

# Multi-dimensional Simulations of Mixing in Classical Novae

Jordi Casanova Bustamante

Directores: Jordi José y Enrique García-Berro

El modelo del avalancha termonuclear presentado a principios de los años 70, es una teoría sólida que explica de forma razonada las explosiones de novae clásicas. No obstante, la teoría se basa en que ha de producirse un episodio de mezcla entre el material de la enana blanca y el material de las capas más internas de la envoltura. Para estudiar estos aspectos de la teoría se requieren estudios multidimensionales. En esta tesis hemos realizado simulaciones en dos y tres dimensiones de novae de CO para estudiar los mecanismos de mezcla que se producen en la interfaz del núcleo de la enana blanca y la envoltura, cómo se establece la convección y cómo se propaga la deflagración. Para ello se ha usado el código hidrodinámico FLASH.

Los resultados en 2 dimensiones muestran cómo se desarrolla la convección en las capas más internas y cómo se consigue transportar  $^{12}\text{C}$  desde el núcleo de la enana blanca a su envoltura mediante la formación de inestabilidades Kelvin-Helmholtz en la interfaz. De esta manera hemos conseguido reproducir correctamente la metalicidad observada en el material eyectado. No obstante, las simulaciones bidimensionales no pueden reproducir correctamente el perfil convectivo de un fluido debido a la conservación de la vorticidad y por ese motivo, se requieren cálculos tridimensionales. En la tesis se ha presentado por primera vez una simulación tridimensional de novae que consigue reproducir correctamente el comportamiento intermitente de la turbulencia. Estas simulaciones presentan una cascada de energía que fluye hacia escalas más pequeñas, como predice la teoría de Kolmogorov. La mezcla se produce a través de la estructura filamentosa originada por la aparición de inestabilidades Kelvin-Helmholtz muy vigorosas en la interfaz. Los resultados obtenidos son muy satisfactorios pues predicen una metalicidad en muy buen acuerdo con los valores observacionales. Este patrón convectivo también genera contrastes de densidad que dan lugar a una distribución inhomogénea en el patrón de abundancias químicas, en excelente acuerdo con las observaciones.

Los resultados presentados en esta tesis han supuesto un gran avance en el campo de las explosiones de novae y parte de los mismos han sido publicados en la prestigiosa revista *Nature*, como puede observarse en la lista de publicaciones. El trabajo resuelve el enigma del episodio de mezcla y de la distribución inhomogénea de las abundancias, que permanecían sin explicación desde hacía medio siglo. Los cálculos en tres dimensiones también marcan un punto de inflexión en el campo de la modelización de las explosiones estelares y de la astrofísica computacional, ya que los resultados demuestran que se precisa un tratamiento correcto de la convección y de la turbulencia para explicar las observaciones.

Los resultados presentados en la tesis doctoral se centran en el caso de novae de CO. En la actualidad tenemos en preparación un estudio adicional para analizar en detalle las propiedades hidrodinámicas de la simulación en tres dimensiones en el contexto de las novae. También hemos empezado un estudio multidimensional en el Barcelona Supercomputing Center, para extender por vez primera, los cálculos multidimensionales a otras clases de novae: novae de ONe, recurrentes y primordiales. Parte de estos estudios se centra en la descripción de la mezcla en función de la composición y masa de la enana blanca. También estamos extendiendo los cálculos a otros escenarios explosivos distintos, como por ejemplo, las explosiones de rayos X.

Lista de publicaciones derivadas de la tesis doctoral:

1. Casanova J., José J., García-Berro E., Calder A., & Shore S. N., 2010, On mixing at the core-envelope interface during classical nova outbursts, *A&A*, 513, L5
2. Casanova J., José J., García-Berro E., Calder A., & Shore S. N., 2011, Mixing in classical novae: a 2-D sensitivity study, *A&A*, 527, A5
3. Casanova J., José J., García-Berro E., Shore S. N., & Calder A., 2011, Kelvin-Helmholtz instabilities as the source of inhomogeneous mixing in nova explosions, *Nature*, 478, 490
4. Casanova J., José J., García-Berro E., Shore S. N., & Calder A., 2012, "Hydrodynamics in nova explosions". En preparación.
5. Casanova J., José J., García-Berro E., Calder A., & Shore S. N., 2012, "Two-dimensional simulations of mixing in ONe nova explosions". En preparación.
6. Casanova J., José J., García-Berro E., Calder A., & Shore S. N., 2012, "Multi-dimensional simulations of type I X-Ray bursts". En preparación.

Los resultados de la tesis doctoral también se han presentado en las siguientes conferencias:

1. Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII (2009),
2. Nuclei in the Cosmos XI (2010),
3. Nuclear Physics in Astrophysics V (2011)
4. Binary Paths to type Ia Supernova Explosions (2011).