

Vers une caractérisation 3D des vestiges de supernovae en rayons X

Contact : fabio.acero@cea.fr; gabriel.pratt@cea.fr

Images et animations : www.github.com/facero/sujets2021

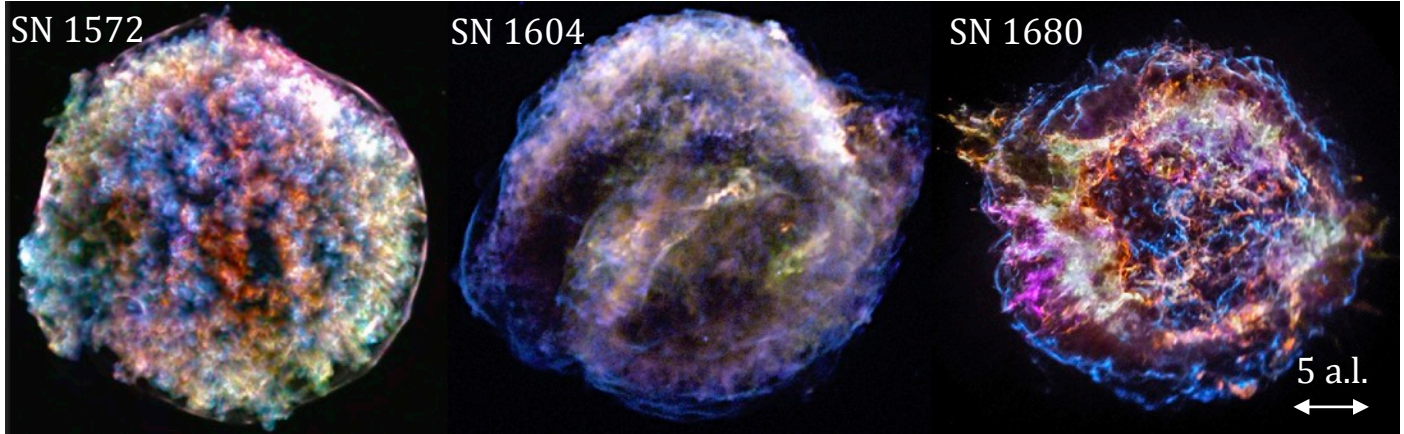


Figure 1: vestige de supernovae vue en rayons X par le satellite Chandra. La date à laquelle la supernova a été vue sur Terre est indiquée. Les couleurs rouge, orange, vert, jaune montrent la distribution des éléments lourds synthétisés lors de l'explosion (ejecta). Les filaments bleutés l'émission des particules accélérés par l'onde de choc se propageant à ~ 5000 km/s.

Contexte: Les simulations numériques d'explosions d'étoiles ont montré l'importance des instabilités hydrodynamiques dans les processus menant à la détonation. La cartographie tridimensionnelle de la matière éjectée dans le vestige de la supernova peut nous permettre de sonder ces instabilités et de mieux comprendre les mécanismes d'explosion. Nous proposons dans cette thèse d'étudier une population de vestiges de supernovae (exemples Fig. 1) en rayons X afin de contraindre la morphologie et la distribution en vitesse des éléments lourds synthétisés pendant l'explosion. Ces observations seront comparées aux simulations numériques afin de contraindre les mécanismes d'explosions encore mal compris à ce jour. Cependant les outils d'analyse de données actuels peinent à fournir cette cartographie 3D et de nouvelles méthodes seront développées dans cette thèse.

Méthode: Les caméras des satellites en rayons X sont des spectro-imageurs mesurant pour chaque photon sa position, son énergie et son temps d'arrivée fournissant des données multidimensionnelles (x, y, E, t ; voir Fig. 2). En dépit de cette grande richesse dans les données d'archives (satellite XMM-Newton et Chandra) et du bond en performance des missions à venir (satellite XRISM et Athena), nos méthodes d'analyses n'ont que trop peu évoluées dans les dernières décennies et ne peuvent extraire la richesse d'information scientifique contenue dans ces données. En effet les méthodes d'analyse actuelles se limitent à des analyses spectrales à 1D d'un côté et à des analyses spatiales 2D de l'autre et n'exploitent pas la nature multidimensionnelle des données. De plus, elles ne sont pas efficaces pour corriger des effets de projections géométriques et de séparer les différentes composantes physiques en présence.

Avec une forte implication de la communauté française, l'instrument X-IFU du satellite Athena combinera une haute résolution spectrale et spatiale et révolutionnera le domaine de la spectro-imagerie en rayons X.

