

Classical Novae

Mauro Jélvez

1. Introducción: Contexto Histórico y Terminología

1.1. El Origen del Término "Nova"

El término "nova" tiene sus raíces en la observación histórica de Tycho Brahe, quien en 1572 documentó una "nueva estrella" en la constelación de Casiopea que alcanzó un brillo similar a Venus.

Título de su obra:

De nova et nullius aevi memoria prius visa stella
(Concerniente a la nueva estrella nunca antes vista en la vida o memoria de nadie)

Ironía histórica:

- La observación de Tycho resultó ser una **supernova**
- Hoy día, la astronomía distingue múltiples tipos de eventos explosivos:
 - Novas clásicas
 - Novas recurrentes
 - Supernovas
 - Kilonovas (fusiones de estrellas de neutrones)
 - Hipernovas (colapso de estrellas muy masivas)
 - Macronovas

1.2. Enfoque de este Documento

Alcance:

1. **Novas Clásicas (CNe):** Variables Cataclísmicas con explosiones termonucleares
2. **Novas Recurrentes (RNe):** Relacionadas con CVs, potencialmente importantes para SNe Ia
3. **Novas de Helio:** Caso especial con acreción de helio

2. Física de las Enanas Blancas: Degeneración Electrónica

2.1. El Acretor: Degeneración de Fermi

Las enanas blancas son objetos soportados por **presión de degeneración electrónica**, formando un gas de Fermi.

2.1.1. Principio de Exclusión de Pauli

Fundamento cuántico:

- Cada electrón debe tener un conjunto único de números cuánticos
- Existe una secuencia ordenada de niveles de energía
- Los electrones llenan estos niveles desde el más bajo hacia arriba

2.1.2. Gas Normal vs Gas Degenerado

Gas normal (baja densidad):

- Muchos niveles de energía libres disponibles
- Los electrones pueden ocupar estados de baja energía fácilmente
- Comportamiento clásico: $P \propto \rho T$

Gas degenerado (alta densidad):

- Todos los niveles de energía inferiores están ocupados
- Nuevos electrones deben ocupar niveles progresivamente más altos
- La presión depende solo de la densidad, no de la temperatura



Fig. 1.

2.1.3. Energía de Fermi

El nivel de energía máximo ocupado se denomina **energía de Fermi**:

$$E_F = \frac{(\hbar)^2}{2m_e} (3\pi^2)^{2/3} \left(\frac{N}{V} \right)^{2/3} \quad (1)$$

donde:

- $\hbar = h/2\pi$ (constante de Planck reducida)
- m_e = masa del electrón
- N/V = densidad numérica de electrones

2.1.4. Temperatura de Fermi

Definimos la temperatura característica asociada:

$$T_F = \frac{E_F}{k_B} \quad (2)$$

Condición de degeneración:

$$T < T_F \Rightarrow \text{gas degenerado} \quad (3)$$

$$T > T_F \Rightarrow \text{gas no degenerado (clásico)} \quad (4)$$

2.2. Ecuación de Estado

Gas ideal (no degenerado):

$$P \propto \frac{T}{V} \quad (5)$$

Consecuencia: El gas puede reaccionar a un aumento de temperatura mediante expansión.

Gas degenerado (no relativista):

$$P \propto V^{-5/3} \propto \rho^{5/3} \quad (6)$$

Consecuencia crítica: La presión es *independiente de la temperatura*. Esta propiedad es fundamental para el mecanismo de las novas.

3. El Camino hacia la Explosión Termonuclear

3.1. Acumulación de Material Acretado

3.1.1. Proceso Inicial

Acreción continua:

1. Material fluye desde la estrella compañera
2. Se acumula en la superficie de la enana blanca
3. Parte del material acretado se comprime a estado degenerado

Consecuencias de la compresión:

- Nuevos electrones deben ocupar niveles de energía más altos
- La energía del gas aumenta: $E_{\text{gas}} \uparrow$
- La temperatura del gas aumenta: $T_{\text{gas}} \uparrow$

3.1.2. Diferencia Crucial con Gas Normal

En un gas ideal:

$$P \propto \frac{T}{V} \Rightarrow \text{El gas puede expandirse al calentarse} \quad (7)$$

Esta expansión actúa como *válvula de seguridad*, permitiendo al gas enfriarse.

En gas degenerado:

$$P \propto V^{-5/3} \quad (\text{independiente de } T) \quad (8)$$

Implicación devastadora: Cuando $T_{\text{gas}} > T_{\text{ignición}}$, la degeneración previene la expansión de la envoltura. No existe válvula de seguridad.

3.2. Fuga Termonuclear (Thermonuclear Runaway - TNR)

3.2.1. Condiciones de Ignición

Temperatura de ignición:

$$T_{\text{ignición}} \sim 3 \times 10^7 \text{ K} \quad (9)$$

A esta temperatura se inicia el ciclo CNO caliente.

3.2.2. Escalas Temporales Competitivas

Durante el TNR: La temperatura continúa aumentando. En principio, eventualmente se alcanzaría:

$$T > T_F \Rightarrow \text{Se levanta la degeneración} \quad (10)$$

Esto permitiría que la envoltura se expanda (lentamente) y se enfríe.

El problema fundamental:

$$\tau_{\text{nuc}} \ll \tau_{\text{dyn}} \quad (11)$$

La escala temporal de las reacciones nucleares es *mucho menor* que la escala dinámica de expansión. La temperatura aumenta mucho más rápido que cualquier expansión controlada.

Resultado: Explosión termonuclear descontrolada.

4. Nucleosíntesis: El Ciclo CNO

4.1. Ciclo CNO en Estrellas Normales ("Ciclo Frío")

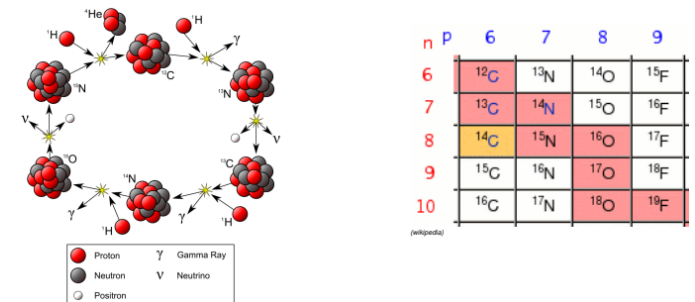


Fig. 2.

