondit sur le champ magnétique et n'arrive donc pas jusqu'à la surface de l'étoile à neutrons. Du coup, cela réduit fortement l'émission X par rapport à une binaire X normale. Mais plusieurs problèmes se présentent : si la théorie de l'évolution des

binaires X prévoit en effet l'existence de la phase propeller, celle-ci doit être très brève, et on s'attend donc à observer peu d'objets dans cet état. Autrement dit, avoir une ou deux étoiles comme cela, pourquoi pas, mais plus de 30, là c'est incompatible avec la théorie. Un autre problème concerne la densité du gaz émetteur des rayons X. Afin d'expliquer les variations les plus rapides de l'émission X de  $\gamma$  Cas, qui ne durent que quelques secondes, il faut un gaz très dense, au moins 10 fois plus dense que ce qu'on trouverait près de la magnétosphère de l'étoile à neutrons.

Quid alors de remplacer l'étoile à neutrons par une naine blanche ? Ce deuxième scénario connaît pas mal de succès ces dernières années. En effet, il est possible de reproduire le spectre X assez fidèlement dans le cadre de cette hypothèse. Néanmoins, reste que pour expliquer la luminosité X observée, l'étoile Be devrait transférer beaucoup de matière à sa compagne. Un peu trop, probablement... Et puis, lors d'une campagne d'observations conjointes en rayons X et en UV, des astrophysiciens américains ont observé une corrélation étonnante entre les variations dans les deux domaines d'énergie. Sachant que l'émission UV est dominée par l'étoile Be, ce genre de corrélation plaide pour une source de rayons X très près de l'étoile Be. Or, dans  $\gamma$  Cas, la naine blanche, si tant est qu'il s'agisse bien d'une naine blanche, gravite à une distance de 37 fois le rayon de la Be autour de celle-ci. Pas vraiment ce qu'on pourrait qualifier de très près...

Le troisième scénario basé sur un rôle actif de la compagne postule quant à lui qu'elle est de type sous-naine chaude. Ce genre d'objet possède un vent stellaire, un peu comme les étoiles massives ordinaires. Ce vent pourrait alors impacter le disque de la Be donnant ainsi lieu à une émission X. Toutefois, comme indiqué plus haut, aucun vent stellaire n'a les propriétés requises pour chauffer le gaz à des températures de 150 millions de degrés. Et pire, en observant l'émission X de systèmes connus de binaires formées d'une Be et d'une sous naine, on n'y trouve pas l'émission caractéristique

téristique des étoiles de type  $\gamma$  Cas... Exit donc ce troisième scénario.

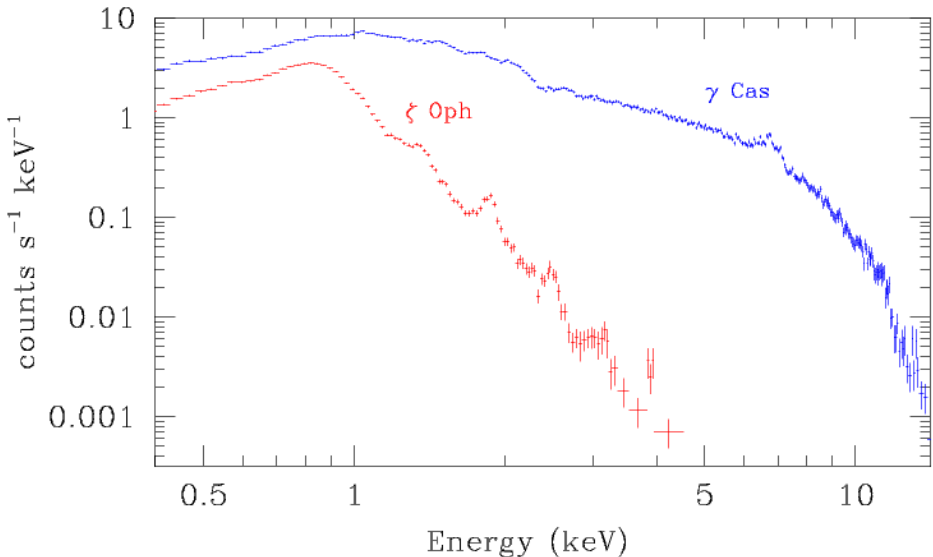
Quelle alternative reste-t-il alors ? La possibilité que la compagne n'y soit pour rien et que l'émission provienne en réalité de la Be. Le scénario qui a été élaboré suppose des interactions entre des champs magnétiques localisés à la surface de la Be et un champ magnétique généré dans son disque. En raison des différences de vitesses de rotation de l'étoile d'une part et du disque interne d'autre part, les lignes de force du champ magnétique se tordraient, donnant lieu à l'accélération de particules jusqu'à des vitesses énormes. Ces particules perdraient ensuite leur énergie sous forme de rayons X en percutant la surface de l'étoile Be. Ici les corrélations entre variations X et UV s'expliqueraient par la proximité de la source X à la surface de la Be, et les densités nécessaires pour expliquer les fluctuations rapides de l'émission X seraient celle de la matière à la surface de l'étoile Be. Donc problème résolu ? Pas tout à fait, car à ce jour ce scénario n'a pas encore pu être validé par des simulations numériques. Qui plus est, avec les moyens observationnels actuels, il est impos-

sible de détecter les hypothétiques champs magnétiques localisés.

