

# Projet POLAR: Des observations astronomiques aux plasmas de laboratoire

É. FALIZE - C. BUSSCHAERT - N. CHARPENTIER - L. VAN BOX SOM / CEA – DAM Île-de-France

J.-M. BONNET-BIDAUD / CEA – Saclay

M. MOUCHET - C. MICHAUT / Laboratoire Univers et théories (LUTH), Observatoire de Paris

M. KOENIG - R. YURCHAK / Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI), Unité mixte de recherche 7605  
CNRS – CEA – École polytechnique – Université Pierre-et-Marie-Curie, Palaiseau

J. CROSS - G. GREGORI / Université d'Oxford

J. FOSTER - P. GRAHAM - C. DANSON / Atomic Weapons Establishment (AWE), Royaume-Uni

De la cosmologie à l'étude des processus d'accrétion dans des conditions extrêmes, les variables cataclysmiques jouent un rôle fondamental dans divers domaines de l'astrophysique. Ce type d'étoiles présente une physique où s'entremêlent phénomènes hydro-radiatifs et puissants champs magnétiques. En confrontant des simulations numériques à des données d'observation, de nombreuses incohérences sur la description physique de la zone émissive ont été mises en lumière. Cette zone étant inobservable directement avec les télescopes, une amélioration de sa modélisation semble difficile. Mais elle présente une propriété théorique remarquable : sa physique est invariante sous certaines lois d'échelle, ce qui permet d'avoir recours au principe de similitude. Il existe alors une configuration qui permet d'exploiter les lasers comme de véritables microscopes. Ils corrigent la myopie des télescopes et permettent de sonder la physique extrême. Dernière démonstration de cette nouvelle possibilité : la première expérience académique réalisée sur le laser ORION.

Les variables cataclysmiques (VCs) sont des systèmes binaire d'étoiles en interaction dans lesquels l'objet accrétant est une naine blanche et le compagnon une étoile de type M. La classe de VCs d'intérêt pour cette étude est celle où la naine blanche présente un puissant champ magnétique ( $B > 1\,000\text{ T}$ ) : ce sont les polars. Ce champ magnétique est tellement puissant qu'il modifie la dynamique de la matière accrétée et la conduit au niveau du pôle magnétique de la naine blanche en formant une colonne d'accrétion (figure 1). La compacité de la naine blanche implique que la matière tombe à des vitesses de l'ordre de  $5\,000\text{ km/s}$ . L'impact du plasma accrété sur la photosphère de la naine blanche mène à la formation d'un choc d'accrétion qui chauffe la matière à des températures de l'ordre de  $10$  à  $50\text{ keV}$ . Dans ce type de conditions extrêmes, le rayonnement modifie la structure et les propriétés physiques de la zone émissive. La structure et la dynamique de la zone entre le choc d'accrétion et la surface de la naine blanche ont été étudiées numériquement (voir film sur la page <http://irfu.cea.fr/polar>) [1]. C'est elle qui est la principale source du rayonnement de haute énergie observé. Deux résultats marquants ont été obtenus.

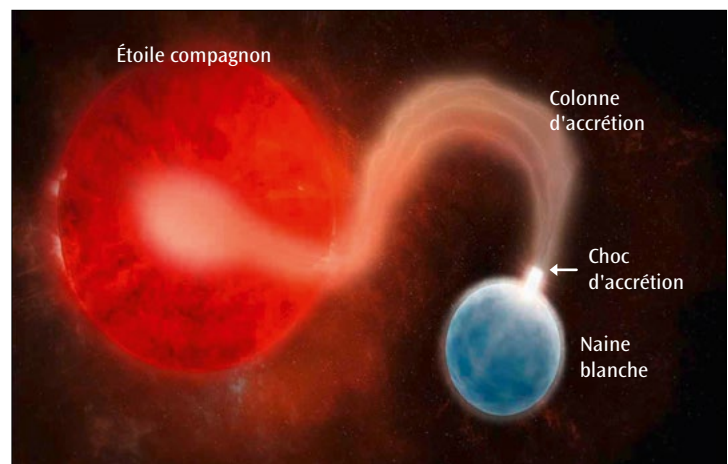
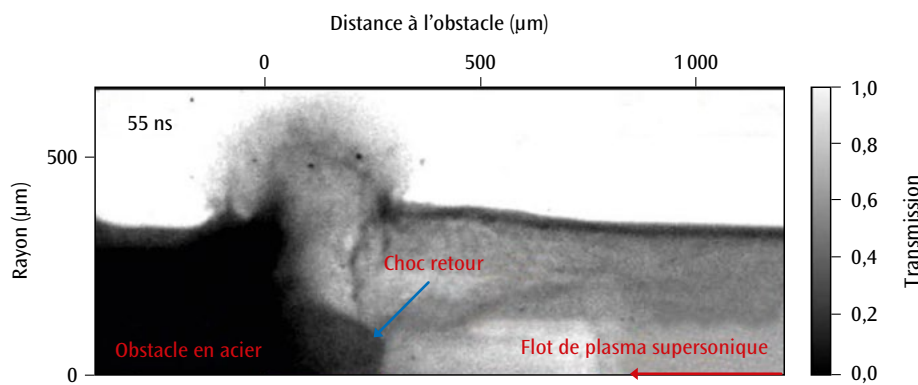


Figure 1.