4.1.1. Ciclo Principal

Secuencia de reacciones:

$$^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma \quad (12)$$

$$^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e \quad (13)$$

$$^{15}\text{N} + p \rightarrow ^{12}\text{C} + \alpha \quad (14)$$

$$^{12}\text{C} + p \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma \quad (15)$$

$$^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e \quad (16)$$

$$^{13}\text{C} + p \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma \quad (17)$$

Balance energético:

$$E_{\text{total}} = 25.03 \text{ MeV} + 1.69 \text{ MeV}_\nu \quad (18)$$

4.1.2. Rama Secundaria

Secuencia (probabilidad 0.04%):

$$^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma \quad (19)$$

$$^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e \quad (20)$$

$$^{15}\text{N} + p \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma \quad (21)$$

$$^{16}\text{O} + p \rightarrow ^{17}\text{F} + \gamma \quad (22)$$

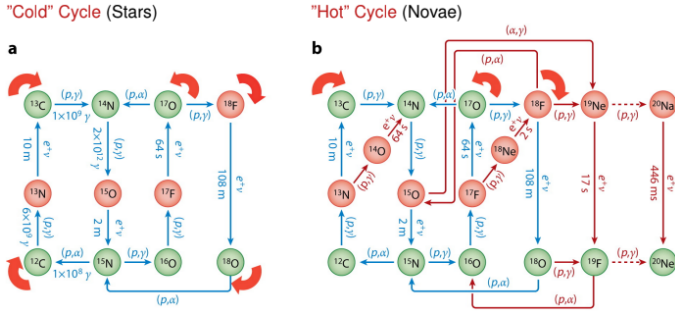
$$^{17}\text{F} \rightarrow ^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e \quad (23)$$

$$^{17}\text{O} + p \rightarrow ^{14}\text{N} + \alpha \quad (24)$$

Balance energético:

$$E_{\text{total}} = 24.74 \text{ MeV} + 1.98 \text{ MeV}_\nu \quad (25)$$

4.2. Ciclo CNO en Novas ("Ciclo Caliente")



Wiescher M, et al. 2010.
Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 60:381–404

Fig. 3.

4.2.1. Condiciones Extremas

Temperatura crítica:

$$T > 10^8 \text{ K} \quad (26)$$

Cambio fundamental: A estas temperaturas, la captura de protones ocurre *más frecuentemente* que el decaimiento β^+ .

4.2.2. Consecuencias del Ciclo Caliente

Operación fuera de equilibrio:

- El ciclo CNO opera fuera del equilibrio β
- Se produce acumulación de ciertos núcleos
- Enriquecimiento de elementos específicos

Elementos enriquecidos:

$$^{13}\text{N}, \ ^{14}\text{O}, \ ^{15}\text{O}, \ ^{17}\text{F}, \dots \quad (27)$$

Estos elementos son **marcadores observacionales** del ciclo CNO caliente y permiten identificar material procesado en explosiones de nova.

5. El Rol Crucial de la Convección

5.1. Inicio de la Convección

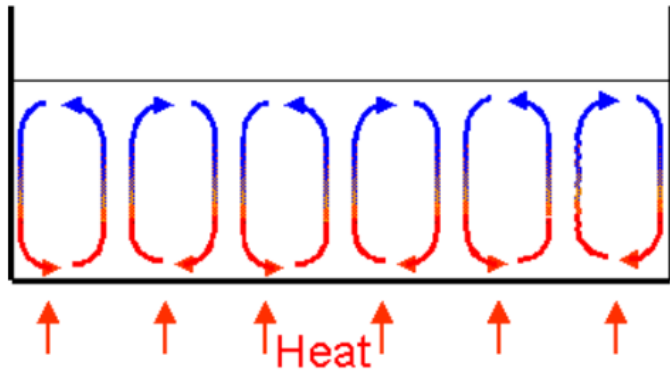


Fig. 4.

Temperatura crítica:

$$T \sim 8 \times 10^7 \text{ K} \quad (28)$$

A esta temperatura, la envoltura se vuelve *completamente convectiva*.

5.2. Transporte de Núcleos Inestables

5.2.1. Mecanismo

Proceso convectivo:

1. La convección transporta núcleos inestables β^+ desde la zona de quema
2. Los lleva hacia la envoltura exterior más fría
3. Condición temporal: $\tau_{\text{conv}} < \tau_{\beta^+}$
4. Los núcleos decaen en etapa posterior
5. Depositan su energía en la envoltura exterior

5.2.2. Importancia para la Eyección

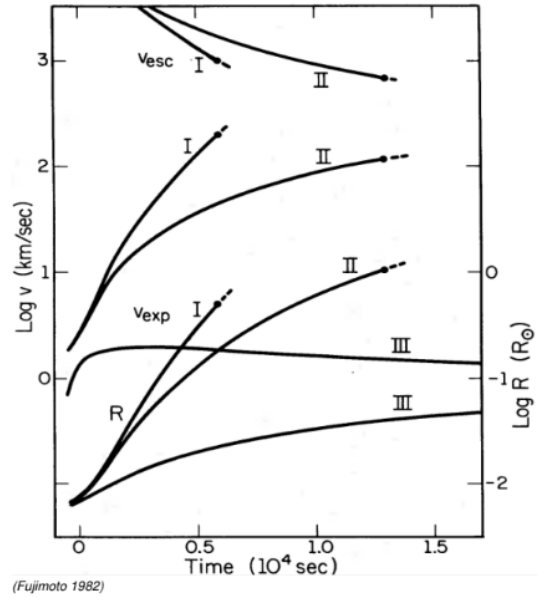


Fig. 5.

Resultados de modelos:

- Sin esta energía adicional: **no hay eyección**
- La mayoría de las novas requieren además material del núcleo de la WD
- Este material enriquece la eyecta con elementos pesados

Evidencia observacional: Las eyectas de novas muestran sobreabundancias de:

- CNO (del ciclo CNO caliente)
- Ne, Mg, Al (del núcleo de la WD)
- Metales pesados (procesamiento nuclear)

5.3. Límite Superior de Tasa de Acreción

Incluyendo otros efectos (como el calentamiento de la envoltura por la capa límite):

$$\dot{M}_1 \lesssim 10^{-9} - 10^{-8} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \quad (29)$$

Explicación física:

- Por encima de este límite: quema nuclear estable de M_{acc}
- El material se procesa tan rápido como llega
- No se acumula envoltura degenerada

- No hay explosión, sino acreción estacionaria

Dependencia de la estructura de la WD: Los detalles también dependen de la composición:

- WD CO (carbono-oxígeno)
- WD ONeMg (oxígeno-neón-magnesio)
- WD Fe (poco común)

6. Mecánica de la Eyección

6.1. Conversión de Energía

Proceso fundamental:

$$E_{\text{nuclear}} \rightarrow E_{\text{cinética}} \quad (30)$$

Condición de eyección:

$$v_{\text{env}} > v_{\text{esc}} \quad (31)$$

6.2. Presión en la Base de la Envoltura

La eyección depende principalmente de la presión en la base de la envoltura acretada:

$$P_b = \frac{GM_1 M_{\text{env}}}{R_1^2} \cdot \frac{1}{4\pi R_1^2} \quad (32)$$

6.2.1. Ejemplos Numéricos (Fujimoto 1982)

Caso I (WD de baja masa):

$$P_b = 4.46 \times 10^{19} \text{ N m}^{-2} \quad (33)$$

Caso II (WD intermedia):

$$P_b = 0.967 \times 10^{19} \text{ N m}^{-2} \quad (34)$$

Caso III (WD masiva):

$$P_b = 0.112 \times 10^{19} \text{ N m}^{-2} \quad (35)$$

6.3. Dependencia con la Masa de la WD

6.3.1. Masa Crítica de la Envoltura

Dado que P_b depende del producto $M_1 \times M_{\text{env}}$:

Enanas blancas más masivas necesitan menos masa acretada para la misma P_b :

$$M_{\text{env}} \approx 5 \times 10^{-3} M_{\odot} \quad \text{para } M_1 = 0.6 M_{\odot} \quad (36)$$

$$M_{\text{env}} \approx 3 \times 10^{-5} M_{\odot} \quad \text{para } M_1 = 1.3 M_{\odot} \quad (37)$$

Diferencia dramática: Una WD de $1.3 M_{\odot}$ necesita *más de 100 veces menos masa* que una de $0.6 M_{\odot}$.

