

# Compact Objects

Mauro Jélvez

## 1. Clasificación de Objetos Compactos

Los objetos compactos son los remanentes finales de la evolución estelar. Su estudio en sistemas binarios es crucial, ya que la interacción con una compañera (por transferencia de masa, acreción, etc.) permite inferir sus propiedades, que de otro modo serían inobservables.

Objeto Compacto	Masa Estelar Progenitora	Notas / Relevancia en Binarias
Enana Blanca	$0.7-8 M_{\odot}$	Remanente de estrellas de baja y media masa. Común en binarias; fuente de supernovas Tipo Ia y variables cataclísmicas.
Estrella de Neutrones	$\sim 8-25 M_{\odot}$	Formada en supernovas de colapso del núcleo. Se observan como púlsares en binarias, fuentes de ondas gravitacionales (NS-NS, NS-BH).
Agujero Negro	$> 25 M_{\odot}$	Formado en supernovas de colapso del núcleo. En binarias, son componentes de microcuásares y fuentes primarias de ondas gravitacionales (BH-BH).
Estrella de Quarks	(Hipotético)	No observada directamente. Su posible existencia afectaría la ecuación de estado de la materia densa; objetivo en el análisis de ondas gravitacionales y observaciones de estrellas de neutrones.
Otros objetos exóticos	(Hipotéticos)	Puramente teóricos (e.g., estrellas de preones, estrellas de bosones). Su búsqueda es un área de investigación activa.

Fig. 1.

### Relevancia en Estrellas Binarias

- La **transferencia de masa** desde una compañera puede reactivar la acreción en el objeto compacto, produciendo fenómenos de alta energía (rayos X, erupciones).
- Los sistemas binarios compactos (especialmente pares de EN-EN, EN-AG, AG-AG) son las **principales fuentes de ondas gravitacionales** detectadas por LIGO/Virgo.
- Las **Enanas Blancas** en binarias son progenitores de las Supernovas Tipo Ia, candelas estándar cruciales en cosmología.
- El estudio de la acreción y las órbitas en estos sistemas permite **medir las masas** de los objetos compactos con gran precisión, construyendo sus ecuaciones de estado y modelos de formación.

## 2. Complejidades en la Formación de Objetos Compactos

La figura 2 ilustra un punto crítico: la masa inicial de la estrella **no es el único determinante** para el remanente final. Procesos evolutivos como la pérdida de masa y fenómenos explosivos específicos introducen variaciones cruciales en el camino evolutivo.

### Procesos Clave que Modifican el Resultado Final

- **Pérdida de Masa (Mass Loss):** En estrellas muy masivas, los fuertes vientos estelares pueden expulsar una fracción significativa de la envoltura exterior. Esto puede **"reducir"**

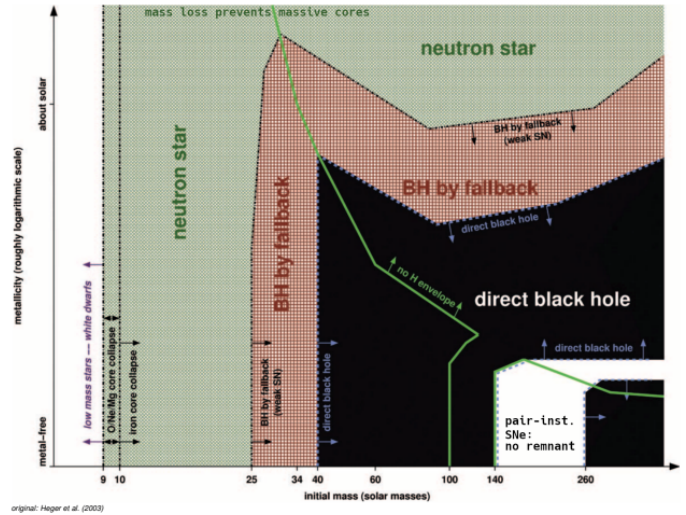


Fig. 2. Mapa de remanentes estelares mostrando la dependencia con la masa inicial y otros procesos clave. Se observa que la pérdida de masa evita la formación de núcleos masivos, y fenómenos como la inestabilidad de pares (pair-inst.) pueden llevar directamente a la formación de agujeros negros. Adaptado de Heger et al. (2003).

**el núcleo** evolutivo, haciendo que una estrella inicialmente muy masiva termine como una **estrella de neutrones** en lugar de un agujero negro.

- **Inestabilidad de Pares (Pair-Instability):** En un rango de masas muy específico (aproximadamente  $130-250 M_{\odot}$ ), la producción de pares electrón-positrón en el núcleo reduce la presión de radiación, leading a un colapso parcial y una explosión termonuclear extremadamente violenta que **no deja remanente**. Para masas aún mayores, el colapso es inevitable y se forma un agujero negro **directamente**.
- **Agujero Negro Directo (Direct Black Hole):** Para las estrellas más masivas, el colapso del núcleo puede ser tan extremo que se forma un agujero negro **sin una explosión de supernova visible**. Esto contrasta con la formación típica de estrellas de neutrones, que suele ir acompañada de una explosión de supernova.

### Implicaciones en Sistemas Binarios

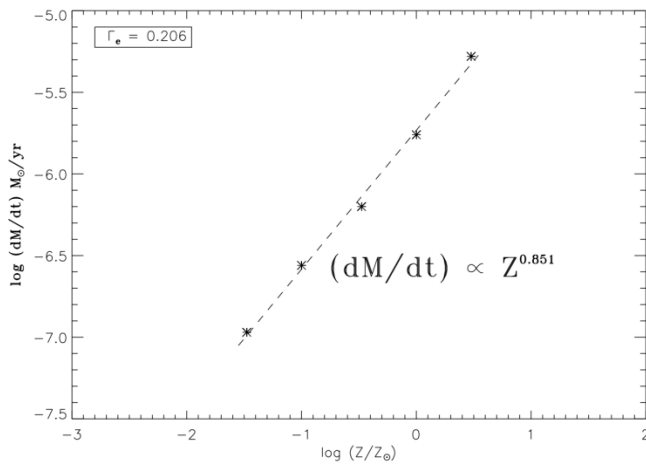
- La **pérdida de masa** en la componente primaria puede alterar drásticamente la órbita del sistema (cambios en el semieje mayor y excentricidad) y afectar la evolución posterior de la binaria, incluso determinando si ocurrirá transferencia de masa o no.
- La formación de un agujero negro por **colapso directo** (sin supernova) implica una **asimetría mínima** y, por tanto, un **"kick" de natal pequeño**. Esto aumenta la probabilidad de que el sistema binario permanezca unido, en contraste con

los grandes "kicks" que suelen recibir las estrellas de neutrones, que frecuentemente disruptan el sistema.

- Los sistemas que experimentan **inestabilidad de pares** son fuentes potenciales de **supernovas de inestabilidad de pares**, que podrían ser identificadas en surveys de búsqueda de transitorios y tienen implicaciones para la evolución química del universo.

### 3. Pérdida de Masa y Metalicidad

La pérdida de masa estelar es un proceso crítico que depende fuertemente de la metalicidad ( $Z$ ) de la estrella. Este mecanismo explica por qué estrellas con la misma masa inicial pero diferente metalicidad pueden evolucionar hacia remanentes distintos.



Vink et al. (2001)

**Fig. 3.** Relación entre la tasa de pérdida de masa y la metalicidad. Se observa una dependencia potencial  $\dot{M} \propto Z^{0.85}$ , donde mayor metalicidad implica mayor pérdida de masa. Adaptado de Vink et al. (2001).

#### Mecanismo Físico

- **Metalicidad y Pérdida de Masa:** La relación  $\dot{M} \propto Z^{0.85}$  indica que estrellas con **mayor metalicidad** experimentan **mayor pérdida de masa**.
- **Mecanismo Impulsado por Líneas:** Los metales (elementos más pesados que H y He) proporcionan más líneas de absorción en el espectro. Esto permite que la **radiación transfiera momento** a la atmósfera estelar de manera más eficiente, acelerando los vientos estelares.
- **Factor de Eddington:** La eficiencia de este proceso depende del balance entre la aceleración radiativa y gravitatoria:

$$\Gamma_e = \frac{L\sigma_e}{4\pi cGM} = 7.66 \times 10^{-5} \sigma_e \left( \frac{L}{M} \right) \text{ [unidades solares]}$$

donde  $\sigma_e$  es la sección eficaz de dispersión por electrones por unidad de masa.

#### Implicaciones en Sistemas Binarios

- **Evolución Diferencial en Distintos Entornos:** Las binarias en galaxias con **baja metalicidad** (como galaxias enanas o el universo temprano) experimentarán **menos pérdida de masa**, permitiendo que las estrellas retengan más masa y evolucionen hacia remanentes más masivos.

- **Formación de AGs Masivos:** Esto explica por qué se observan agujeros negros más masivos en sistemas de **baja metalicidad**, ya que las estrellas progenitoras pierden menos masa antes del colapso.
- **Transferencia de Masa Modificada:** En sistemas binarios, la pérdida de masa por vientos estelares puede **alterar la órbita** incluso antes de que comience la transferencia de masa por Roche, afectando la evolución posterior del sistema.
- **Enriquecimiento Químico Asimétrico:** La componente que pierde masa a través de vientos enriquece el medio interestelar circundante, lo que puede afectar la composición química de su compañera y el material que eventualmente será acrecido.

#### Consecuencias Observables

- Las poblaciones estelares de **alta metalicidad** (como en el bulbo galáctico) producirán predominantemente **enanas blancas y estrellas de neutrones de baja masa**.
- Las regiones de **baja metalicidad** (como el halo galáctico o galaxias enanas) serán entornos propicios para la formación de **agujeros negros masivos** y, por tanto, de sistemas binarios que eventualmente producirán **ondas gravitacionales**.
- La distribución de masas de los objetos compactos detectados por LIGO/Virgo refleja esta dependencia con la metalicidad de sus estrellas progenitoras.

### 4. Clasificación Espectral de Enanas Blancas

Las enanas blancas (WDs) exhiben una diversidad espectral que refleja su composición atmosférica, historia evolutiva y procesos físicos particulares. El sistema de clasificación se basa en líneas espectrales dominantes y propiedades especiales.

**Table 1.** Clasificación espectral de enanas blancas (adaptado del sistema de Sion et al.)

Tipo Espectral	Características
DA	Solo líneas de Balmer (H); no hay He I ni metales presentes.
DB	Líneas de He I; no hay H ni metales presentes.
DC	Espectro continuo, sin líneas más profundas del 5% en cualquier parte del espectro electromagnético.
DO	He II fuerte; He I o H presentes.
DZ	Líneas metálicas solamente; no hay líneas de H o He.
DQ	Características de carbono, atómicas o moleculares en cualquier parte del espectro electromagnético.
P	Enanas blancas magnéticas con polarización detectable.
H	Enanas blancas magnéticas sin polarización detectable.
X	Espectro peculiar o no clasificable.
E	Líneas de emisión presentes.
?	Clasificación incierta; también puede usarse dos puntos (:).
V	Símbolo opcional para denotar variabilidad.

- **Prevalencia:** Aproximadamente el **80%** de las enanas blancas son tipo **DA** (atmósferas dominadas por hidrógeno).
- **Contaminación Metálica Reciente:** Alrededor del **25%** de las enanas blancas DA frías ( $T_{\text{eff}} < 10,000 \text{ K}$ ) muestran líneas metálicas. Dado que los metales “se hunden” rápidamente por sedimentación gravitatoria, esto indica **acreción comparativamente reciente** de material planetario (cometas, cuerpos rocosos).
- **Campos Magnéticos:** Aproximadamente el **13%** de las enanas blancas aisladas presentan campos magnéticos fuertes ( $B = 10^5 - 10^9 \text{ G}$ ). Las estadísticas están incompletas para campos más débiles ( $10^3 - 10^4 \text{ G}$ ).

