

por debajo del cual no existe una solución estable para la envoltura con combustión estacionaria. En este momento de la evolución, que coincide aproximadamente con el máximo de temperatura efectiva, cesa la combustión termonuclear y la estrella se empieza a enfriar. Con los valores típicos encontrados para la luminosidad ( $\sim 4 \times 10^4 L_{\odot}$ ) y la masa de la envoltura ( $\sim 10^{-6} M_{\odot}$ ) para soluciones estables con combustión estacionaria de hidrógeno, la escala de tiempo nuclear durante el cual durará esta fase en las novae post-explosivas es de solamente unos meses o pocos años, explicando la no detección de emisión de rayos X blandos en la mayoría de las novae observadas por *ROSAT*.

Los resultados de los modelos de envoltura de enana blanca se han comparado con observaciones en rayos X de novae después de la explosión. En concreto, se han comparado los resultados teóricos con las observaciones realizadas por *ROSAT* de las tres novae que detectó dicho satélite con emisión de rayos X blandos: V1974 Cyg (Nova Cygni 1992), GQ Mus (Nova Muscae 1983) y Nova LMC 1995. A partir de esta comparación se obtienen límites para los valores de la masa de la enana blanca, la masa de la envoltura, y la abundancia de hidrógeno en la envoltura. El caso que permite un estudio más detallado es V1974 Cyg, observada por *ROSAT* en 16 ocasiones durante los dos años siguientes a la explosión. La evolución de los parámetros espectrales de la emisión de rayos X blandos de V1974 Cyg es compatible con la evolución indicada por los modelos de envoltura.

Sin embargo, el número de observaciones de novae realizadas por *ROSAT* es limitado. Con el fin de ampliar el número de observaciones en rayos X de novae después de la explosión, y con el principal objetivo de determinar las propiedades y la duración de la fase de combustión estacionaria de hidrógeno, se han realizado observaciones con el satélite europeo *XMM-Newton* de cinco novae galácticas (Nova Sco 1997, Nova Sco 1998, Nova Sgr 1998, Nova Oph 1998, Nova Mus 1998) entre dos y cuatro años después de la explosión. Cada fuente ha sido observada en tres ocasiones, con una observación cada seis meses. Cuatro de las cinco novae han sido detectadas por las cámaras EPIC a bordo de *XMM-Newton*, siendo las novae Sgr 1998 y Oph 1998 las fuentes más intensas. En los dos casos, el espectro de rayos X blandos indica que la combustión termonuclear en la envoltura de la enana blanca ya ha cesado. Los resultados más relevantes corresponden a la Nova Oph 1998 (V2487 Oph), para la que se ha detectado que el acrecimiento se ha restablecido en el sistema binario menos de 1000 días después de la explosión (Hernanz & Sala, 2002, *Sci*, 298, 393). Además, fue la primera nova detectada en rayos X también antes de la explosión, durante el *All Sky Survey* realizado por el satélite *ROSAT* en 1990. En el momento del descubrimiento de la nova ya se constató que la posición de ésta se encontraba dentro de la caja de error de *ROSAT*, pero con *XMM-Newton* hemos confirmado que la fuente detectada en 1990 y la Nova Oph 1998 son la misma fuente.

## THERMAL X-RAY EMISSION FROM YOUNG TYPE IA

### SUPERNOVA REMNANTS

Carles Badenes Montoliu

badenes@physics.rutgers.edu

Tesis doctoral dirigida por Eduardo Bravo Guil

Centro: Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) e Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC)

Fecha de lectura: 17 de julio de 2004

En esta tesis se estudia la relación entre las supernovas (SN) de Tipo Ia y la emisión en rayos X de los remanentes de supernova (SNR) jóvenes (con edades desde unos pocos centenares hasta varios miles de años) originados en explosiones de este tipo. El objetivo es utilizar las observaciones de SNRs con alta resolución espacial y espectral dis-