6.3.2. Velocidad de Escape

Observación importante:

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM_1}{R}} \quad \text{disminuye al aumentar } R \quad (38)$$

Durante la explosión, a medida que la envoltura se expande, v_{esc} disminuye, facilitando la eyección.

7. Consecuencias Observacionales

7.1. Propiedades de WDs Masivas

Las enanas blancas de mayor masa exhiben explosiones con características distintivas:

1. Necesitan acretar menos masa para la erupción

$$M_{\text{env,crit}} \propto M_1^{-0.7} \quad (39)$$

2. Eyectan menos masa

$$M_{\text{ej}} < M_{\text{env}} \ll M_{\text{env}} (\text{WD de baja masa}) \quad (40)$$

3. Eyectan a velocidades más altas

$$v_{\text{ej}} \propto \sqrt{\frac{GM_1}{R_1}} \propto M_1 R_1^{-1/2} \quad (41)$$

7.2. Diferencia Fundamental con SNe Ia

Aspecto crítico: A diferencia de las supernovas tipo Ia, la explosión en novae clásicas **NO destruye el sistema binario**.

Evidencia observacional:

- Retter et al. (1998)
- Mason et al. (2021)
- Murphy-Glasyher et al. (2022)

Estas observaciones muestran que el proceso de acreción se restablece dentro de 1-2 años después de la erupción.

7.3. Naturaleza Recurrente

Implicación fundamental: Este es un **proceso recurrente**. El tiempo de recurrencia depende de M_1 (aunque no exclusivamente).

$$t_{\text{rec}} = \frac{M_{\text{env,crit}}}{\langle \dot{M}_1 \rangle} \quad (42)$$

Para WDs más masivas:

- $M_{\text{env,crit}} \downarrow$ (menor)
- $t_{\text{rec}} \downarrow$ (más corto)

8. Luminosidades en Novas

8.1. Luminosidad de Eddington

Definición: La luminosidad de Eddington es la luminosidad máxima en un estado de equilibrio entre presión de radiación y gravedad:

$$L_{\text{Edd}} \approx 1.3 \times 10^{38} \frac{M}{M_{\odot}} \text{ erg s}^{-1} \quad (43)$$

Para una enana blanca típica ($M = 1 M_{\odot}$):

$$L_{\text{Edd}} \approx 3.3 \times 10^4 L_{\odot} \quad (44)$$

8.2. Super-Eddington en Novas

Observación crucial (Selvelli & Gilmozzi 2019):

$L_{\text{max}} \geq L_{\text{Edd}}$ (45)

Las novas alcanzan luminosidades super-Eddington.

Implicación:

- Hay un empuje adicional por presión de radiación
- Este empuje ayuda a eyectar la envoltura
- La eyección no es solo hidrodinámica, sino también impulsada por radiación

9. Curvas de Luz y Clasificación

9.1. Amplitudes

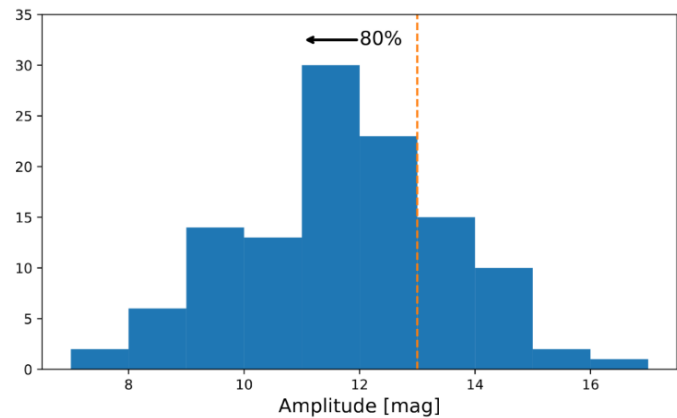


Fig. 6.

Definición de amplitud:

$\Delta m = m_{\text{post}} - m_{\text{max}}$ (46)

Problemas observacionales:

- Idealmente se usaría m_{pre} (magnitud pre-erupción), pero frecuentemente no está disponible
- Incertidumbre en m_{max} debido a falta de observaciones en el máximo
- Posible incompletitud para Δm grandes (si m_{post} es muy débil)

9.2. Parámetros Temporales

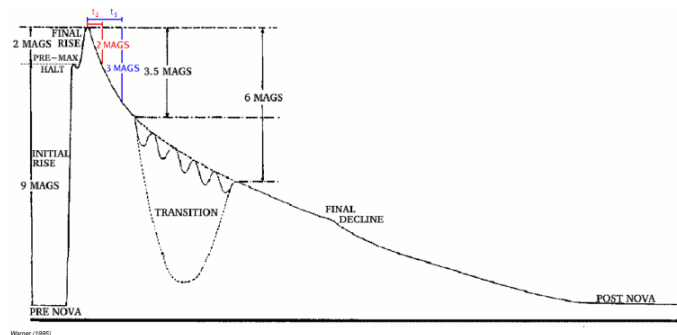


Fig. 7.

Según Warner (1995):

- t_2 : Tiempo en que $m(t_2) - m_{\text{max}} = 2$ mag
- t_3 : Tiempo en que $m(t_3) - m_{\text{max}} = 3$ mag

Relación empírica:

$t_3 \approx 2.75 t_2^{0.88}$ (47)

9.3. Clases de Velocidad

Según Bode & Evans (2008) y Hellier (2001), las novas se clasifican por su velocidad de decaimiento:

Clase	t_3 (días)	Características
Muy rápidas	< 10	Decaimiento muy abrupto
Rápidas	10 – 25	Decaimiento rápido típico
Moderadamente rápidas	25 – 80	Decaimiento intermedio
Lentas	80 – 150	Decaimiento gradual
Muy lentas	> 150	Decaimiento muy prolongado

Table 1. Clasificación de velocidad de novas

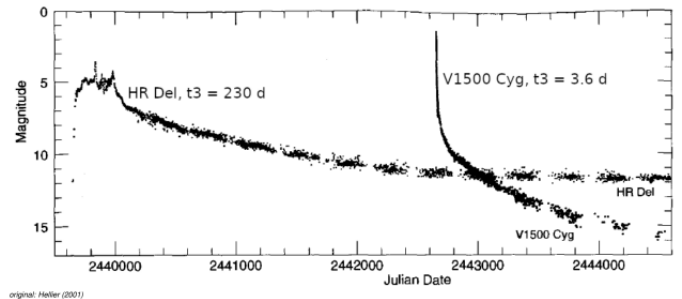


Fig. 8.

9.4. Morfologías de Curvas de Luz

Según Strope et al. (2009) y Tappert et al. (2020), las curvas de luz de novas muestran gran diversidad:

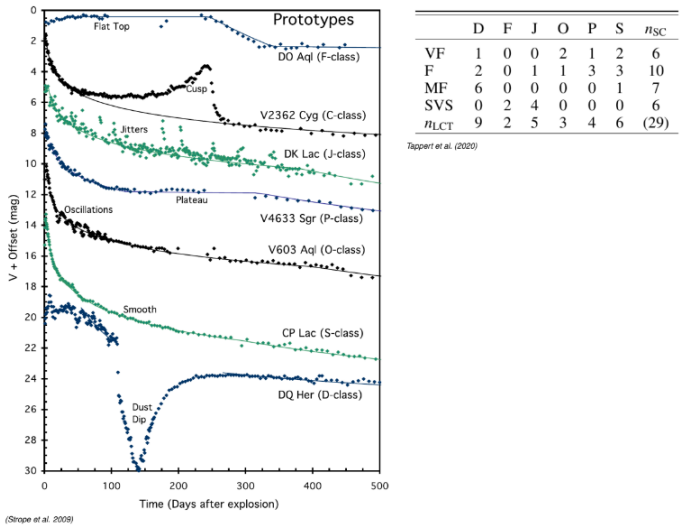


Fig. 9.