Implicaciones en Sistemas Binarias

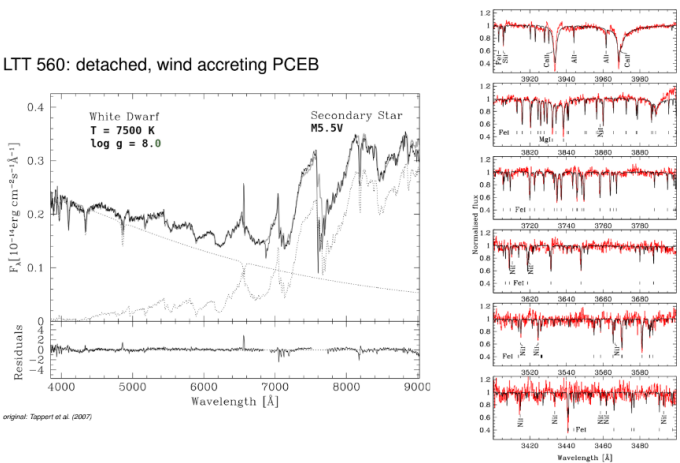
- **Historia de Transferencia de Masa:** El tipo espectral de una enana blanca en un sistema binario puede revelar la **historia de transferencia de masa**:
  - Las DA sugieren envolturas de hidrógeno preservadas o adquiridas.
  - Las DB/DO indican pérdida de la envoltura de hidrógeno, exponiendo capas de helio.
- **Evidencia de Sistemas Planetarios:** La presencia de **metales en enanas blancas frías (DZ)** proporciona evidencia directa de **discos de escombros y planetesimales** en sistemas binarios, demostrando que la formación planetaria puede sobrevivir a la evolución estelar.
- **Binarias Interaccionantes:** En sistemas binarios cercanos, la **acreción de material** de la compañera puede alterar la composición atmosférica de la enana blanca, potentially cambiando su clasificación espectral con el tiempo.
- **Magnetismo en Binarias:** Las enanas blancas magnéticas en sistemas binarios pueden afectar la **geometría de la acreción**, leading a fenómenos como **columnas de acreción** y variabilidad pulsada en sistemas como las variables cataclísmicas polares (AM Herculis).

Procesos Físicos Subyacentes

- **Sedimentación Gravitatoria:** En el intenso campo gravitatorio de las enanas blancas ( $\log g \sim 7 - 9$ ), los elementos más pesados se hunden rápidamente, haciendo que la detección de metales implique **acreción en curso o reciente**.
- **Enfriamiento y Cristalización:** A medida que las enanas blancas se enfrían, pueden desarrollar **núcleos cristalinos** que afectan su evolución térmica y la interpretación de las relaciones masa-radio.
- **Límite de Chandrasekhar:** Las enanas blancas masivas ( $M > 1.1 - 1.2 M_{\odot}$ ) pueden acercarse al límite de Chandrasekhar, making them potential progenitores de **Supernovas Tipo Ia** en sistemas binarios.

5. Caso de Estudio: LTT 560 - Acreción por Viento en una Binaria Post-ASE

El sistema LTT 560 representa un ejemplo observacional perfecto que ilustra múltiples conceptos discutidos anteriormente: clasificación espectral de enanas blancas, acreción de metales, y evolución de binarias.



**Fig. 4.** Espectro de LTT 560 mostrando líneas metálicas en la enana blanda. Este sistema es una binaria post-ASE (Post-Common Envelope Binary) detached que experimenta acreción por viento. Adaptado de Tappert et al. (2007).

**Table 2.** Parámetros estelares de LTT 560

Componente	Parámetros
<b>Enana Blanca</b>	
Tipo	DAZ (con líneas metálicas)
Temperatura	$T_{\text{eff}} = 7,500 \text{ K}$
Gravedad superficial	$\log g = 8.0$
<b>Estrella Secundaria</b>	
Tipo	M5.5V (enana roja)
<b>Sistema Binario</b>	
Tipo	Binaria Post-ASE detached
Mecanismo de acreción	Acreción por viento estelar

Parámetros del Sistema

Características Observacionales Clave

- **Líneas Metálicas Detectadas:** El espectro muestra claramente líneas de elementos pesados en la atmósfera de la enana blanda, clasificándola como **DAZ**.
- **Sistema “Detached”:** Las componentes no están llenando sus lóbulos de Roche, descartando transferencia de masa por Roche Lobe Overflow.
- **Acreción por Viento:** El mecanismo de acreción dominante es la captura de material del **viento estelar** de la enana M.

Implicaciones Físicas

- **Sedimentación vs. Acreción:** La presencia de metales a  $T_{\text{eff}} = 7,500 \text{ K}$  implica **acreción continua o reciente**, ya que de otro modo los metales habrían sedimentado fuera de la atmósfera visible.
- **Eficiencia de Acreción por Viento:** Este sistema demuestra que la acreción por viento puede ser **suficientemente eficiente** para enriquecer observablemente la atmósfera de la enana blanca, incluso en sistemas detached.
- **Edad del Sistema:** Como binaria post-ASE, LTT 560 representa una etapa evolutiva **posterior a la fase de envoltente común**, donde el sistema se ha reexpandido después de la eyección de la envoltente.

Relevancia para el Estudio de Binarias

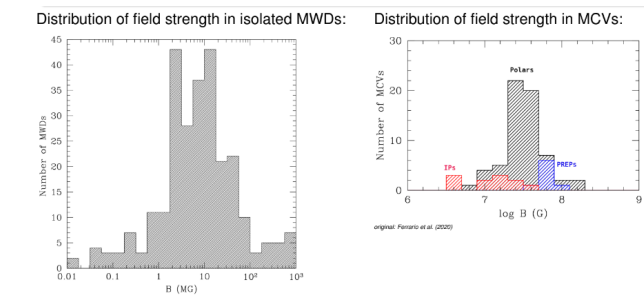
- **Proceso de ASE:** LTT 560 es un **laboratorio natural** para estudiar las consecuencias de la fase de envolvente común (ASE) y la evolución posterior.
- **Mecanismos de Acreción Alternativos:** Demuestra que la **acreción por viento** puede ser un proceso significativo en binarias separadas, no solo en sistemas semidesprendidos.
- **Constricción de Tasa de Pérdida de Masa:** La abundancia de metales en la enana blanca permite estimar la **tasa de pérdida de masa** de la enana M y la **eficiencia de acreción** de la enana blanca.
- **Conexión con Sistemas Planetarios:** Aunque menos probable en este caso, la acreción de material planetario o de discos de escombros podría contribuir al enriquecimiento metálico.

Proyección Evolutiva

- **Contracción Orbital:** A largo plazo, la pérdida de momento angular por emisión de ondas gravitacionales causará una **lenta contracción orbital**.
- **Potencial Reactivación:** En  $\sim 10^9 - 10^{10}$  años, el sistema podría volver a interactuar cuando la enana M evolucione o el sistema se contraiga lo suficiente.
- **Posible Variable Cataclísmica:** Si la separación orbital disminuye suficientemente, LTT 560 podría eventualmente convertirse en una **variable cataclísmica** con transferencia de masa por Roche Lobe Overflow.

6. Enanas Blancas Magnéticas en Sistemas Binarios

Las enanas blancas magnéticas (MWDs) representan una población significativa cuyas propiedades difieren entre sistemas aislados y binarios interactuantes, proporcionando información clave sobre los mecanismos de generación y evolución de campos magnéticos.



**Fig. 5.** Distribución de la fuerza del campo magnético en enanas blancas magnéticas aisladas (arriba) y en Variables Cataclísmicas Magnéticas (MCVs) (abajo). Se observa una distribución bimodal en MCVs con los Polares mostrando campos más fuertes que los Intermedios (TFs). Adaptado de Ferrario et al. (2020).

Distribución de Campos Magnéticos

Variables Cataclísmicas Magnéticas (MCVs)

- **Polares:** Campos magnéticos muy fuertes ( $\sim 10 - 200$  MG) que **sincronizan la rotación** de la enana blanca con el período orbital. El material acrecido sigue las líneas de campo directamente hacia los polos magnéticos.

**Table 3.** Comparación de enanas blancas magnéticas en diferentes entornos

Parámetro	MWDs Aisladas	Variables Cataclísmicas
Rango de Campos	$10^3 - 10^9$ G	$10^5 - 10^8$ G en binarias
Distribución	Continua	Bimodal: Polares y Intermedios
Prevalencia	$\sim 13\%$ de WDs aisladas	$\sim 25\%$ de CVs en binarias
Mecanismo de Generación	¿Fósil? ¿Dinamo?	Cristalización del núcleo

- **Intermedios (TFs/DQ Her):** Campos más débiles ( $\sim 1 - 10$  MG) que permiten la formación de un **disco de acreción truncado** por el magnetismo de la enana blanca. La rotación no está sincronizada.

Problemas Observacionales y Controversias

- **Paradoja de Binarias Post-ASE:** Se encuentran **muy pocas MWDs en binarias post-ASE**, a pesar de que se esperaría una fracción similar a la de MWDs aisladas ( $\sim 13\%$ ).
- **Resultados Recientes:** Brown et al. (2023) encontraron **6 MWDs entre 34 binarias eclipsantes WD-dM**, sugiriendo que la fracción podría ser mayor de lo pensado anteriormente.

Mecanismos de Generación de Campos Magnéticos

- **Modelo de Cristalización + Dinamo (Schreiber et al. 2021):**
  - La **cristalización del núcleo** durante el enfriamiento de la WD produce convección en el líquido residual.
  - El **spin-up durante el inicio de la acreción** proporciona la rotación necesaria.
  - La combinación produce un **dinamo que genera campos fuertes**.
- **Críticas y Alternativas:** Trabajos recientes (Castro-Tapia et al. 2024, Camisassa et al. 2024) cuestionan algunos aspectos de este modelo, sugiriendo que los campos podrían ser en parte **fósiles** de la evolución previa.

Implicaciones en Sistemas Binarios

- **Geometría de Acrción:** El campo magnético determina completamente la geometría de la acreción:
  - En **Polares**: columnas de acreción directas desde el punto de Lagrange L1.
  - En **Intermedios**: disco de acreción truncado interiormente.
- **Sincronización Orbital:** En Polares, el fuerte acoplamiento magnético mantiene la **sincronización spin-órbita**, afectando la evolución angular del sistema.
- **Evolución de CVs:** El magnetismo puede influir en las **tasas de transferencia de masa** y la estabilidad de los discos de acreción, afectando la evolución a largo plazo del sistema.
- **Detectabilidad:** Las MWDs en binarias son más fáciles de detectar que las aisladas debido a los fenómenos de acreción que producen (emisión de rayos X, polarización, pulsaciones).

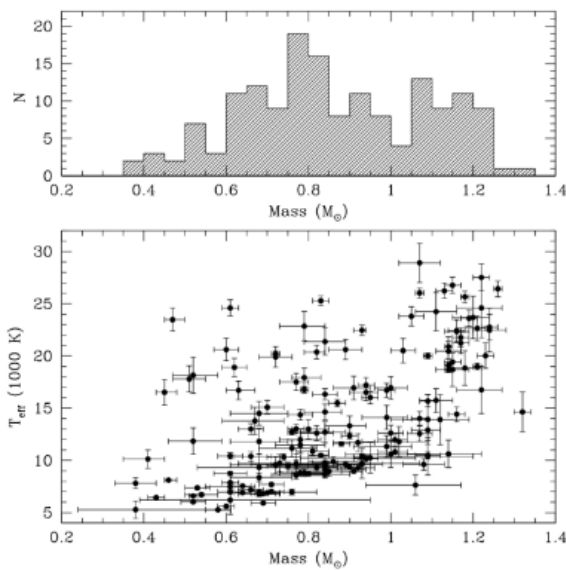
Preguntas Abiertas

- ¿Por qué hay tan **pocas MWDs en binarias post-ASE** comparado con sistemas aislados?