Vue d'artiste d'une variable cataclysmique de type polar. Le champ magnétique de la naine blanche est si puissant qu'il amène la matière accrétée à son pôle magnétique sous la forme d'une colonne d'accrétion. Crédit : F. Durillon / CEA – Saclay

Tout d'abord, la mise en évidence claire du développement de deux instabilités radiatives qui permettent d'expliquer en apparence le phénomène d'oscillation du flux lumineux optique



**Figure 2.** Radiographie expérimentale X du choc retour obtenue sur le laser ORION (d'après [5]) à l'instant de 55 ns. Ce choc se forme après que le plasma supersonique soit entré en interaction avec l'obstacle en acier. Le tube utilisé pendant l'expérience avait un diamètre initial d'environ 400 µm (axe vertical) et une longueur de quelques millimètres (axe horizontal). Ce résultat expérimental confirme qu'il est possible de reproduire les phénomènes d'accrétion en laboratoire avec les lasers de puissance.

observé dans différents polars. D'autre part, les simulations prévoient une oscillation dans le domaine X avec une gamme de fréquences bien identifiée. Ces résultats ont été comparés aux données observationnelles provenant du satellite *XMM-Newton*. Celles-ci ont été réanalysées en détail pour chercher à mettre en évidence ces oscillations X [2]. Aucune oscillation dans le domaine X n'a été détectée. Une première explication possible est que la sensibilité du détecteur de *XMM* n'est pas adaptée pour capturer les fréquences prévues. La seconde est que le modèle standard de colonne d'accrétion couramment utilisé est incomplet. Seule la future génération de satellites X, beaucoup plus sensible, pourra donner de nouveaux éléments de réponse.

En attendant, une nouvelle voie d'exploration a été proposée. Celle-ci repose sur les propriétés d'invariance d'échelle de la zone émissive. Effectivement, il est possible de trouver un jeu de paramètres physiques qui permet de simuler le phénomène en laboratoire, à des échelles millimétriques, avec les lasers de puissance. Cette zone inobservable à l'échelle astrophysique devient mesurable en laboratoire. C'est l'objet du programme d'astrophysique de laboratoire, initié en 2008 : le projet POLAR [3]. Reproduire en laboratoire le régime physique de la zone émissive réclame de mettre suffisamment de matière à la vitesse de 300 km/s. Seule une installation de classe mégajoule est capable de produire la puissance nécessaire pour atteindre de tels régimes de vitesse. Des simulations numériques laser ont confirmé que ce régime était à portée avec cette classe de lasers. Avant d'envisager une telle expérience, il était nécessaire de valider le schéma de la cible sur des installations intermédiaires. La première démonstration a été réalisée

sur le LULI2000 [4], où les vitesses de 100 km/s ont été atteintes. Cette première expérience a permis d'accéder au laser ORION de l'AWE. C'est la première expérience académique réalisée sur ce laser nouvellement ouvert à la communauté scientifique. Il a permis de produire un nouveau régime de vitesse (180 km/s). En plus de caractériser expérimentalement la zone post-choc (densité, vitesse, température), cette expérience a permis de suivre l'évolution du choc d'accrétion grâce à des radiographies X (figure 2). L'ensemble des résultats de cette expérience a fait l'objet d'un article dans le journal *Nature Communications* [5].

Ces résultats ont permis de préparer au mieux l'étape ultime du projet, qui aura lieu sur le Laser Mégajoule. Celui-ci sera une pièce maîtresse du puzzle pour comprendre la physique des processus d'accrétion.

## Références

- [1] C. BUSSCHAERT *et al.*, "Quasi-periodic oscillations in accreting magnetic white dwarfs. II. The asset of numerical modelling for interpreting observations", *Astron. Astrophys.*, **579**, A25 (2015).
- [2] J.-M. BONNET-BIDAUD *et al.*, "Quasi-periodic oscillations in accreting magnetic white dwarfs. I. Observational constraints in X-ray and optical", *Astron. Astrophys.*, **579**, A24 (2015).
- [3] E. FALIZE *et al.*, "Analytical structure of steady radiative shocks in magnetic cataclysmic variables", *Astrophys. Spac. Sci.*, **322**, p. 71 (2009).
- [4] E. FALIZE *et al.*, "High-energy density laboratory astrophysics studies of accretion shocks in magnetic cataclysmic variables", *High Energy Dens. Phys.*, **8**, p. 1 (2012).
- [5] J. CROSS *et al.*, "Laboratory analogue of a supersonic accretion column in a binary star system", *Nat. Comm.*, **7**, 11899, (2016).