- **Tipo S (Smooth):** Decaimiento suave y monotónico
- **Tipo P (Plateau):** Meseta en el decaimiento

- **Tipo D (Dip):** Caídas profundas durante el decaimiento
- **Tipo O (Oscillations):** Oscilaciones durante el decaimiento
- **Tipo C (Cusp):** Pico secundario
- **Tipo J (Jitter):** Variaciones irregulares

10. Evolución Multifrecuencia

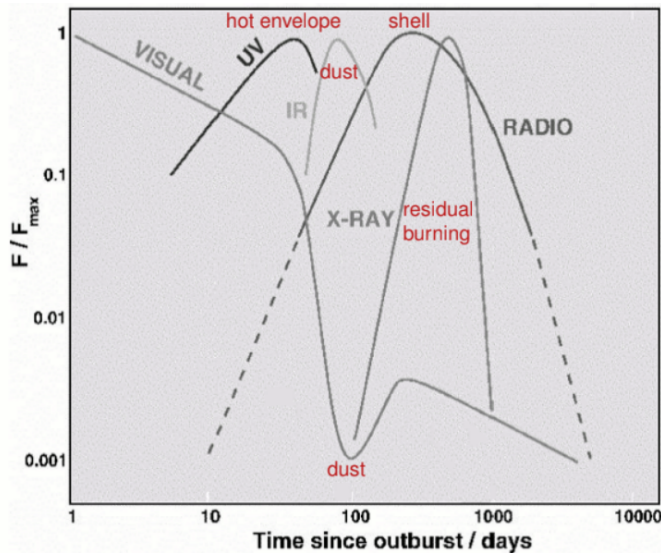


Fig. 10.

10.1. Comportamiento en Diferentes Longitudes de Onda

Según Bode (2002), la evolución de una nova muestra fases distintas en diferentes bandas espectrales:

10.1.1. Fase 1: Envoltura Caliente

Características:

- Inmediatamente después del máximo
- Envoltura ópticamente gruesa
- Temperatura superficial: $T \sim 10^4$ K
- Espectro dominado por continuo pseudo-fotosférico
- Máximo en óptico/UV

10.1.2. Fase 2: Formación de Polvo

Características:

- Ocurre en aproximadamente 30-100 días post-erupción
- No todas las novas forman polvo
- Temperatura del polvo: $T_{\text{dust}} \sim 1000 - 1500$ K
- Emisión infrarroja intensa
- Caída en la curva de luz óptica (polvo absorbe luz)

Mecanismo:

- Condensación de granos en la eyecta en enfriamiento
- Composición típica: carbono amorfo, silicatos
- El polvo reemite en infrarrojo la energía absorbida

10.1.3. Fase 3: Cascaron en Expansión

Características:

- Cascaron ópticamente delgado
- Espectro de líneas de emisión nebulares
- Observable en óptico, radio, rayos X
- Duración: años a décadas

10.1.4. Fase 4: Quema Residual

Características:

- Quema de H residual en la superficie de la WD
- Emisión en UV y rayos X suaves
- La WD caliente es visible directamente
- Duración: décadas hasta que la WD se enfría

11. Evolución Espectral

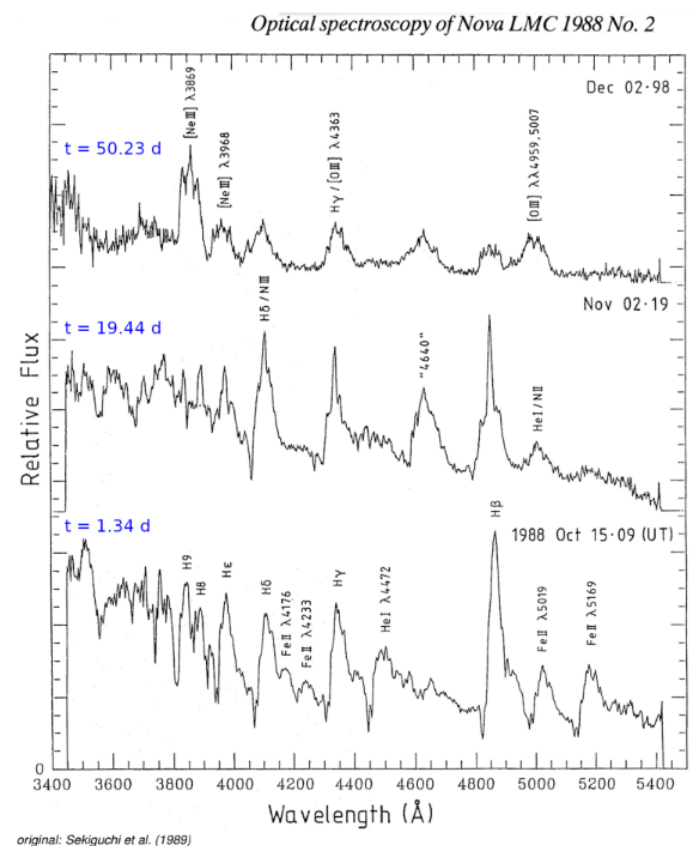


Fig. 11.

11.1. Secuencia de Espectros (Sekiguchi et al. 1989)

Las novas muestran una evolución espectral característica:

11.1.1. Espectro Principal (Principal Spectrum)

Primera fase espectral:

- Gran número de líneas de emisión de baja excitación
- Especies: H, CaII, NaI, FeII
- Perfiles P Cygni prominentes
- Líneas de absorción difusas, desplazadas al azul

11.1.2. Espectro de Orión (Orion Spectrum)

Fase intermedia:

- Similar al espectro de estrellas jóvenes OB
- Líneas de absorción de alta velocidad
- Líneas de emisión de alta excitación
- Especies: NII, NIII, mezcla de Bowen (OIII, NIII)

Mezcla de Bowen: Proceso de fluorescencia resonante:

HeII Ly α \rightarrow excitación OIII \rightarrow emisión NIII (48)

11.1.3. Espectro Nebular (Nebular Spectrum)

Fase tardía:

- Líneas estrechas, mezcladas, prohibidas
- Resultan en líneas amplias multi-componente
- No hay espectro de absorción
- Especies: [OIII], [NII], [NeIII], [FeX]

11.2. Perfiles P Cygni

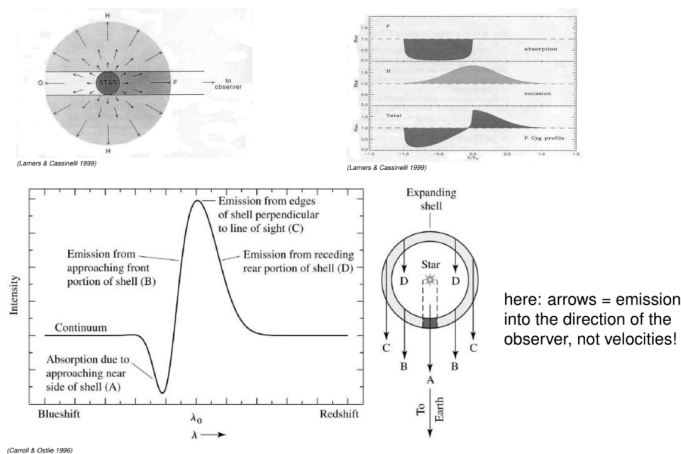


Fig. 12.