- ¿Los campos magnéticos en CVs son **primordiales** (fósiles) o **adquiridos** durante la evolución binaria?
- ¿Cómo afecta la **crystalización del núcleo** a la evolución magnética en diferentes tipos de binarias?
- ¿Existe una **conexión evolutiva** entre los diferentes tipos de MCVs?

## 7. Distribución de Masas y Temperaturas en Enanas Blancas Magnéticas

El análisis de las distribuciones de masa y temperatura en enanas blancas magnéticas (MWDs) revela patrones distintivos que proporcionan pistas fundamentales sobre sus mecanismos de formación y evolución, particularmente en el contexto de sistemas binarios.



**Fig. 6.** Distribución de temperaturas efectivas y masas para enanas blancas magnéticas aisladas. Se observa que las MWDs tienden a ser más masivas que las enanas blancas no magnéticas. Adaptado de Kepler et al. (2018).

### Distribución Bimodal de Masas en Enanas Blancas

- **Dos Poblaciones Distintas:** La distribución de masas de enanas blancas muestra un claro patrón **bimodal** con picos en:
  - **0.60  $M_{\odot}$ :** Población de baja masa, formada típicamente por evolución de estrellas simples.
  - **0.80  $M_{\odot}$ :** Población de alta masa, potencialmente enriquecida por fusiones binarias.
- **MWDs Más Masivas:** Las enanas blancas magnéticas muestran una tendencia clara a ser **más masivas** que sus contrapartes no magnéticas, con una distribución sesgada hacia masas mayores.

### Interpretación de la Bimodalidad

#### Implicaciones para el Origen del Magnetismo

- **Hipótesis de Fusiones Binarias:** La correlación entre **masa elevada** y **magnetismo** sugiere que muchos sistemas magnéticos podrían formarse a través de **fusiones de binarias de enanas blancas**.

**Table 4.** Interpretación de las dos poblaciones de enanas blancas

Parámetro	Población de 0.60 $M_{\odot}$	Población de 0.80 $M_{\odot}$
Masa media	0.60 $M_{\odot}$	0.80 $M_{\odot}$
Mecanismo de formación	Evolución de estrellas simples	Fusiones binarias o evolución de sistemas binarios
Progenitor típico	Estrellas de 1–2 $M_{\odot}$	Estrellas de 3–5 $M_{\odot}$ o sistemas binarios
Fracción magnética	Baja	Alta

- **Mecanismo de Dinamo de Fusión:** Durante la fusión de dos enanas blancas:
  - Se produce una **rotación diferencial** extrema.
  - El **reordenamiento de masas** genera fuertes corrientes convectivas.
  - La combinación puede activar un **dinamo que genera campos magnéticos fuertes**.
- **Selección Observacional:** Las MWDs más masivas son más fáciles de detectar debido a sus **menores radios** y **mayores gravedades superficiales**, que amplifican los efectos de Zeeman.

### Consecuencias en Sistemas Binarios

- **Progenitores de SNe Ia:** Las fusiones de enanas blancas masivas ( $> 1.1 M_{\odot}$ ) pueden acercarse al **límite de Chandrasekhar**, making them potential progenitores de Supernovas Tipo Ia.
- **Binarias Compactas:** Los sistemas que no llegan a fusionarse completamente pueden formar **binarias ultracercanas** de enanas blancas, fuentes de ondas gravitacionales para misiones como LISA.
- **Enriquecimiento Químico:** Las fusiones pueden producir enanas blancas con **composiciones atmosféricas anómalas** (DQ, DZ) debido a la mezcla de material de ambas componentes.

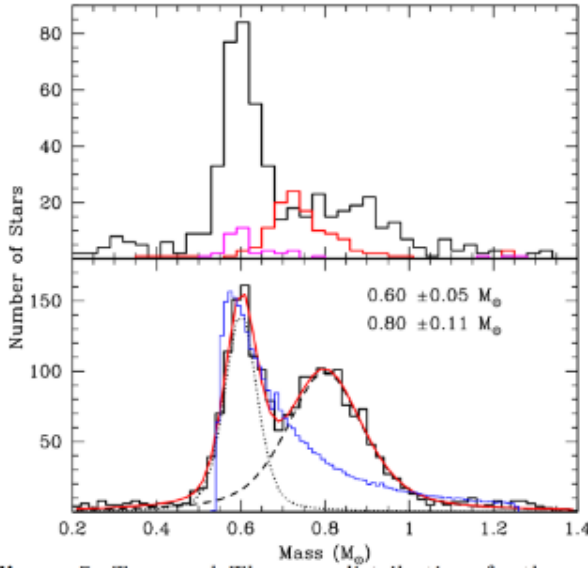
### Evidencia Observacional Adicional

- **Estudios Cinemáticos:** Las MWDs masivas muestran **velocidades espaciales más bajas**, consistentes con una población más joven formada por fusiones recientes.
- **Distribución Espacial:** La mayor frecuencia de MWDs masivas en el **disco galáctico** (vs. halo) apoya su formación a través de fusiones, que son más probables en regiones de mayor densidad estelar.
- **Correlación Masa-Campo:** Existe una correlación positiva entre la **masa de la enana blanca** y la **fuerza del campo magnético** en muchos sistemas.

### Preguntas Abiertas

- ¿Qué fracción de las MWDs se forman por fusiones vs. otros mecanismos (campos fósiles, dinamos durante la evolución simple)?
- ¿Cómo afecta el **canibalismo planetario** o la **acreción de material circunstelar** a la generación de campos magnéticos?
- ¿Existe una **conexión evolutiva** entre las MWDs en binarias interactuantes y las MWDs aisladas masivas?





## 8. Mecanismos de Formación de Campos Magnéticos en Enanas Blancas

El origen de los campos magnéticos en enanas blancas sigue siendo un tema de investigación activa. Existen varios mecanismos propuestos, cada uno con sus ventajas y problemas observacionales.

### 8.1. Campos Fósiles

La hipótesis de campos fósiles propone que el magnetismo observado en enanas blancas es un remanente de campos preexistentes en sus estrellas progenitoras, que se conservan y amplifican durante la evolución estelar.

#### Fundamento Teórico

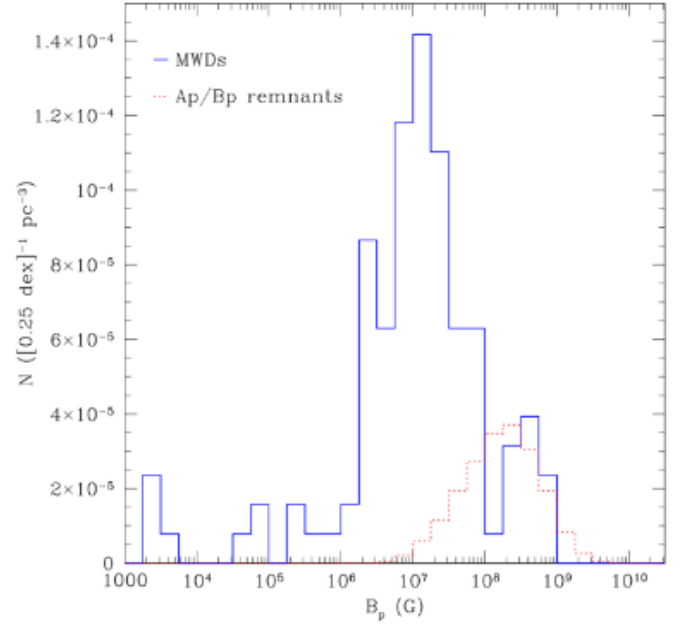
- **Conservación de Flujo Magnético:** Bajo la aproximación de congelación del flujo magnético en plasmas de alta conductividad, se espera que el flujo magnético ( $\Phi_B = \pi R^2 B$ ) se conserve durante el colapso:

$$B_{WD} = B_{progenitor} \times \left( \frac{R_{progenitor}}{R_{WD}} \right)^2$$

- **Amplificación por Contracción:** Dado que  $R_{WD} \sim 10^{-2} R_{progenitor}$ , los campos podrían amplificarse por un factor de  $\sim 10^4$ .
- **Estrellas Ap/Bp como Progenitoras:** Las estrellas de tipo espectral A y B con campos fuertes ( $B \sim 10^2 - 10^4$  G) tienen flujos magnéticos comparables a los de las MWDs más magnéticas.

#### Evidencia a Favor

- **Correspondencia de Flujos:** Los flujos magnéticos calculados para estrellas Ap/Bp coinciden notablemente con los observados en MWDs de campo fuerte.
- **Distribución de Campos:** La distribución continua de intensidades de campo en MWDs aisladas es consistente con un origen fósil.



Kawka & Vennes (2004)

**Fig. 7.** Comparación entre los flujos magnéticos de estrellas Ap/Bp y enanas blancas magnéticas. La conservación de flujo magnético podría explicar los campos más fuertes observados en MWDs. Adaptado de Ferrario & Wickramasinghe (2005) y Kawka & Vennes (2004).

- **Correlación Masa-Composición:** Las MWDs masivas muestran preferencia por atmósferas de Helio (DB) o carbono (DQ), consistente con la evolución de estrellas masivas progenitoras.

#### Problemas y Críticas

- **Problema de Tasas de Nacimiento:** La población conocida de estrellas Ap/Bp es insuficiente para explicar la fracción observada de MWDs ( $\sim 13 - 20\%$ ).
- **Distribución Espacial:** Las MWDs muestran una distribución en la Galaxia diferente a la esperada para remanentes de estrellas masivas.
- **Falta de Progenitoras Intermedias:** No se observa una población suficiente de estrellas post-AGB magnéticas que conecten evolutivamente las estrellas Ap/Bp con las MWDs.

### 8.2. Mecanismos Alternativos de Generación

Debido a los problemas con la hipótesis de campos fósiles, se han propuesto varios mecanismos alternativos.

#### Dinamos durante la Evolución Binaria

- **Dinamos de Fusión (Schreiber et al. 2021):** La fusión de dos enanas blancas puede generar:
  - Rotación diferencial extrema
  - Convección vigorosa durante la fase de mezcla
  - Campos magnéticos fuertes a través de mecanismos de dinamo
- **Dinamos de Acreción:** En variables cataclísmicas, la acreción de material puede:
  - Aumentar la tasa de rotación de la enana blanca (spin-up)
  - Generar cortantes en la superficie
  - Activar dinamos locales

## Dinamos durante la Evolución Aislada

- **Cristalización y Convección:** Durante la cristalización del núcleo de la enana blanca:
  - El líquido residual se enriquece en elementos ligeros
  - Se establece convección en la capa de transición
  - La combinación con rotación puede generar campos magnéticos
- **Dinamos Termohalinos:** Gradientes de composición durante el enfriamiento pueden driving movimientos convectivos que amplifican campos semilla.

### 8.3. Estado Actual del Debate

- **Consenso Emergente:** Probablemente existen **múltiples mecanismos** operando para diferentes subpoblaciones de MWDs.
- **MWDs de Campo Débil:** Podrían formarse principalmente por mecanismos de dinamo durante la evolución aislada o cristalización.
- **MWDs de Campo Fuerte:** Es más probable que se formen por fusiones binarias o sean remanentes de estrellas Ap/Bp.
- **MWDs en Binarias Interactuantes:** Los campos pueden ser generados o amplificados por procesos de acreción y transferencia de masa.

### 8.4. Implicaciones para Sistemas Binarios

- **Selección de Progenitoras:** Si los campos son fósiles, las binarias con MWDs deberían descender de sistemas con componentes magnéticas.
- **Evolución de CVs Magnéticas:** El mecanismo de formación afecta la distribución de períodos orbitales y las propiedades de acreción en variables cataclísmicas.
- **Detección de Fusiones:** Las MWDs formadas por fusiones podrían identificarse por sus masas elevadas y cinemática peculiar.