Description du projet: Ce projet se propose de transformer la façon dont nous pouvons analyser les données en rayons X en se basant sur l'expertise acquise par le groupe de mathématiques appliquées au sein de notre laboratoire et en particulier sur les méthodes d'apprentissage à l'aveugle (blind source separation) initialement développées pour séparer les avant-plans du CMB dans les données Planck. Ces méthodes se basent sur la diversité spectrale et morphologique des données dans le domaine ondelettes pour séparer les sources. Actuellement une nouvelle version de cet algorithme est en cours de développement pour ajouter

des contraintes physiques spectrales (spectres thermiques ou loi de puissance par exemple) par le biais de machine learning (metric learning dans notre cas). Ceci ouvre alors la possibilité à une séparation de sources donnant des résultats plus robustes et de déconvoluer en même temps des effets de projection afin de pouvoir cartographier la matière éjectée dans les vestiges de supernova en trois dimensions en mesurant l'effet Doppler des raies émises par les éjectas.

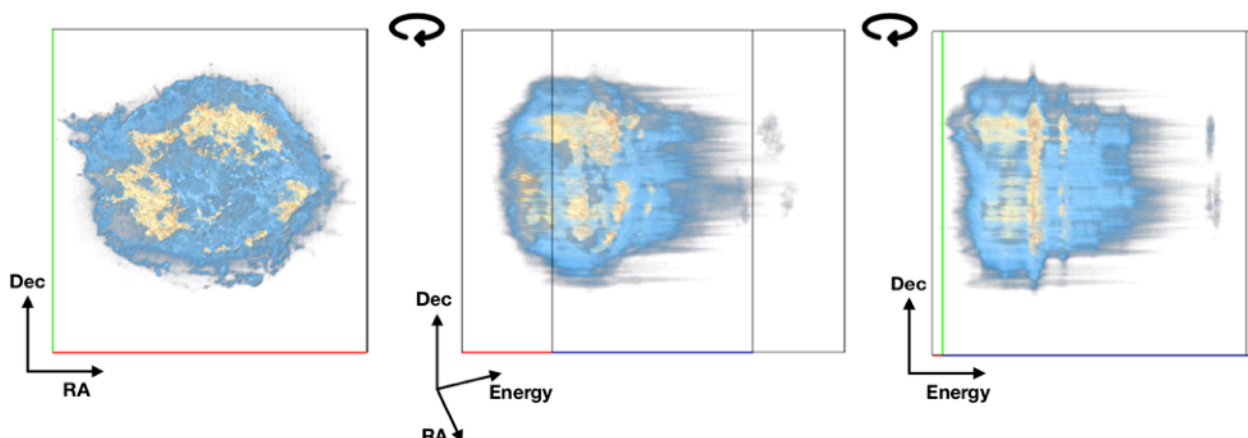


Figure 2: rendu volumétrique du cube de données en rayons X du vestige de supernova Cassiopeia A. L'image de face (gauche) montre la distribution spatiale des photons alors que l'image de côté (droite) montre leur distribution en énergie. Les nouveaux outils d'analyses proposés exploiteront la nature multidimensionnelle des données pour cartographier les paramètres physiques sous jacents.

Dans ce projet le/la candidat(e) utilisera ces nouveaux outils pour étudier quelles empreintes les mécanismes d'explosion de supernovae laissent dans leur vestiges. En effet les mécanismes des explosions de Type Ia ou d'effondrement gravitationnel sont encore mal connus mais comme chaque mécanisme laisse une empreinte spécifique dans les éjectas, l'étude de la morphologie en 3D des vestiges plusieurs centaines d'années après permet d'étudier l'explosion initiale.

D'un point de vue technique, le/la candidat(e) aura pour but de développer et d'appliquer ces techniques étape par étape à des données de complexité croissante en collaboration avec le groupe de mathématiques appliquées et le groupe rayons X. Dans un premier temps cette application se fera aux données d'archives de XMM-Newton et XRISM (spectroscopie X haute résolution; lancement en 2022). Ceci permettra de maximiser le retour scientifique des données d'archive et dans un second temps, à partir de simulations de vestiges de supernovae de simuler des observations Athena X-IFU à très haute résolution spectrale pour tester nos nouvelles méthodes. Ce projet contribuera à améliorer la contribution scientifique française à la mission Athena et en particulier au segment sol en développant de nouveaux outils d'analyse.

Travaux précédents: ce sujet fait suite à une première exploration de la méthode en rayons X sur des vestiges de supernovae (Picquenot et al., 2019) qui a produit la cartographie d'un vestige de supernova. Cette thèse se focalisera sur l'application de la méthode à une population d'objets ainsi qu'au aspects de reconstruction tri-dimensionnelles avec l'instrument à haute résolution spectrale X-IFU.

Références:

Novel method for component separation of extended sources in X-ray astronomy; [Picquenot, Acero, Bobin, Maggi, Ballet & Pratt, 2019](#).

Metric learning for semi-supervised source separation with spectral examples; [Bobin, Acero, Picquenot](#)

Mot clés: astronomie en rayons X, XMM-Newton, Athena, traitement du signal, blind source separation, machine learning, amas de galaxies, vestige de supernovae.