11.2.1. Origen del Perfil

Según Lamers & Cassinelli (1999) y Carroll & Ostlie (1996):

Componente de absorción:

- Gas en expansión entre la fuente y el observador
- Absorbe fotones desplazados al azul por efecto Doppler
- Velocidad típica: $v \sim 1000 - 3000$ km/s

Componente de emisión:

- Gas en toda la envoltura esférica en expansión
- Emite en todas las direcciones
- Perfil simétrico centrado en la longitud de onda de reposo

Perfil resultante:

- Emisión simétrica
- Absorción desplazada al azul
- Forma característica de "P"

11.2.2. Información Extraída

Del análisis de perfiles P Cygni se obtiene:

- Velocidad de expansión: v_{exp} del borde azul de la absorción
- Geometría de la eyección
- Opacidad del gas en expansión
- Masa y densidad de la eyecta (mediante modelado)

12. Novas Extragalácticas

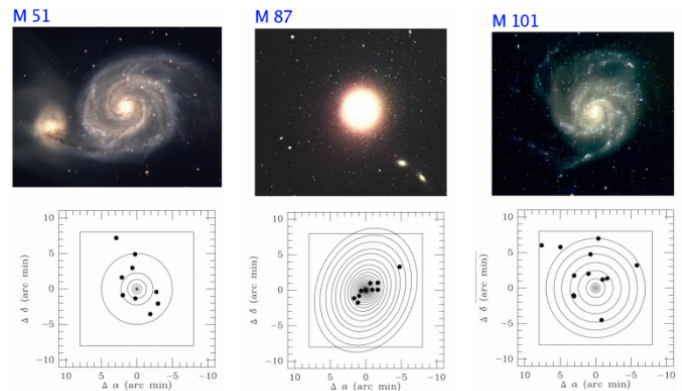


Fig. 13.

12.1. Detección y Observación

Las novas pueden detectarse en galaxias cercanas, proporcionando información crucial sobre poblaciones estelares y evolución galáctica.

12.1.1. Ejemplo: M31 (Andrómeda)

Ventajas de estudiar novas en M31:

- Distancia conocida con precisión: $d \sim 785$ kpc
- Gran número de novas detectadas anualmente
- Permite estudios estadísticos robustos
- Diferentes ambientes estelares (disco, bulbo, halo)

Referencias:

- Shafter et al. (2000): Catálogo de novas en M31
- Imágenes de múltiples filtros permiten estudiar evolución cromática

12.2. Tasa de Novas en M31

Según Rector et al. (2022), estudios modernos de M31 revelan:

Tasa observada:

$$\nu_{\text{obs}} \sim 65^{+15}_{-12} \text{ novas/año} \quad (49)$$

Corrección por incompletitud:

$$\nu_{\text{total}} \sim 100 \pm 20 \text{ novas/año} \quad (50)$$

Distribución espacial:

- Concentración en el bulbo: $\sim 40\%$
- Disco interno: $\sim 35\%$
- Disco externo: $\sim 25\%$
- Correlación con poblaciones estelares antiguas

Historical Estimates of M31 Nova Rate

Authors	Years	Filter	Novae	Rate
Hubble (1929)	1909–1927	B	85	~ 30
Arp (1956)	1953–1954	B	30	26 ± 4
Capaccioli et al. (1989) ^a	1955–1986	U, B	142	29 ± 4
Shafter & Irby (2001)	1990–1997	$H\alpha$	72	37^{+12}_{-8}
Darnley et al. (2004, 2006)	1999–2003	r', i', g'	20	65^{+16}_{-15}
Soraisam et al. (2016)	~ 106
Chen et al. (2016)	~ 97
This work ($\theta = 1$)	1995–2016	$H\alpha$	253	48^{+5}_{-4}
This work ($\theta = 0.56$)	1995–2016	$H\alpha$	253	40^{+5}_{-4}

θ : disc to bulge nova density; population parameter

Note.

^a Based on observations from Rosino (1964, 1973) and Rosino et al. (1989).

Fig. 14.

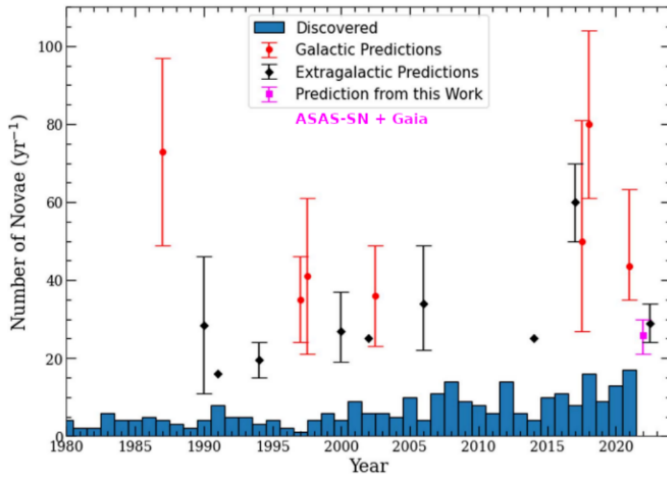


Fig. 15.

12.3. Tasa de Novas Galácticas

12.3.1. Estimaciones Modernas

Según Kawash et al. (2022):

Tasa en la Vía Láctea:

$$\nu_{MW} \sim 50 \pm 20 \text{ novae/año} \quad (51)$$

Desafíos observacionales:

- Extinción interestelar severa en el plano galáctico: $A_V \sim 5 - 30 \text{ mag}$
- Novas oscurecidas en el bulbo
- Dificultad en detectar novas débiles o rápidas
- Solo se observan ~ 10 novae/año

Correcciones aplicadas:

- Modelo de distribución espacial
- Función de luminosidad
- Distribución de velocidades de decaimiento
- Extinción galáctica

13. Novas como Candelas Estándar

13.1. Relación MMRD

Concepto: Maximum Magnitude vs Rate of Decline (MMRD): relación entre t_3 y M_{\max} .

Fundamento físico:

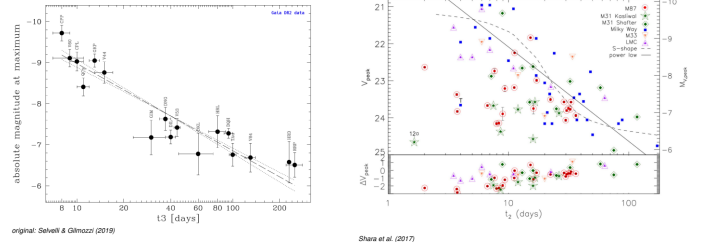


Fig. 16.

- WDs más masivas: explosiones más brillantes y decaimiento más rápido
- Tendencia observacional clara
- Potencial uso para determinar distancias

Ecuación de distancia:

$$M = m - 5(\log d_{\text{pc}} - 1) \quad (52)$$

Si existe $M_{\max} = M_{\max}(t_3)$, entonces de m_{\max} y t_3 se puede derivar d .