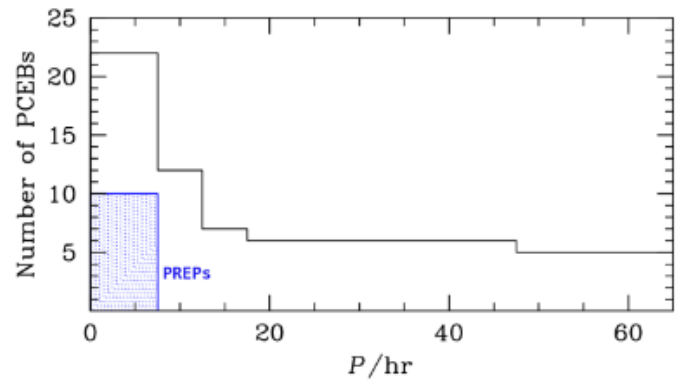
## Fusiones en Envoltente Común (Common Envelope Mergers)

Este mecanismo propone que las enanas blancas magnéticas se forman cuando dos núcleos estelares fusionan durante la fase de envoltente común, generando campos magnéticos a través de rotación diferencial.

### Evidencia Observacional a Favor

- **Escasez de Binarias MWD-MS:** Existen muchas binarias detached WD-MS, pero muy pocas MWD-MS, sugiriendo que las MWDs se forman por un mecanismo diferente.
- **Correlación Masa-Magnetismo:** Las MWDs tienen en promedio **mayor masa** que las no magnéticas, consistente con la fusión de dos núcleos.
- **Distribución Bimodal:** El pico de alta masa ( $\sim 0.8M_{\odot}$ ) en la distribución bimodal de masas de WDs coincide con la masa esperada para fusiones.
- **Períodos Orbitales Cortos:** Las binarias post-ASE magnéticas (PREPs) muestran **períodos orbitales más cortos** que sus contrapartes no magnéticas.

### Mecanismo Físico

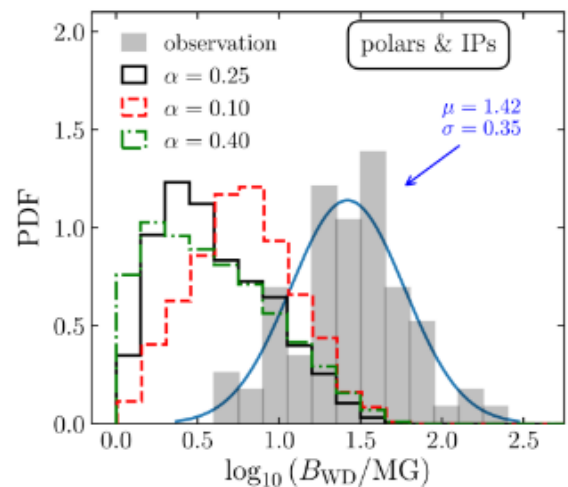


**Fig. 8.** (Arriba) Distribución de períodos orbitales para binarias post-ASE mostrando períodos más cortos para sistemas con enanas blancas magnéticas (PREPs). (Abajo) Comparación entre predicciones teóricas y observaciones de campos magnéticos en variables cataclísmicas. Adaptado de Ferrario et al. (2020) y Belloni & Schreiber (2020).

- **Fusión de Núcleos:** Durante la fase de envoltente común, los dos núcleos estelares pueden fusionarse en lugar de evolucionar por separado.
- **Rotación Diferencial:** La fusión produce rotación diferencial extrema entre las diferentes capas del objeto resultante.
- **Generación de Campo:** La rotación diferencial amplifica campos magnéticos semilla a través del mecanismo de  $\alpha - \Omega$  dinamo.
- **Congelación del Campo:** Una vez formada la enana blanca, el campo magnético se "congela" en el plasma de alta conductividad.

### Problemas y Discrepancias

- **Campos Demasiado Débiles:** Los cálculos detallados predicen campos magnéticos generalmente más débiles que los observados.
- **Sobreproducción de MCVs:** Los modelos predicen muchas más variables cataclísmicas magnéticas (MCVs) y binarias post-ASE magnéticas (MPCEBs) de las que se observan.
- **Inconsistencias con Parámetros de ASE:** Diferentes valores del parámetro de eficiencia de envoltente común ( $\alpha$ ) no reproducen satisfactoriamente las distribuciones observadas.



**Fig. 9.**

8.5. Síntesis de los Mecanismos de Formación

**Table 5.** Comparación de los mecanismos de formación de campos magnéticos en enanas blancas

Mecanismo	Evidencia a Favor	Problemas	Princi- pales
<b>Campos Fósiles</b>	Correspondencia de flujos magnéticos	Tasas de nacimiento incompatibles	de in-
	Distribución continua de campos	Falta de progenitoras intermedias	
<b>Fusiones en Envoltente Común</b>	MWDs más masivas	Campos predichos demasiado débiles	
	Períodos orbitales cortos en PREPs	Sobreproducción de MCVs/MPCEBs	
	Explica bimodalidad de masas		
<b>Dinamos de Cristalización</b>	Explica MWDs de campo débil	No explica campos muy fuertes	
	Consistente con enfriamiento de WDs	Mecanismo poco verificado	

8.6. Implicaciones para la Evolución de Binarias

Para Binarias Post-ASE

- **Sobrevivencia del Sistema:** Las fusiones completas destruyen el sistema binario, mientras que las fusiones parciales pueden producir binarias ultracercanas.
- **Distribución de Períodos:** La preferencia por períodos cortos en PREPs sugiere que el mecanismo de formación magnética está vinculado a interacciones binarias muy cercanas.
- **Selección Observacional:** Los sistemas con MWDs pueden ser más fáciles de detectar en ciertos rangos de parámetros orbitales.

Para Variables Cataclísmicas

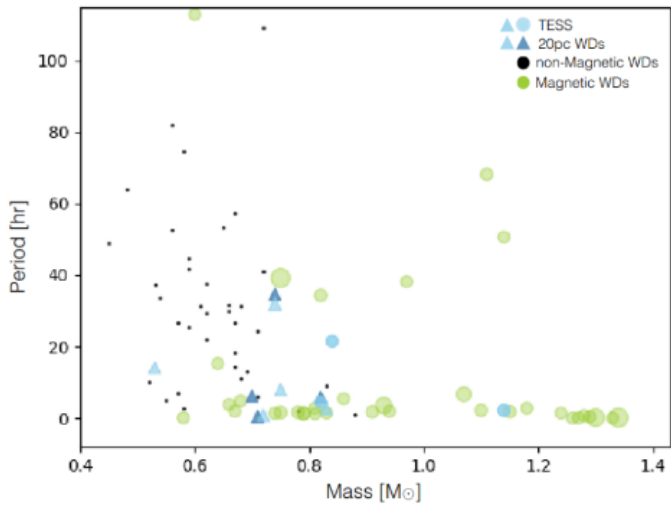
- **Evolución de MCVs:** El mecanismo de formación afecta la distribución esperada entre Polares e Intermedios.
- **Tasas de Detección:** La posible sobreproducción teórica de MCVs sugiere que nuestros modelos de evolución binaria necesitan refinamiento.
- **Problema del Período de Brecha:** La presencia de magnetismo puede influir en la evolución a través del período de brecha en CVs.

8.7. Perspectivas Futuras

- **Estudios Poblacionales:** Surveys como Gaia, SDSS-V, y LSST proporcionarán muestras estadísticas mucho mayores de MWDs en diferentes entornos.
- **Modelos Numéricos Mejorados:** Simulaciones hidrodinámicas más realistas de fusiones en envoltente común con tratamiento MHD.
- **Datos Astrosísmicos:** Observaciones de TESS y futuras misiones para estudiar la estructura interna de MWDs a través de astrosismología.
- **Censos Completos de Binarias:** Identificación sistemática de binarias MWD-MS para constreñir mejor las tasas de formación.

Fusiones Post-Envoltente Común y Dinamos de Cristalización

Este mecanismo combina procesos de evolución aislada con interacciones binarias, proponiendo que los campos magnéticos fuertes se generan después de la fase de envoltente común a través de dinamos activados por cristalización y acreción.



**Fig. 10.** Distribución de períodos de rotación para enanas blancas magnéticas y no magnéticas. Las MWDs tienden a rotar más rápido, pero existe una población significativa con rotación lenta. Adaptado de Hernández et al. (2024).

Mecanismo de Schreiber et al. (2021) El modelo propone una secuencia específica de eventos para la formación de MWDs en variables cataclísmicas:

1. **Fase de Envoltente Común:** El sistema binario experimenta la fase de ASE, pero sin fusión inmediata.
2. **Enfriamiento y Cristalización:** La enana blanda resultante se enfría, comenzando la cristalización de su núcleo de carbono-oxígeno.
3. **Convección por Cristalización:** Durante la cristalización, el líquido residual se enriquece en elementos ligeros, estableciendo convección en la capa de transición.
4. **Inicio de la Acreción:** Cuando comienza la transferencia de masa en la fase de variable cataclísmica, el material acrecido produce un **spin-up** de la enana blanda.
5. **Activación del Dinamo:** La combinación de:
  - Convección por cristalización



- Rotación rápida inducida por acreción
  - Cortantes rotacionales
- activa un dinamo que genera campos magnéticos fuertes.

#### Evidencia Observacional

- **Rotación Más Rápida:** Las MWDs muestran en promedio **períodos de rotación más cortos** que las enanas blancas no magnéticas.
- **Distribución Bimodal de Rotación:** Existen dos poblaciones de MWDs:
  - Una población de **rotación rápida** (consistentes con el modelo de dinamo)
  - Una población de **rotación lenta** (sugiriendo otros mecanismos)
- **Correlación con Cristalización:** La mayor frecuencia de MWDs en rangos de temperatura donde se espera cristalización apoya el mecanismo.

#### Predicciones del Modelo

- **MWDs en CVs:** Las variables cataclísmicas magnéticas deberían ser predominantemente sistemas donde la acreción comenzó después del inicio de la cristalización.
- **Correlación Edad-Campo:** La intensidad del campo magnético debería correlacionarse con el estado de cristalización de la enana blanca.
- **Evolución Temporal:** Los campos magnéticos podrían fortalecerse con el tiempo a medida que avanza la cristalización y continúa la acreción.

#### Problemas y Limitaciones

- **Población de Rotación Lenta:** La existencia de MWDs con rotación lenta es difícil de explicar con este mecanismo.
- **Tiempos Característicos:** Los tiempos de cristalización y enfriamiento pueden no coincidir con los tiempos de inicio de la acreción en todos los sistemas.
- **MWDs Aisladas:** No explica satisfactoriamente las MWDs aisladas que nunca experimentaron acreción.

#### 8.8. Estado Actual del Debate: Una Síntesis

#### 8.9. Implicaciones para el Estudio de Binarias Compactas

##### Para la Evolución de Variables Cataclísmicas

- **Selección de Progenitoras:** Diferentes mecanismos de formación predicen diferentes distribuciones iniciales de parámetros orbitales.
- **Evolución de MCVs:** El mecanismo de formación afecta la relación esperada entre Polares e Intermedios.
- **Problema del Período Mínimo:** La presencia de magnetismo puede influir en la evolución a través del período mínimo en CVs.

##### Para Binarias de Ondas Gravitacionales

- **Fusiones de MWDs:** Las MWDs formadas por diferentes mecanismos pueden tener diferentes distribuciones de masa y espín, afectando las señales de ondas gravitacionales.
- **Progenitores de SNe Ia:** El magnetismo puede influir en la estabilidad de enanas blancas masivas cercanas al límite de Chandrasekhar.