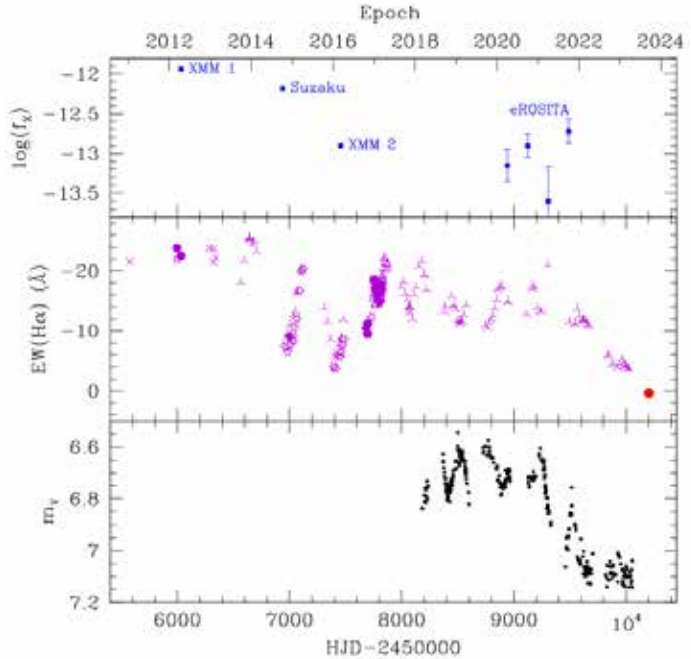
### ***Avis aux amateurs !***

Que faire alors pour percer ce secret ? Chercher des corrélations entre les propriétés du disque de la Be et le niveau de l'émission X. Ici, différentes étoiles de type  $\gamma$  Cas ont montré des comportements différents : dans un cas, la quasi-dissipation temporaire du disque a eu un effet d'atténuation très marqué sur l'émission X comme attendu pour les divers scénarios envisagés (Fig. 4). Toutefois, une

***Fig. 3 : Comparaison entre les spectres en rayons X de  $\gamma$  Cas et de  $\zeta$  Ophiuchi observés avec le satellite européen XMM-Newton. Alors que les deux objets ont des masses très similaires, leurs émissions en rayons X sont très différentes : la distribution d'énergie spectrale de  $\gamma$  Cas s'étend nettement plus vers les hautes énergies que celle de  $\zeta$  Oph, plus typique de la majorité des étoiles massives. Cette situation reflète l'énorme différence de température des gaz émetteurs dans les deux étoiles : environ 6 millions de degrés pour  $\zeta$  Oph et 150 millions de degrés pour  $\gamma$  Cas.***



**Fig. 4 : Comportement multi-longueurs d'onde de l'étoile PZ Gem en fonction du temps (exprimé en jours juliens sur l'échelle du bas et en années civiles sur l'échelle du haut). Le cadre du haut montre le flux en rayons X. Alors que les observations XMM1 et Suzaku révèlent un comportement de type  $\gamma$  Cas, les observations XMM2 et eROSITA indiquent un flux nettement plus bas. Le cadre du milieu indique l'intensité de la raie d'émission H $\alpha$  (comportant notamment des données prises par des astronomes amateurs), alors que le cadre du bas reprend des mesures de la magnitude de l'étoile (entièrement basées sur des mesures d'astronomes amateurs). La forte décroissance de la brillance et de l'émission H $\alpha$  indique que cette étoile a récemment perdu son disque.**



autre étoile n'a pour ainsi dire pas présenté la moindre déviation de son émission X en réponse à un événement similaire de dissipation du disque...

Même si la solution ne semble pas encore à portée de main, il faut persévérer dans les efforts observationnels afin de mieux comprendre et caractériser les propriétés multi-longueurs d'onde des  $\gamma$  Cas. Cela nécessite un suivi régulier de leur émission, offrant de la sorte une opportunité de science participative. En effet, dans ce genre d'études, les astronomes amateurs peuvent jouer un rôle crucial (Fig. 4). Les mieux équipés, qui disposent d'un spectromètre attaché à leurs télescopes, peuvent aider dans le suivi spectroscopique. De nombreuses étoiles Be sont d'ailleurs observées régulièrement par des spectroscopistes amateurs qui fournissent une aide précieuse aux astrophysiciens professionnels, notamment en déposant leurs observations sur

la base de données du BeSS<sup>1</sup>. Mais on peut aussi suivre les variations d'éclat d'une étoile de type  $\gamma$  Cas, ce qui constitue un excellent diagnostic des conditions dans les parties les plus internes du disque. Ici aussi les amateurs jouent un rôle crucial notamment en mettant leurs observations en commun et à disposition des professionnels via le site de l'AAVSO<sup>2</sup>. Dans ce cadre, nous avons collaboré avec des astronomes amateurs allemands, espagnols, ou encore australiens, mais... pas encore de Liégeois!

Quoi qu'il en soit, la prochaine fois que vous regarderez Cassiopee, songez à cette merveilleuse étoile de couleur bleutée sur laquelle il nous reste encore tant de choses à apprendre...

1 <http://basebe.obspm.fr/basebe/>

2 <https://www.aavso.org/>