13.2. Controversia Actual

13.2.1. Argumentos a Favor

Hachisu & Kato (2010), Selvelli & Gilmozzi (2019):

- Evidencia de correlación significativa
- Relación teórica sólida basada en física de WDs
- Aplicable para determinar distancias extragalácticas

Forma propuesta:

$$M_V(t_3) = -11.32 + 2.55 \log t_3 \quad (53)$$

13.2.2. Argumentos en Contra

Kasliwal et al. (2011), Shara et al. (2017), Schaefer (2018):

- Dispersión excesiva en la relación
- Dependencias adicionales (metalicidad, composición de WD)
- Sesgos observacionales no corregidos adecuadamente
- No es suficientemente precisa para cosmología

13.3. Población "Rápidas y No Tan Furiosas"

Predicción de Yaron et al. (2005): Existencia de una población de novas:

- Decaimiento muy rápido: $t_3 < 5$ días
- Luminosidades máximas relativamente bajas
- Provenientes de WDs muy masivas: $M_{WD} > 1.2 M_{\odot}$

Evidencia observacional:

- Shara et al. (2017): Sugieren evidencia de tal población
- Rector et al. (2022): No encuentran población significativa en M31

Estado actual: La existencia y abundancia de esta población permanece incierta.

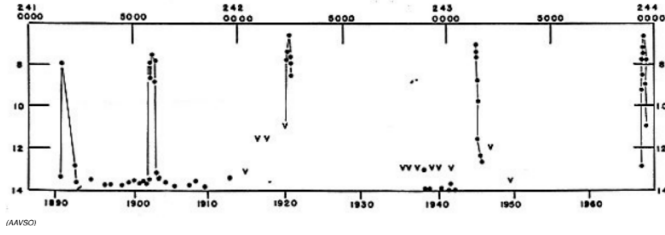


Fig. 17.

14. Novas Recurrentes

14.1. Definición y Contexto

Lema (tomado de Darnley 2021):

Accrete, accrete, accrete, ..., Bang! (and repeat)

14.1.1. Perspectiva Fundamental

Principio: *Todas las novas son recurrentes.*

La diferencia entre novas "clásicas" y "recurrentes" es meramente operacional:

- Novas recurrentes: Observamos múltiples erupciones
- Novas clásicas: Solo hemos observado una erupción (hasta ahora)

Diferencia cuantitativa: Los tiempos de recurrencia en RNe son más cortos por un factor de $\sim 4 - 5$ órdenes de magnitud:

$$t_{\text{rec}}(\text{RNe}) \sim 1 - 100 \text{ años} \quad (54)$$

$$t_{\text{rec}}(\text{CNe}) \sim 10^3 - 10^5 \text{ años} \quad (55)$$

14.2. Ejemplos Observados

14.2.1. Casos Extremos Conocidos

V2487 Oph:

- $t_{\text{rec}} = 98$ años
- Erupciones observadas: 1900, 1998
- Sistema con acreción moderadamente alta

M31N 2008-12a (el campeón):

- $t_{\text{rec}} = 364 \pm 52$ días (aproximadamente anual)
- Primera detección: 2008
- Erupciones observadas cada año desde 2013
- WD extremadamente masiva: $M_{\text{WD}} \sim 1.38 M_{\odot}$
- Tasa de acreción muy alta: $\dot{M} \sim 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$
- Candidato a progenitor de SN Ia

14.2.2. Caso Histórico: T Pyx

Erupciones documentadas:

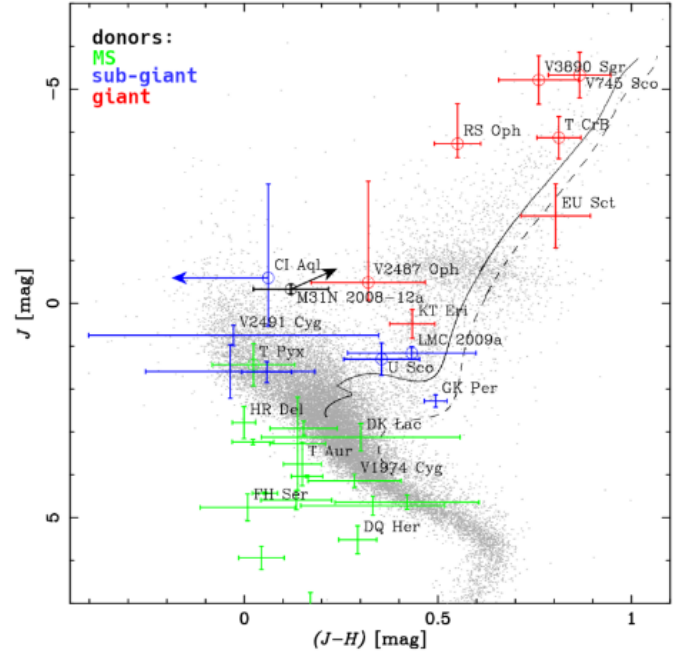
- 1890, 1902, 1920, 1944, 1967, 2011
- $t_{\text{rec}} = 12 - 44$ años (variable)
- $P_{\text{orb}} = 1.83$ horas
- Sistema de alta inclinación: $i \sim 65$

Características especiales:

- Cascaron nebular múltiple visible
- Evidencia de erupciones previas no observadas
- Edad del cascarón: ~ 2500 años

14.3. Tipos de Novas Recurrentes

Las RNe forman un grupo pequeño y muy heterogéneo, pero pueden dividirse aproximadamente en tres clases:



original: Darnley (2021)

Fig. 18.

14.3.1. Tipo 1: Donante de Secuencia Principal o Subgigante

Características:

- Tipo "CV": Desbordamiento de lóbulo de Roche
- $P_{\text{orb}} \sim 1 - 10$ horas
- Disco de acreción presente
- Ejemplos: T Pyx, IM Nor, CI Aql

Propiedades típicas:

$$M_{\text{WD}} \sim 1.2 - 1.4 M_{\odot} \quad (56)$$

$$\dot{M} \sim 10^{-8} - 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \quad (57)$$

$$t_{\text{rec}} \sim 10 - 100 \text{ años} \quad (58)$$

14.3.2. Tipo 2: Donante Gigante (Sistemas Simbióticos)

Características:

- Tipo "simbiótico": Acreción por viento
- $P_{\text{orb}} \sim 1 - 3$ años
- Gigante roja como donante
- Ejemplos: T CrB, RS Oph, V745 Sco

Propiedades típicas:

$$M_{\text{WD}} \sim 1.2 - 1.4 M_{\odot} \quad (59)$$

$$\dot{M} \sim 10^{-8} - 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \quad (60)$$

$$t_{\text{rec}} \sim 10 - 80 \text{ años} \quad (61)$$

Acreción por viento:

$$\dot{M}_{\text{wind}} \approx \frac{\pi R_{\text{acc}}^2 \rho_{\text{wind}} v_{\text{wind}}}{2} \quad (62)$$

donde R_{acc} es el radio de acreción de Bondi-Hoyle.