**Table 6.** Síntesis de los mecanismos de formación de campos magnéticos en enanas blancas

Mecanismo	MWDs Expli- cadas	Evidencia Principal	Problemas
<b>Campos Fósiles</b>	MWDs aisladas de campo fuerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Conservación de flujo</li> <li>– Campos muy fuertes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tasas de nacimiento</li> <li>– Progenitoras</li> </ul>
<b>Fusiones en ASE</b>	MWDs masivas en PREPs	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mayor masa</li> <li>– Períodos cortos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Campos débiles</li> <li>– Sobreproducción</li> </ul>
<b>Dinamo Post-ASE</b>	MCVs y CVs magnéticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Rotación rápida</li> <li>– Cristalización</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Rotación lenta</li> <li>– MWDs aisladas</li> </ul>
<b>Múltiples Mecanismos</b>	<b>Todas las poblaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Explica diversidad</li> <li>– Consistente con datos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Complejidad</li> <li>– Parámetros libres</li> </ul>

#### Para Estudios Poblacionales

- **Sesgos Observacionales:** Diferentes mecanismos de formación producen MWDs con diferentes propiedades observables, introduciendo sesgos en los censos.
- **Evolución Química Galáctica:** Las MWDs formadas por diferentes mecanismos pueden contribuir diferentemente al enriquecimiento químico del medio interestelar.

#### 8.10. Perspectivas Futuras y Pruebas Clave

- **Datos de TESS y PLATO:** Estudios astrosísmicos de grandes muestras de MWDs para medir masas, edades, y estados de rotación con precisión.
- **Surveys Espectropolarimétricos:** Observaciones sistemáticas de campos magnéticos en grandes muestras de binarias post-ASE.
- **Simulaciones MHD:** Modelos numéricos realistas de fusiones binarias con tratamiento completo de magnetohidrodinámica.
- **Censos de Gaia:** Identificación de grandes muestras de MWDs en diferentes entornos galácticos para estudiar dependencias poblacionales.
- **Estudios de Rotación:** Mediciones sistemáticas de períodos de rotación para MWDs en diferentes tipos de sistemas binarios.

8.11. Paradigma Unificador: Campos Magnéticos que Llegan "Tarde"

El trabajo reciente ha convergido en un paradigma unificador donde los campos magnéticos en enanas blancas se generan predominantemente durante etapas avanzadas de su evolución, resolviendo muchas de las tensiones entre los diferentes mecanismos propuestos.

El Paradigma de Campos "Tardíos"

- **Evidencia Observacional Clave:** La fracción de enanas blancas magnéticas **aumenta con la edad** de la enana blanca, sugiriendo que el magnetismo se desarrolla durante la fase de enfriamiento.
- **Unificador de Mecanismos:** Este paradigma puede incorporar elementos de múltiples mecanismos:
  - Cristalización del núcleo (Schreiber et al. 2021, 2023)
  - Dinamos inducidos por acreción (Schreiber & Belloni 2025)
  - Fusiones binarias tardías (Camisassa et al. 2024)
- **Resolución de Problemas:** Explica naturalmente por qué:
  - Hay pocas MWDs jóvenes calientes
  - La fracción de MWDs aumenta con el tiempo de enfriamiento
  - Existe diversidad en las propiedades de rotación

Implicaciones para Diferentes Poblaciones

Resolución de Problemas Anteriores

Problema de Tasas de Nacimiento

- **Solución:** Si los campos se generan "tarde", no necesitamos que todas las progenitoras Ap/Bp sobrevivan hasta la fase de WD.
- **Implicación:** La población de MWDs se construye con el tiempo, no está fija al nacimiento.

Problema de Sobreproducción en Fusiones

- **Solución:** Solo una fracción de las fusiones genera campos fuertes, dependiendo de parámetros específicos (masas, rotación, etc.).
- **Implicación:** Las fusiones son necesarias pero no suficientes para explicar toda la población.

Problema de Rotación en MWDs

- **Solución:** Diferentes mecanismos de generación "tardía" producen diferentes perfiles de rotación.
- **Implicación:** La diversidad observada refleja diferentes historias de formación.

8.12. Consecuencias para la Evolución de Variables Cataclísmicas

El paradigma de campos "tardíos" tiene implicaciones profundas para nuestra comprensión de la evolución de variables cataclísmicas, resolviendo varios problemas de larga data.

Problema del Período de Brecha

- **Contexto:** Existe una escasez de CVs en el rango de períodos 2-3 horas.

Table 7. El paradigma de campos "tardíos" aplicado a diferentes poblaciones de enanas blancas

Población	Mecanismo Dominante	Evidencia
MWDs Aisladas	Cristalización + dinamo termohalino	<ul style="list-style-type: none"><li>- Aumento de fracción con edad</li><li>- Correlación con temperatura</li></ul>
MWDs en CVs	Acreción + dinamo rotacional	<ul style="list-style-type: none"><li>- Rotación más rápida</li><li>- Correlación con tasa de acreción</li></ul>
MWDs en Binarias Wide	Fusiones tardías o dinamos intrínsecos	<ul style="list-style-type: none"><li>- Distribución bimodal de masas</li><li>- Períodos orbitales característicos</li></ul>
MWDs Masivas	Combinación de mecanismos	<ul style="list-style-type: none"><li>- Múltiples líneas de evidencia</li><li>- Propiedades diversas</li></ul>

- **Solución:** Si el magnetismo se desarrolla durante la evolución, puede influir en la transición a través del período de brecha.
- **Mecanismo:** Los campos magnéticos emergentes pueden:
  - Alterar la eficiencia de la pérdida de momento angular
  - Afectar la estabilidad del disco de acreción
  - Modificar las tasas de transferencia de masa

Distribución de Polares vs. Intermedios

- **Contexto:** Los Polares (campos fuertes) e Intermedios (campos débiles) muestran distribuciones diferentes.
- **Solución:** La intensidad del campo magnético puede evolucionar con el tiempo.
- **Mecanismo:** Un sistema puede comenzar como no magnético, luego Intermedio, y finalmente Polar a medida que el campo se fortalece.

Problema de la Masa de la Enana Blanca

- **Contexto:** Las MWDs en CVs son sistemáticamente más masivas.
- **Solución:** El desarrollo "tardío" del campo puede estar relacionado con la masa.
- **Mecanismo:** Las WDs más masivas:
  - Cristalizan más temprano

- Tienen gravedades superficiales más altas
- Pueden desarrollar campos más fácilmente

### 8.13. Preguntas Abiertas Críticas

A pesar del poder unificador del paradigma de campos "tardíos", quedan preguntas fundamentales por responder:

#### Preguntas Observacionales

- **¿Cuál es la dependencia exacta fracción-MWD vs. edad?** Se necesitan muestras grandes y bien caracterizadas.
- **¿Existe una temperatura crítica para el desarrollo del campo?** Esto discriminaría entre mecanismos específicos.
- **¿Cómo evolucionan los campos magnéticos individuales con el tiempo?** Se requieren observaciones multi-época.

#### Preguntas Teóricas

- **¿Cuál es el mecanismo físico exacto?** Los trabajos recientes (Schreiber et al. 2023, Camisassa et al. 2024) aún no identifican el proceso fundamental.
- **¿Cómo interactúan múltiples mecanismos?** Es probable que diferentes procesos operen en diferentes sistemas.
- **¿Cuáles son los campos semilla necesarios?** Se desconoce el origen de los campos iniciales que luego se amplifican.

#### Preguntas sobre Binarias

- **¿Cómo afecta la compañera al desarrollo del campo?** La transferencia de masa y las interacciones tidal pueden influir.
- **¿Existe correlación entre el tipo espectral de la compañera y el magnetismo?** Esto revelaría dependencias evolutivas.
- **¿Cómo afecta el magnetismo a la supervivencia de los sistemas binarios?** Los campos pueden influir en la estabilidad orbital.

### 8.14. Perspectivas Futuras

- **Surveys de Gran Área:** LSST, SDSS-V, y 4MOST proporcionarán muestras estadísticas sin precedentes de MWDs en todos los estados evolutivos.
- **Estudios de Variabilidad:** TESS, PLATO, y futuras misiones medirán rotación y actividad en grandes muestras.
- **Espectropolarimetría:** Instrumentos como ESPRESSO y futuros espectropolarímetros en telescopios extremadamente grandes permitirán mapear campos con precisión.
- **Simulaciones Numéricas:** Modelos MHD realistas de cristalización, acreción, y fusiones para probar mecanismos específicos.
- **Astrosismología:** El estudio de pulsaciones en MWDs puede revelar su estructura interna y estado de cristalización.

## 9. Conclusión

El estudio de las enanas blancas magnéticas ha evolucionado desde la mera clasificación hacia la comprensión de su formación y evolución. El paradigma emergente de campos magnéticos que "llegan tarde" unifica observaciones diversas y resuelve tensiones de larga data, particularmente en el contexto de sistemas binarios. Sin embargo, el mecanismo físico fundamental

permanece esquivo, haciendo de este un campo vibrante de investigación con prometedoras perspectivas futuras.

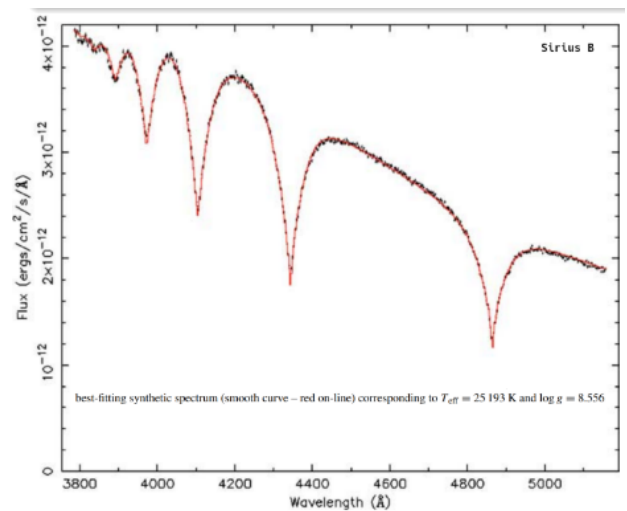
La conexión íntima entre el magnetismo de enanas blancas y la evolución de binarias subraya la importancia de este tema para su formación en estrellas binarias, demostrando cómo problemas aparentemente especializados iluminan procesos físicos fundamentales en astrofísica.

## 10. Fundamentos de Enanas Blancas

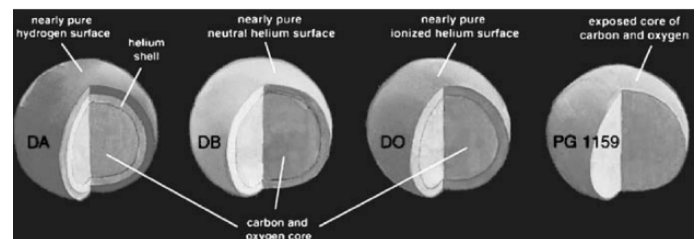
Las enanas blancas (WDs) representan la etapa final de la evolución estelar para la mayoría de las estrellas, constituyendo uno de los objetos más comunes en la Galaxia. Su estudio es fundamental para entender la evolución estelar y la física de materia en condiciones extremas.

### 10.1. Estructura y Composición

Las enanas blancas son remanentes estelares sostenidos por la presión de degeneración de electrones, con masas típicas entre  $0.6\text{--}1.0\ M_{\odot}$  y radios similares al terrestre ( $\sim 10^3\text{ km}$ ).



**Fig. 11.** (Arriba) Espectro observado y modelo teórico de una enana blanca DA mostrando el ajuste para  $T_{\text{eff}} = 25,193\text{ K}$  y  $\log g = 8.556$ . (Abajo) Estructura esquemática de diferentes tipos de enanas blancas según su composición atmosférica. Adaptado de Barstow et al. (2005).



**Fig. 12.**

#### Estructura Interna Típica

- **Núcleo:** Compuesto principalmente de carbono y oxígeno (para WDs de masa intermedia), sostenido por presión de degeneración electrónica.
- **Capa Externa:** Puede estar compuesta de helio (DB, DO) o hidrógeno (DA), dependiendo de la historia evolutiva.

- **Atmósfera:** Una capa muy delgada que determina el tipo espectral y las propiedades observables.