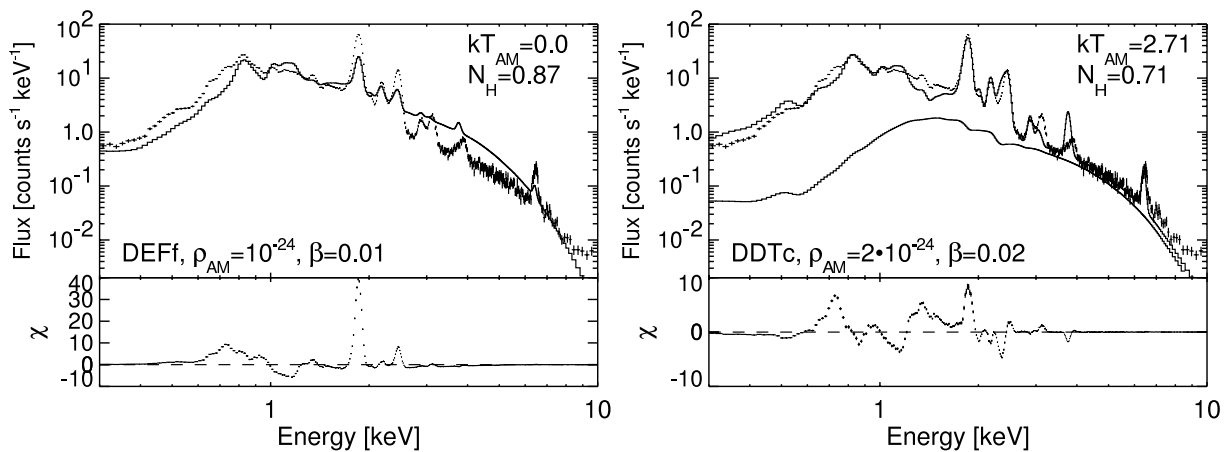
ponibles gracias a los observatorios *XMM-Newton* y *Chandra* para determinar los detalles de la física de estas explosiones. Actualmente, varios modelos o paradigmas de explosión son capaces de reproducir de forma aproximada las curvas de luz y espectros ópticos de las supernovas de Tipo Ia. La estructura (perfil de densidad y composición

química) del material expulsado por la supernova varía según la propagación del frente de combustión a través de la enana blanca, sea subsónica, supersónica o una combinación de ambas, resultando en explosiones de tipo deflagración, detonación retardada, detonación retardada pulsante o sub-Chandrasekhar.

Por otra parte, los remanentes de supernova se encuentran entre las fuentes difusas de rayos X más brillantes del cielo, y en muchos de ellos las líneas de emisión provenientes del material rico en metales expulsado por la supernova dominan el espectro (en la figura puede verse un ejemplo). Este hecho proporciona una oportunidad para estudiar la nucleosíntesis asociada con la supernova, siempre que se disponga de las herramientas adecuadas para extraer los parámetros físicos relevantes del SNR, a partir de las observaciones. Los modelos espectrales convencionales utilizados en el análisis de la mayoría de observaciones en la banda X no son adecuados para los SNRs jóvenes, porque contienen simplificaciones fundamentales (choques de geometría plana, plasmas de composición homogénea, etc.), que no son válidas en este caso. El plasma de los SNRs es calentado de forma prácticamente instantánea por las ondas de choque que se producen en el SNR, pero la baja densidad (comparable a la del medio interestelar) del material hace que la ionización de los metales se produzca lentamente, en escalas de tiempo comparables a la edad del SNR. Debido a esto, la emisión térmica en la banda X está íntimamente ligada a

los detalles de la estructura interna, composición e ionización del plasma. Para tratar este problema de forma autoconsistente, es necesario calcular la evolución hidrodinámica del SNR, así como la evolución temporal de la ionización del plasma y la emisión de rayos X asociada. Estos procesos vienen determinados fundamentalmente por el perfil de densidad y composición del material expulsado por la supernova y por la estructura del medio ambiente que rodea al sistema progenitor en el momento de la explosión.

Partiendo de varios ejemplos de cada uno de los paradigmas de explosiones de Tipo Ia, que se consideran viables en la actualidad, se ha elaborado una biblioteca de modelos de emisión X en SNRs jóvenes. La comparación de estos modelos con las observaciones elimina muchas de las ambigüedades inherentes al análisis espectral de SNRs basado en herramientas más simplificadas, y permite establecer una conexión directa entre el espectro X del SNR y la estructura del material expulsado por la supernova. Esta biblioteca de modelos se ha comparado con el espectro del remanente de la supernova de Tycho (SN 1572), con resultados prometedores. Aun teniendo en cuenta las complejidades de la comparación entre modelos y observaciones (muchas de ellas relacionadas con imperfecciones en los códigos espectrales necesarios para los cálculos), los resultados apuntan claramente a una explosión de tipo detonación retardada para la supernova de Tycho.



Los mejores modelos de tipo deflagración (izquierda) y detonación retardada, comparados con el espectro del SNR de Tycho observado por el satélite XMM-Newton (derecha).