14.3.3. Tipo 3: M31N 2008-12a (Clase Propia)

Características únicas:

- $t_{\text{rec}} \sim 1$ año (sin precedentes)
- WD cerca del límite de Chandrasekhar
- Tasa de acreción extremadamente alta
- Posible progenitor directo de SN Ia

14.4. Novas Recurrentes Galácticas

Según Darnley (2021), los sistemas RNe galácticos conocidos son:

Sistema	P_{orb}	t_{rec}	Tipo
T Pyx	1.83 h	12-44 yr	MS/subgigante
IM Nor	2.46 h	~ 50 yr	MS/subgigante
CI Aql	0.62 d	~ 20 yr	MS/subgigante
U Sco	1.23 d	~ 10 yr	Subgigante
V394 CrA	?	~ 50 yr	?
T CrB	227.6 d	~ 80 yr	Simbiótico
RS Oph	453.6 d	~ 15 yr	Simbiótico
V745 Sco	510 d	~ 25 yr	Simbiótico
V3890 Sgr	747.6 d	~ 27 yr	Simbiótico
V2487 Oph	?	98 yr	?

Table 2. Novas recurrentes galácticas conocidas

14.5. Distribución de Tiempos de Recurrencia

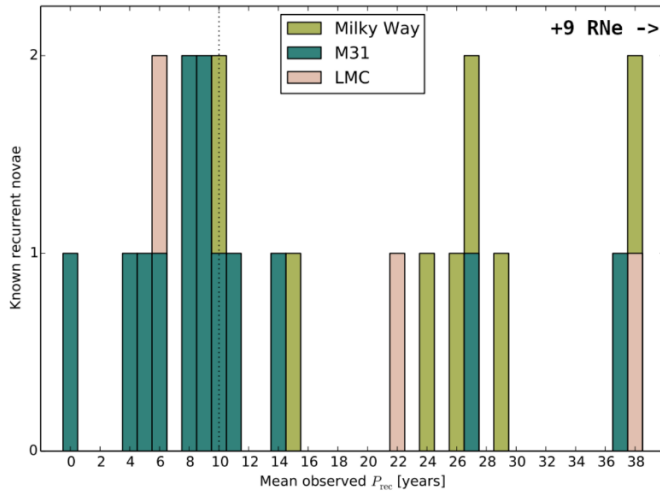


Fig. 19.

14.5.1. Observaciones

Según Darnley (2021), la distribución de t_{rec} muestra:

- Pico en $t_{\text{rec}} \sim 10 - 30$ años
- Cola hacia tiempos más largos
- Sesgo observacional fuerte: sistemas de recurrencia muy larga aún no observados

14.5.2. Predicciones Teóricas

Población oculta:

- Muchas novas "clásicas" son probablemente recurrentes
- $t_{\text{rec}} \gg$ tiempo de observación histórica
- Estimación: $\sim 10 - 20\%$ de CNe son RNe con $t_{\text{rec}} < 1000$ años

15. Física de los Tiempos de Recurrencia Cortos

15.1. Fórmula Fundamental

El tiempo de recurrencia está dado por:

$$t_{\text{rec}} = \frac{M_{\text{env,crit}}}{\langle \dot{M}_1 \rangle} \quad (63)$$

15.2. Masa Crítica de la Envoltura

Modelado (Livio 1993):

$$M_{\text{env,crit}} = 1.7 \times 10^{-4} R_1^{2.8} M_1^{-0.7} \quad [R_1 \text{ en } 10^9 \text{ cm}, M_1 \text{ en } M_\odot] \quad (64)$$

15.2.1. Dependencia con la Masa de la WD

Para WDs más masivas:

- $M_1 \uparrow \Rightarrow R_1 \downarrow$ (relación masa-radio de WDs)
- $M_{\text{env,crit}} \downarrow$ (por ambos factores)
- Resultado: $t_{\text{rec}} \downarrow$ significativamente

Ejemplo cuantitativo:

$$M_1 = 0.6 M_\odot \Rightarrow M_{\text{env,crit}} \sim 10^{-4} M_\odot \quad (65)$$

$$M_1 = 1.2 M_\odot \Rightarrow M_{\text{env,crit}} \sim 10^{-6} M_\odot \quad (66)$$

$$M_1 = 1.38 M_\odot \Rightarrow M_{\text{env,crit}} \sim 10^{-7} M_\odot \quad (67)$$

15.3. Tasa de Acreción

Comparación CVs vs RNe:

$$\langle \dot{M}_1 \rangle_{\text{CVs}} \sim 10^{-9} - 10^{-11} M_\odot \text{ yr}^{-1} \quad (68)$$

$$\langle \dot{M}_1 \rangle_{\text{RNe}} \sim 10^{-7} - 10^{-8} M_\odot \text{ yr}^{-1} \quad (69)$$

Diferencia: La tasa de acreción en RNe es típicamente 100-1000 veces mayor que en CVs.

15.4. Masa Eyectada

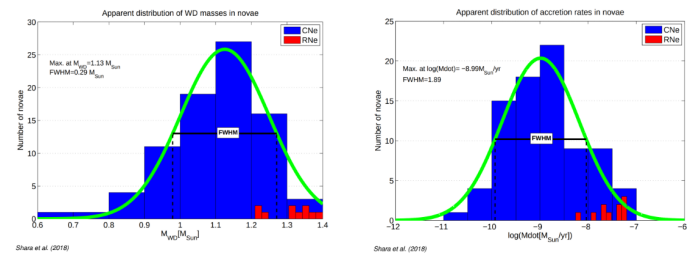


Fig. 20.

Consecuencia importante:

$$M_{\text{env,crit}}(\text{RNe}) < M_{\text{env,crit}}(\text{CNe}) \Rightarrow M_{\text{ej}}(\text{RNe}) < M_{\text{ej}}(\text{CNe}) \quad (70)$$

Según Shara et al. (2018):

$$M_{ej}(\text{CNe}) \sim 10^{-4} - 10^{-5} M_{\odot} \quad (71)$$

$$M_{ej}(\text{RNe}) \sim 10^{-6} - 10^{-7} M_{\odot} \quad (72)$$

Implicación para crecimiento de la WD: Si $M_{acc} - M_{ej} > 0$, la WD puede crecer neto en masa, potencialmente alcanzando el límite de Chandrasekhar.

16. Cascarones de Novas

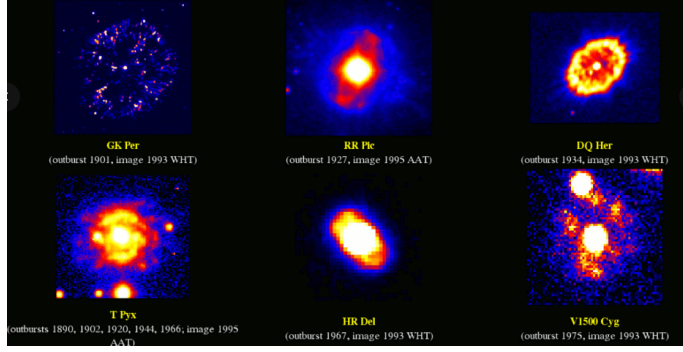


Fig. 21.