## 10.2. Clasificación por Composición Atmosférica

La clasificación espectral de las enanas blancas refleja principalmente la composición de sus atmósferas, que a su vez depende de su historia evolutiva.

**Table 8.** Estructura y composición de los principales tipos de enanas blancas

Tipo	Composición Atmosférica	Estructura Interna y Características
DA	Atmósfera de hidrógeno casi puro	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Líneas de Balmer prominentes</li> <li>– Capa de helio neutro subyacente</li> <li>– 80% de todas las WDs</li> </ul>
DB	Atmósfera de helio neutro	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Líneas de He I visibles</li> <li>– Sin hidrógeno detectable</li> <li>– Formadas por pérdida de capa de H</li> </ul>
DO	Atmósfera de helio ionizado	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Líneas de He II fuertes</li> <li>– Fase evolutiva temprana y caliente</li> <li>– Pueden evolucionar a DB al enfriarse</li> </ul>
PG 1159	Atmósfera mixta He-C-O	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Núcleo expuesto de C/O</li> <li>– Estrellas muy calientes post-AGB</li> <li>– Predecesoras de algunas DO/DB</li> </ul>
DQ	Presencia de carbono	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Características atómicas o moleculares de C</li> <li>– Pueden indicar mezcla de capas</li> <li>– Relacionadas con WDs masivas</li> </ul>

## 10.3. Determinación de Parámetros Físicos

### Ajuste de Modelos Atmosféricos

Como muestra la Figura 11, los parámetros fundamentales se determinan mediante el ajuste de espectros sintéticos a observaciones:

- **Temperatura Efectiva ( $T_{\text{eff}}$ ):** Controla la forma del continuo espectral y la ionización de los elementos.
- **Gravedad Superficial ( $\log g$ ):** Afecta el ensanchamiento de las líneas espectrales por presión.
- **Composición Química:** Determina qué líneas espectrales están presentes y su intensidad.

### Ejemplo: Análisis del Espectro

Para el espectro mostrado en la Figura 11:

$$T_{\text{eff}} = 25,193 \text{ K}, \quad \log g = 8.556$$

Estos valores corresponden a una enana blanca de masa intermedia ( $\sim 0.7 M_{\odot}$ ) en etapas tempranas de enfriamiento.

## 10.4. Implicaciones para Sistemas Binarios

### Historia Evolutiva Revelada

La composición atmosférica de una enana blanda en un sistema binario proporciona información crucial sobre su historia:

- **Transferencia de Masa:** Las WDs con atmósferas de hidrógeno (DA) en sistemas donde se esperaría helio pueden indicar transferencia de masa desde la compañera.
- **Pérdida de Capas:** La transición DO  $\rightarrow$  DB  $\rightarrow$  DA puede revelar episodios de pérdida de masa o mezcla.
- **Contaminación:** La presencia de metales (tipos DZ) indica acreción reciente de material planetario o de la compañera.

### Consecuencias para la Evolución Binaria

- **Variables Cataclísmicas:** La composición de la WD afecta la física de la acreción y las explosiones termonucleares.
- **Supernovas Tipo Ia:** Las WDs masivas con composiciones específicas son candidatas a progenitores.
- **Binarias Post-ASE:** La estructura de capas determina cómo responde la WD a la interacción con la compañera.

## 10.5. Procesos Físicos Fundamentales

### Enfriamiento y Cristalización

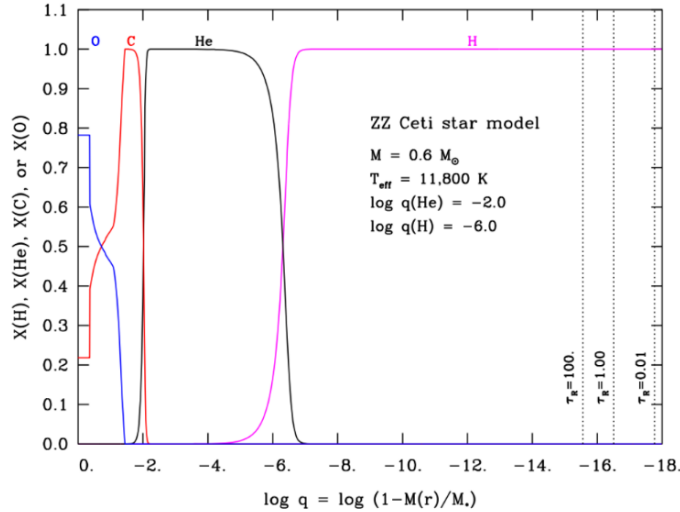
- **Secuencia de Enfriamiento:** Las WDs siguen trayectorias predecibles en el diagrama HR a medida que se enfrían.
- **Cristalización del Núcleo:** A  $T_{\text{eff}} \sim 6,000 - 12,000 \text{ K}$ , el núcleo de C/O comienza a cristalizar, liberando calor latente.
- **Sedimentación Gravitatoria:** Los elementos pesados se hunden rápidamente, haciendo que la detección de metales implique acreción reciente.

### Límites Fundamentales

- **Límite de Chandrasekhar:**  $\sim 1.4 M_{\odot}$  - masa máxima sostenible por presión de degeneración.
- **Límite de Masa Inferior:**  $\sim 0.45 M_{\odot}$  - mínima masa para ignición de He.
- **Masa de Ejemplo:**  $\log g = 8.556$  corresponde a  $M \approx 0.75 M_{\odot}$ .

## 10.6. Estructura Interna Detallada y Modelos

La estructura interna de las enanas blancas determina no solo sus propiedades observables, sino también su evolución térmica y la posible generación de campos magnéticos. Los modelos detallados permiten entender la distribución de elementos y los procesos de transporte.



**Fig. 13.** Modelo de estructura interna de una estrella ZZ Ceti (DA variable) mostrando la distribución de elementos químicos y parámetros físicos en función de la masa interior. Se observan las capas de hidrógeno y helio, así como el núcleo de carbono-oxígeno.

### Parámetros del Modelo Mostrado

**Table 9.** Parámetros del modelo de estrella ZZ Ceti mostrado en la Figura 13

Parámetro	Valor
Masa total	$M = 0.6 M_{\odot}$
Temperatura efectiva	$T_{\text{eff}} = 11,800 \text{ K}$
Masa de la capa de He	$\log q(\text{He}) = -2.0$
Masa de la capa de H	$\log q(\text{H}) = -6.0$
Coordenada de masa	$\log q = \log(1 - M_r/M_*)$

### Interpretación de la Estructura

- **Capa de Hidrógeno:** Muy delgada ( $q(\text{H}) = 10^{-6}$ ), típica de enanas blancas DA. Esta delgadez explica por qué pequeñas cantidades de acreción pueden alterar significativamente la composición atmosférica.
- **Capa de Helio:** Más masiva ( $q(\text{He}) = 10^{-2}$ ), actuando como buffer entre la capa de H y el núcleo de C/O.
- **Núcleo de C/O:** Constituye la mayor parte de la masa, en estado degenerado y comenzando el proceso de cristalización a esta temperatura.

## 10.7. Estrellas ZZ Ceti y Astrosismología

Las estrellas ZZ Ceti son enanas blancas DA pulsantes que permiten estudiar su estructura interna a través de la astrosismología.

## Características de las ZZ Ceti

- **Banda de Inestabilidad:** Se encuentran en un rango estrecho de temperaturas  $T_{\text{eff}} \approx 11,000 - 12,500 \text{ K}$  donde mecanismos de excitación pulsacional se activan.
- **Tipos de Pulsaciones:** Exhiben pulsaciones no radiales de modo g (gravity modes) sensibles a la estructura interna.
- **Importancia para Modelos:** Las frecuencias de pulsación proporcionan restricciones precisas sobre:
  - El espesor de las capas de H y He
  - El perfil de composición química
  - El estado de cristalización del núcleo
  - La tasa de enfriamiento

## Aplicación del Modelo Mostrado

Para el modelo de la Figura 13:

- La delgada capa de H ( $q \sim 10^{-6}$ ) es consistente con enanas blancas DA que han experimentado cierta pérdida de masa.
- La capa de He de espesor intermedio ( $q \sim 10^{-2}$ ) sugiere una evolución típica de estrella de masa intermedia.
- La temperatura de 11,800 K coloca esta WD justo en la banda de inestabilidad de las ZZ Ceti.

## 10.8. Procesos de Transporte en Enanas Blancas

### Sedimentación Gravitatoria

- **Mecanismo:** En el fuerte campo gravitatorio ( $\log g \sim 8$ ), los elementos más pesados que el helio sedimentan rápidamente hacia el interior.
- **Escalas de Tiempo:** Típicamente  $10^4 - 10^6$  años para elementos como Ca, Fe, Si.
- **Implicación Observacional:** La detección de metales en atmósferas de WDs frías implica acreción reciente o continua.

### Difusión y Separación Elemental

- **Difusión Radiativa:** Los fotones pueden impulsar elementos hacia la superficie contra la gravedad.
- **Separación por Gravedad:** Conduce a la estratificación química mostrada en la Figura 13.
- **Convección:** En WDs DA, una zona convectiva superficial se desarrolla a  $T_{\text{eff}} < 15,000 \text{ K}$ , afectando el transporte de elementos.

## 10.9. Relación con el Magnetismo

La estructura interna detallada es crucial para entender los posibles mecanismos de generación de campos magnéticos discutidos anteriormente.

### Cristalización y Dinamos

- **Convección por Cristalización:** Cuando el núcleo de C/O cristaliza, el líquido residual se enriquece en elementos ligeros, estableciendo convección.
- **Dinamo Termohalino:** La combinación de gradientes de composición y temperatura puede driving movimientos convectivos que amplifican campos magnéticos.
- **Relevancia del Modelo:** A  $T_{\text{eff}} = 11,800 \text{ K}$ , esta WD está comenzando la cristalización, potencialmente activando mecanismos de dinamo.



## Capas Superficiales y Campos Magnéticos

- **Acoplamiento Superficie-Interior:** Las delgadas capas atmosféricas pueden estar acopladas magnéticamente con regiones convectivas más profundas.
- **Efectos en Pulsaciones:** Los campos magnéticos pueden afectar las frecuencias y amplitudes de pulsación en estrellas ZZ Ceti.

### 10.10. Implicaciones para Sistemas Binarios

#### Transferencia de Masa y Estructura

- **Acreción de Hidrógeno:** En variables cataclísmicas, la acreción continua puede alterar el espesor de la capa de H, afectando la evolución térmica.
- **Mezcla de Capas:** Eventos de nova pueden mezclar material de diferentes capas, alterando la composición superficial.
- **Erosión de Capas:** En sistemas con alta tasa de acreción, las capas externas pueden erosionarse, exponiendo capas de helio o carbono.

#### Binarias Post-ASE y Estructura

- **Pérdida de Masa:** La fase de envolvente común puede eliminar parte de las capas externas, afectando la estructura final de la WD.
- **Calentamiento por Compresión:** La rápida pérdida de masa puede comprimir y calentar el remanente, alterando su evolución térmica.

### 10.11. Modelos Numéricos y Predicciones

Los modelos de estructura como el mostrado se calculan resolviendo las ecuaciones de estructura estelar adaptadas para materia degenerada:

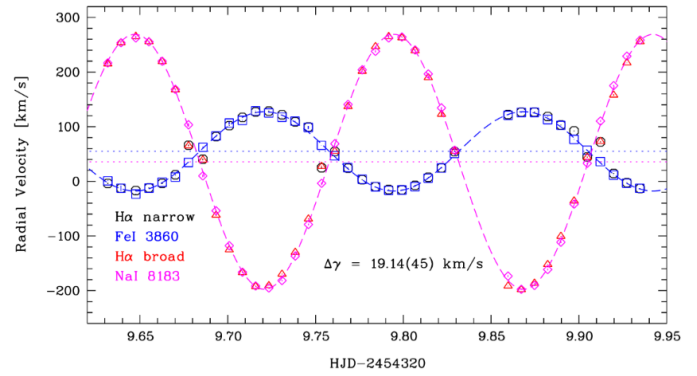
- **Ecuación de Estado:** Se utiliza una ecuación de estado para materia degenerada que considera efectos cuánticos.
- **Opacidades:** Dependen críticamente de la composición química en cada capa.
- **Transporte de Energía:** Combinación de radiación, conducción electrónica (dominante en interiores degenerados) y convección.
- **Evolución Temporal:** Los modelos de enfriamiento predicen cómo cambia la estructura con el tiempo.

## 11. Efectos Relativistas en Binarias Compactas

En sistemas binarios que contienen objetos compactos como enanas blancas, los fuertes campos gravitatorios producen efectos observables que permiten medir parámetros fundamentales del sistema y verificar predicciones de la relatividad general.

### 11.1. El Sistema LTT 560: Un Laboratorio para Efectos Gravitatorios

LTT 560 es una binaria post-ASE que contiene una enana blanca DA y una estrella M5.5V, proporcionando un sistema ideal para estudiar los efectos del fuerte campo gravitatorio de la enana blanca.



**Fig. 14.** Curvas de velocidad radial para el sistema LTT 560 mostrando la diferencia en la velocidad gamma ( $\Delta\gamma$ ) entre las componentes, causada por el fuerte campo gravitatorio de la enana blanca. Adaptado de Tappert et al. (2007).

**Table 10.** Parámetros orbitales y físicos de LTT 560

Parámetro	Valor
Tipo de sistema	Binaria Post-ASE detached
Período orbital	$P_{\text{orb}} = 3.54 \text{ h}$
Componente primaria	Enana blanca DA
Componente secundaria	Estrella M5.5V
Mecanismo de acreción	Acreción por viento estelar
Diferencia en $\gamma$	$\Delta\gamma = 19.14 \pm 0.45 \text{ km/s}$

#### Parámetros del Sistema

### 11.2. El Efecto de la Velocidad Gamma Diferencial

#### Fundamento Físico

La diferencia en la velocidad gamma ( $\Delta\gamma$ ) entre las dos componentes de un sistema binario surge debido a que estamos midiendo las velocidades en diferentes potenciales gravitatorios:

- **Potencial Gravitatorio Fuerte:** La enana blanca tiene  $\log g \sim 8$ , correspondiente a un potencial gravitatorio  $\Phi_{\text{WD}} \sim -GM_{\text{WD}}/R_{\text{WD}}$ .
- **Corrimiento al Rojo Gravitatorio:** Los fotones emitidos desde la superficie de la WD sufren un corrimiento al rojo:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\Phi}{c^2} = \frac{GM_{\text{WD}}}{c^2 R_{\text{WD}}}$$

- **Velocidad Gamma Aparente:** Este corrimiento se manifiesta como una velocidad radial aparente:

$$v_{\gamma, \text{WD}} \approx \frac{GM_{\text{WD}}}{cR_{\text{WD}}}$$

#### Cálculo para LTT 560

Para una enana blanca típica con  $M_{\text{WD}} \approx 0.7M_{\odot}$  y  $R_{\text{WD}} \approx 0.012R_{\odot}$ :

$$v_{\gamma, \text{WD}} \approx \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 1.4 \times 10^{30}}{3 \times 10^8 \times 8.4 \times 10^6} \approx 37 \text{ km/s}$$

El valor observado de  $\Delta\gamma = 19.14 \text{ km/s}$  es consistente con este cálculo considerando la geometría del sistema y otros efectos.

### 11.3. Implicaciones para la Determinación de Masas

#### Correcciones Relativistas

- **Masa Dinámica:** Sin correcciones relativistas, las masas derivadas de las curvas de velocidad radial estarían sistemáticamente sesgadas.
- **Corrección de Primer Orden:** La velocidad gamma medida debe corregirse por el efecto gravitatorio antes de calcular las masas:

$$K_{\text{corregido}} = K_{\text{observado}} - \Delta\gamma_{\text{gravitatorio}}$$

- **Precisión en Binarias Compactas:** En sistemas con períodos cortos y componentes compactas, estas correcciones son esenciales para obtener masas precisas.

#### Aplicación a LTT 560

- La diferencia en  $\gamma$  permite verificar independientemente la masa de la enana blanda.
- Proporciona una restricción adicional en la solución orbital.
- Permite estimar el radio de la enana blanda combinado con mediciones de  $\log g$ .

### 11.4. Otros Efectos Relativistas en Binarias Compactas

#### Avance del Periastro

- **Efecto:** En órbitas excéntricas, el punto de máximo acercamiento (periastro) precede.
- **Fórmula:** Para órbitas de baja excentricidad:

$$\dot{\omega} = \frac{6\pi GM}{c^2 a(1 - e^2)P}$$

- **Relevancia:** Medible en binarias de enanas blancas con períodos cortos y órbitas excéntricas.

#### Dilatación del Tiempo Gravitatorio

- **Efecto:** Los relojes en potenciales gravitatorios fuertes avanzan más lentamente.
- **Aplicación:** Afecta el período orbital medido y las curvas de luz de sistemas eclipsantes.
- **Ejemplo:** En binarias de púlsares, este efecto es medible con alta precisión.

#### Emisión de Ondas Gravitacionales

- **Mecanismo:** Sistemas binarios compactos pierden energía mediante la emisión de ondas gravitacionales.
- **Tasa de Cambio Orbital:**

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{96\pi}{5c^5} \left( \frac{2\pi G}{P} \right)^{5/3} \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^{1/3}}$$

- **Relevancia para LTT 560:** Aunque pequeño para este sistema, es significativo en binarias más compactas.

### 11.5. Aplicaciones a Diferentes Tipos de Binarias

#### Binarias con Enanas Blancas Magnéticas

- **MWDs en CVs:** El efecto  $\Delta\gamma$  permite medir masas independientemente de los métodos espectroscópicos tradicionales.
- **Polares:** La sincronización spin-órbita afecta la interpretación de las curvas de velocidad radial.
- **Intermedios:** La rotación rápida de la WD introduce efectos Doppler adicionales.

#### Binarias con Estrellas de Neutrones

- **Efectos Más Extremos:**  $\Delta\gamma$  puede alcanzar cientos de km/s debido a la mayor compactidad.
- **Púlsares:** Permiten mediciones de timing extremadamente precisas de efectos relativistas.
- **Probes de Relatividad:** Sistemas como el Púlsar Binario Hulse-Taylor verifican predicciones de la relatividad general.

#### Binarias con Agujeros Negros

- **Corrimientos al Rojo Extremos:**  $\Delta\gamma$  puede proporcionar evidencia indirecta de la existencia del horizonte de eventos.
- **Sistemas de Rayos X:** Permiten estudiar efectos relativistas en discos de acreción.

### 11.6. Metodologías Observacionales

#### Espectroscopía de Alta Precisión

- **Líneas Específicas:** Como se muestra en la Figura 14, se utilizan diferentes líneas ( $H\alpha$ , Fe I, Na I) para trazar cada componente.
- **Estabilidad Instrumental:** Requiere espectrógrafos de alta estabilidad para detectar diferencias de 20 km/s.
- **Correcciones Tellúricas:** Es esencial corregir por absorción atmosférica terrestre.

#### Técnicas Combinadas

- **Espectroscopía + Fotometría:** Combinar curvas de velocidad radial con curvas de luz de eclipses.
- **Astrometría:** Futuras misiones como Gaia mejorarán significativamente las mediciones astrométricas de binarias.
- **Timing:** Para sistemas con pulsaciones o púlsares.

### 11.7. Perspectivas Futuras

- **Surveys de Gran Precisión:** WEAVE, 4MOST, y ESPRESSO permitirán mediciones de  $\Delta\gamma$  en grandes muestras.
- **Binarias Ultracercanas:** Sistemas con períodos menores a 1 hora mostrarán efectos relativistas más pronunciados.
- **Ondas Gravitacionales:** LISA detectará binarias de enanas blancas y proporcionará mediciones independientes de masas y distancias.
- **Pruebas de Teorías de Gravedad:** Las binarias compactas son laboratorios ideales para probar desviaciones de la relatividad general.

## 12. Fundamentos Físicos de las Enanas Blancas

Las enanas blancas representan el estado final de la evolución estelar para la mayoría de las estrellas, donde la gravedad es contrarrestada no por reacciones termonucleares, sino por la presión de degeneración de electrones, un efecto puramente cuántico.

### 12.1. El Principio de Exclusión de Pauli y la Presión de Degeneración

#### Fundamento Mecánico-Cuántico

- **Principio de Exclusión de Pauli:** Dos fermiones idénticos (como electrones) no pueden ocupar el mismo estado cuántico.



**Fig. 15.** Ilustración del principio de incertidumbre de Heisenberg aplicado a electrones en una enana blanca. La pequeña  $\Delta x$  implica un grande  $\Delta p$ , generando la presión de degeneración.

#### – Principio de Incertidumbre:

$$\Delta x \Delta p > \hbar$$

En una enana blanca,  $\Delta x$  es pequeño debido a la alta densidad, por lo tanto  $\Delta p$  debe ser grande.

- **Presión de Degeneración:** Este momento grande de los electrones genera una presión que no depende de la temperatura, sino solo de la densidad.

### 12.2. Energía de Fermi y Momento de Fermi

Para entender cuantitativamente la presión de degeneración, debemos considerar la estadística de Fermi-Dirac:

#### Relativistic Treatment

- **Momento de Fermi:**  $p_F = \hbar(3\pi^2 n_e)^{1/3}$  donde  $n_e$  es la densidad numérica de electrones.
- **Energía de Fermi:**

$$E_F = \sqrt{p_F^2 c^2 + m_e^2 c^4}$$

#### – Casos Límite:

- **No Relativista:**  $E_F \approx \frac{p_F^2}{2m_e}$  cuando  $p_F \ll m_e c$
- **Ultrarelativista:**  $E_F \approx p_F c$  cuando  $p_F \gg m_e c$

### 12.3. Ecuación de Estado para Materia Degenerada

#### Presión de Degeneración Electrónica

La presión debida a electrones degenerados sigue diferentes leyes según el régimen:

#### – Régimen No Relativista:

$$P = \frac{(3\pi^2)^{2/3}}{5} \frac{\hbar^2}{m_e} n_e^{5/3} \propto \rho^{5/3}$$

#### – Régimen Ultrarelativista:

$$P = \frac{(3\pi^2)^{1/3}}{4} \hbar c n_e^{4/3} \propto \rho^{4/3}$$

#### Consecuencias para la Estabilidad

- **Equilibrio Hidrostático:** La presión de degeneración contrarresta la fuerza gravitatoria:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)\rho}{r^2}$$

- **Relación Masa-Radio:** Para enanas blancas no relativistas:

$$R \propto M^{-1/3}$$

¡Las enanas blancas más masivas son más pequeñas!

### 12.4. El Límite de Chandrasekhar

#### Derivación Conceptual

- **Energía Total:** La energía total de una enana blanca es la suma de:

- Energía gravitatoria:  $E_g \propto -\frac{GM^2}{R}$

- Energía de degeneración:  $E_d \propto \begin{cases} M^{5/3}/R^2 & \text{(no rel.)} \\ M^{4/3}/R & \text{(ultrarel.)} \end{cases}$

- **Masa Límite:** En el límite ultrarelativista, se encuentra que existe una masa máxima:

$$M_{\text{Ch}} \approx 1.4M_{\odot}$$

por encima de la cual la presión de degeneración no puede soportar la gravedad.

#### Expresión Exacta

La masa de Chandrasekhar viene dada por:

$$M_{\text{Ch}} = \frac{\omega_3^0}{2} \left( \frac{\hbar c}{G} \right)^{3/2} \frac{1}{(\mu_e m_H)^2}$$

donde  $\omega_3^0 \approx 2.018$  es una constante numérica y  $\mu_e$  es el peso molecular por electrón.