16.1. Propiedades Observacionales

Características típicas:

$$M_{shell} \sim 10^{-4} M_{\odot} \quad (73)$$

$$v_{exp} \sim 10^3 \text{ km s}^{-1} \quad (74)$$

$$R_{shell}(t) = v_{exp} \times t \quad (75)$$

16.2. Evolución Temporal

Fases del cascarón:

1. **Fase de eyección (días 0-10):**
 - Cascarón ópticamente grueso
 - Expansión libre supersónica
 - Emisión continua dominante
2. **Fase de transición (semanas-meses):**
 - Cascarón se vuelve ópticamente delgado
 - Aparecen líneas de emisión nebulares
 - Formación de polvo (en algunos casos)
3. **Fase nebular (años-décadas):**
 - Cascarón completamente ópticamente delgado
 - Espectro nebular puro
 - Observable en radio, óptico, rayos X
4. **Interacción con medio interestelar (siglos):**
 - Desaceleración del cascarón
 - Mezcla con ISM
 - Eventual dispersión

16.3. Geometría de Cascarones

Morfologías observadas:

- Esférica (rara)
- Elipsoidal (común)
- Bipolar/lobular (frecuente)

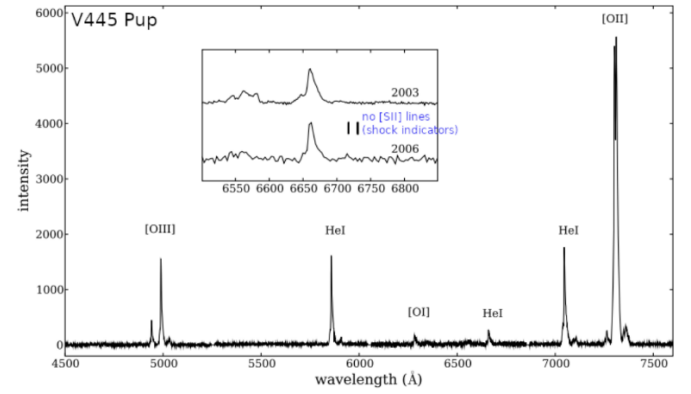
- Estructuras anulares
- Cascarones múltiples (en RNe)

Origen de asimetrías:

- Rotación de la WD
- Efectos del disco de acreción
- Campo magnético
- Sistema binario en sí

17. Novas de Helio

17.1. Caso Único: V445 Puppis

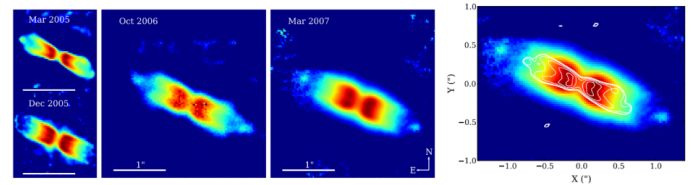


original: Woudt et al. (2009)

Fig. 22.

Descubrimiento: Única nova de helio espectroscópicamente confirmada hasta la fecha (erupción en 2000).

17.1.1. Características Observacionales (Woudt et al. 2009)



original: Woudt et al. (2009)

Fig. 23.

Espectroscopia:

- Ausencia completa de hidrógeno
- Líneas intensas de helio (HeI, HeII)
- Líneas de carbono fuerte
- Indicador de acreción de material rico en He

Velocidad de expansión:

$$v_{exp} \approx 7000 \text{ km s}^{-1} \quad (76)$$

Significativamente más alta que novas clásicas típicas ($v \sim 1000 - 2000 \text{ km/s}$).

17.2. Estructura del Cascarón de V445 Pup

Observaciones NACO en banda K_s ($\sim 2.2\mu\text{m}$):

17.2.1. Morfología

- **Lóbulos en expansión:** Estructura bipolar prominente
- **Banda central de polvo:** Perpendicular a los lóbulos
- **Nudos de alta velocidad:** Originados ~ 345 días post-erupción

17.2.2. Emisión de Radio

Características (Nyamai et al. 2021):

- Emisión sincrotrón intensa años después de la erupción (2008)
- Origen probable: disco de polvo
- Coincidencia temporal entre nudos y flare radio fuerte
- Indica choque en el material eyectado

17.3. Física de las Novas de Helio

17.3.1. Tasas de Acreción Requeridas

Según Kato et al. (1989):

$$\dot{M}_{\text{He}} \sim 10^{-8} - 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \quad (77)$$

17.3.2. Origen del Helio

La estrella donante no necesariamente es una WD o estrella de He:

Escenario 1: Quema estacionaria

- $\dot{M} > 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$
- Causa quema nuclear estable en la superficie de la WD
- Convierte H a He continuamente
- He acumulado puede experimentar explosión

Escenario 2: Donante de He

- Estrella donante rica en He directamente
- Post-CE con pérdida de envoltura de H
- Enana He o WD de He

17.3.3. Mecanismo de Explosión

Similitud con novas clásicas:

- Degeneración electrónica en envoltura de He
- Ignición termonuclear cuando se alcanza temperatura crítica
- $T_{\text{ignición, He}} \sim 1 - 2 \times 10^8 \text{ K}$ (más alta que para H)
- Fuga termonuclear

Diferencias clave:

- Energía liberada por quema de He es mayor
- Velocidades de eyección más altas
- Menor opacidad \Rightarrow evolución más rápida

17.3.4. Conexión con SNe Ia

Escenario de detonación inducida:

$$\dot{M} < 10^{-8} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \quad (78)$$

puede causar una **detonación hacia el interior**, potencialmente iniciando una SN Ia.

Mecanismo:

1. Explosión de He en la superficie
2. Onda de choque se propaga hacia el interior
3. Compresión del núcleo CO de la WD
4. Posible ignición de carbono
5. Detonación completa de la WD

Importancia: Este es un mecanismo propuesto para SNe Ia que difiere del escenario de acreción estable de H.

18. Conexión con Supernovas Tipo Ia

18.1. Novas Recurrentes como Progenitores

18.1.1. Condición de Crecimiento Neto

Para que una WD crezca en masa y potencialmente alcance $M_{\text{Ch}} \approx 1.4 M_{\odot}$:

$$\Delta M = M_{\text{acc}} - M_{\text{ej}} > 0 \quad (79)$$

Por ciclo de nova:

$$\Delta M_{\text{ciclo}} = \langle \dot{M}_1 \rangle t_{\text{rec}} - M_{\text{ej}} \quad (80)$$

18.1.2. Régimen Favorable

Condiciones para crecimiento:

$$M_{\text{WD}} > 1.2 M_{\odot} \quad (\text{WD masiva}) \quad (81)$$

$$\langle \dot{M}_1 \rangle \sim 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \quad (\text{acreción alta}) \quad (82)$$

$$M_{\text{ej}} \ll M_{\text{acc}} \quad (\text{eyección mínima}) \quad (83)$$

18.2. Caso M31N 2008-12a

Parámetros del sistema:

$$M_{\text{WD}} \sim 1.38 M_{\odot} \quad (84)$$

$$\langle \dot{M}_1 \rangle \sim 1.6 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \quad (85)$$

$$t_{\text{rec}} = 1 \text{ año} \quad (86)$$

$$M_{\text{ej}} \sim 2 \times 10^{-7} M_{\odot} \quad (87)$$

Crecimiento neto por ciclo:

$$\Delta M \sim (1.6 - 0.2) \times 10^{-7} M_{\odot} \sim 1.4 \times 10^{-7} M_{\odot} \quad (88)$$

Tiempo para alcanzar Chandrasekhar:

$$t_{\text{SN}} \sim \frac{0.02 M_{\odot}}{1.4 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \sim 10^5 \text{ años} \quad (89)$$