### 12.5. Implicaciones para Sistemas Binarios

#### Para Variables Cataclísmicas y Supernovas Tipo Ia

- **Límite de Estabilidad:** Las enanas blancas en sistemas binarios que se acercan al límite de Chandrasekhar pueden volverse inestables.
- **Supernovas Tipo Ia:** Cuando una enana blanca alcanza  $M \approx M_{\text{Ch}}$  mediante acreción de material de su compañera, puede desencadenar una explosión termonuclear.
- **Colapso a Estrella de Neutrones:** En algunos casos, en lugar de explotar, la enana blanca puede colapsar directamente a estrella de neutrones.

#### Para Binarias Compactas

- **Fusiones de Enanas Blancas:** La fusión de dos enanas blancas puede superar  $M_{\text{Ch}}$ , leading a diferentes destinos dependiendo de las masas y composiciones.
- **Ondas Gravitacionales:** Las binarias de enanas blancas son fuentes prometedoras para detectores de ondas gravitacionales como LISA.

### 12.6. Comparación con Otros Objetos Compactos

#### 12.7. Consecuencias Observacionales

#### Enfriamiento de Enanas Blancas

- **Enfriamiento Secular:** Al no tener fuentes de energía nuclear, las enanas blancas se enfrían lentamente con el tiempo.
- **Edades de Poblaciones:** La distribución de temperaturas de enanas blancas permite estimar edades de poblaciones estelares.
- **Cristalización:** A medida que se enfrían, los núcleos de C/O cristalizan, liberando calor latente.

**Table 11.** Comparación de los mecanismos de soporte en diferentes objetos compactos

Objeto	Mecanismo de Soporte	Masa Típica
Enana Blanca	Presión de degeneración de electrones	– $0.6 - 1.0M_{\odot}$ – Límite: $1.4M_{\odot}$
Estrella de Neutrones	Presión de degeneración de neutrones + repulsión nuclear	– $1.2 - 2.0M_{\odot}$ – Límite: $\sim 2 - 3M_{\odot}$
Agujero Negro	Ninguno (colapso completo)	– $> 3M_{\odot}$ – Sin límite superior

#### Propiedades Globales

- **Distribución de Masas:** Refleja la masa inicial de las estrellas progenitoras y los efectos de la pérdida de masa.
- **Relación Masa-Radio:** Las mediciones precisas verifican las predicciones de la teoría de materia degenerada.
- **Campos Magnéticos:** Como discutido anteriormente, el magnetismo interactúa con la estructura degenerada.

#### 12.8. Evolución desde la Secuencia Principal

- **Progenitoras Típicas:** Estrellas de  $0.7 - 8M_{\odot}$  evolucionan a enanas blancas.
- **Pérdida de Envoltura:** En la fase de AGB, las estrellas expulsan sus envolturas externas, dejando solo el núcleo.
- **Nebulosa Planetaria:** La envoltura expulsada forma una nebulosa planetaria, mientras el núcleo se contrae a enana blanda.
- **Fase de Enfriamiento:** La enana blanda resultante sigue una trayectoria de enfriamiento en el diagrama HR.

### 13. Evolución y Enfriamiento de Enanas Blancas Aisladas

Las enanas blancas son objetos que no producen energía nuclear, por lo que su luminosidad proviene únicamente de la liberación de su energía térmica almacenada. Este proceso de enfriamiento sigue leyes predecibles que permiten utilizarlas como relojes cosmológicos.

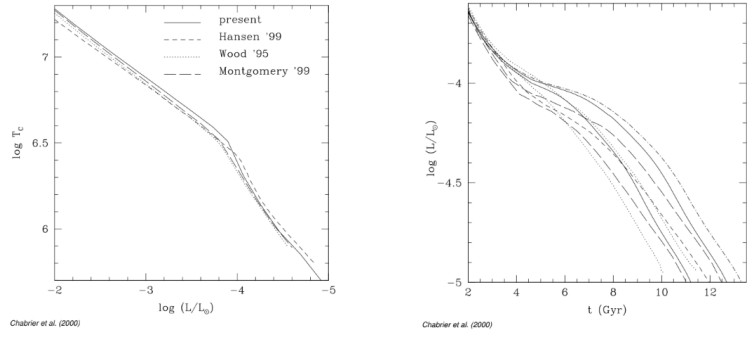
#### 13.1. La Física del Enfriamiento

##### Ecuación Fundamental del Enfriamiento

La evolución térmica de una enana blanda está gobernada por la ecuación:

$$L = -\frac{dU_{th}}{dt} = -C_V \frac{dT_c}{dt}$$

donde:



**Fig. 16.** Curvas de enfriamiento teóricas para enanas blancas de diferentes masas. La luminosidad disminuye monótonamente con el tiempo a medida que la enana blanda libera su energía térmica. Adaptado de Chabrier et al. (2000).

- $L$  es la luminosidad total
- $U_{th}$  es la energía térmica total
- $C_V$  es la capacidad calorífica a volumen constante
- $T_c$  es la temperatura del núcleo

#### Capacidad Calorífica en Materia Degenerada

- **Electrones:** En el régimen degenerado, los electrones contribuyen poco a la capacidad calorífica:

$$C_{V,e} \approx \frac{\pi^2 k_B}{2E_F} n_e k_B T$$

- **Iones:** Los iones del núcleo cristalino siguen la ley de Dulong-Petit:

$$C_{V,iones} \approx 3k_B \text{ por ión}$$

- **Consecuencia:** La capacidad calorífica está dominada por los iones, no por los electrones degenerados.

#### 13.2. Curvas de Enfriamiento Teóricas

##### Dependencia con la Masa

Como muestra la Figura 16, las enanas blancas más masivas se enfrían más lentamente debido a:

- **Mayor Energía Térmica:**  $U_{th} \propto MT_c$
- **Menor Radio:** Mayor densidad → mayor capacidad calorífica por unidad de masa
- **Opacidad:** Las atmósferas más opacas retardan la pérdida de calor

##### Etapas del Enfriamiento

1. **Fase Inicial** ( $T_{eff} > 25,000 \text{ K}$ ): Enfriamiento rápido dominado por la pérdida de energía de los neutrinos.
2. **Fase Intermedia** ( $25,000 > T_{eff} > 12,000 \text{ K}$ ): Enfriamiento controlado por la radiación fotónica desde la superficie.
3. **Fase de Cristalización** ( $T_{eff} \sim 12,000 - 6,000 \text{ K}$ ): Liberación de calor latente de cristalización ralentiza el enfriamiento.
4. **Fase Final** ( $T_{eff} < 6,000 \text{ K}$ ): Enfriamiento lento controlado por la conductividad térmica del núcleo cristalino.

### 13.3. Cristalización del Núcleo

#### Física de la Cristalización

- **Parámetro de Coulomb:**

$$\Gamma = \frac{(Ze)^2}{ak_B T}$$

donde  $a$  es la separación promedio entre iones.

- **Criterio de Cristalización:**  $\Gamma > \Gamma_{\text{crit}} \approx 175$
- **Temperatura de Cristalización:**

$$T_{\text{cryst}} \approx \frac{Z^2 e^2}{ak_B \Gamma_{\text{crit}}} \propto \frac{Z^2 \rho^{1/3}}{\Gamma_{\text{crit}}}$$

#### Consecuencias del Calor Latente

- **Liberación de Energía:** La cristalización libera  $\sim 0.1 - 0.3 k_B T_{\text{porin}}$ .
- **Retraso en el Enfriamiento:** Puede aumentar la edad de enfriamiento en  $\sim 1 - 2$  Gyr para una enana blanda típica.
- **Separación de Fases:** El oxígeno, más pesado, se hunde, liberando energía gravitatoria adicional.

### 13.4. Aplicaciones Cosmológicas

#### Relojes Cósmicos

- **Función de Luminosidad:** El corte en la función de luminosidad de enanas blancas indica la edad del disco galáctico.
- **Edad Cúmulos Globulares:** Las enanas blancas más débiles en cúmulos globulares proporcionan límites inferiores para la edad del Universo.
- **Enanas Blancas más Frías:** La búsqueda de enanas blancas con  $T_{\text{eff}} < 4,000$  K permite estudiar las primeras generaciones de estrellas.

#### Determinación de Edades

La relación edad-luminosidad puede aproximarse por:

$$t_{\text{cool}} \approx 10^9 \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right) \left( \frac{L}{L_{\odot}} \right)^{-5/7} \text{ años}$$

para enanas blancas de masa intermedia en la fase de enfriamiento fotónico.

### 13.5. Comparación con Modelos Teóricos

#### Modelos Históricos

Como se muestra en la Figura 16, diferentes grupos de investigación han desarrollado modelos de enfriamiento:

- **Hansen (1999):** Incluyó efectos de sedimentación y composición variable.
- **Wood (1995):** Modelos detallados de atmósferas con diferentes composiciones.
- **Montgomery (1999):** Énfasis en la física de la cristalización y separación de fases.
- **Chabrier et al. (2000):** Síntesis de modelos anteriores con mejor tratamiento de opacidades.

#### Incertidumbres Actuales

- **Composición del Núcleo:** La proporción exacta C/O afecta la temperatura de cristalización.
- **Espesor de Capas:** El espesor de las capas de H y He influye en la tasa de enfriamiento.
- **Rotación y Campos Magnéticos:** Pueden afectar el transporte de calor en el interior.
- **Acreción:** En sistemas binarios, la acreción puede alterar significativamente el enfriamiento.

### 13.6. Implicaciones para Sistemas Binarios

#### Binarias con Transferencia de Masa

- **Rejuvenecimiento Térmico:** La acreción de material fresco puede recalentar la enana blanda.
- **Alteración de la Composición:** Cambios en la composición atmosférica afectan la opacidad y el enfriamiento.
- **Variables Cataclísmicas:** Los ciclos de acreción y explosiones de nova alteran la evolución térmica.

#### Binarias Detached

- **Edades del Sistema:** El enfriamiento de la enana blanda permite datar el sistema binario.
- **Prueba de Sincronización:** Comparar la edad de enfriamiento con la edad evolutiva de la compañera.
- **LTT 560:** Como ejemplo discutido anteriormente, su temperatura permite estimar su edad de enfriamiento.

#### Binarias Post-ASE

- **Calentamiento por Compresión:** La rápida pérdida de masa durante la fase de ASE puede comprimir y calentar el remanente.
- **Edad desde la ASE:** El enfriamiento proporciona un reloj para medir el tiempo transcurrido desde la fase de envoltorio común.

### 13.7. Perspectivas Futuras

- **Surveys de Gran Profundidad:** LSST y JWST detectarán enanas blancas muy débiles (frías) en poblaciones estelares antiguas.
- **Astrosismología:** Misiones como TESS y PLATO permitirán sondear la estructura interna de enanas blancas pulsantes.
- **Modelos Mejorados:** Simulaciones que incluyan efectos de rotación, magnetismo, y composición realista.
- **Censos Completos:** Gaia proporcionará muestras estadísticas grandes para calibrar las curvas de enfriamiento.

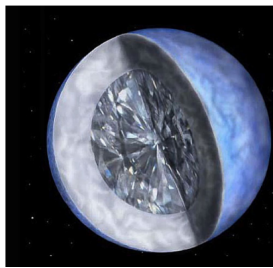
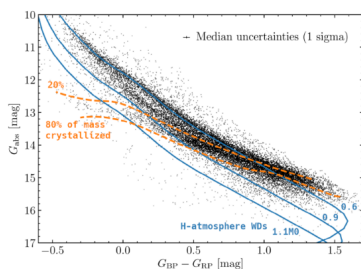
### 13.8. Evidencia Observacional de la Cristalización

La cristalización del núcleo de las enanas blancas, predicha teóricamente hace décadas, ha sido confirmada observacionalmente mediante el análisis de grandes muestras de enanas blancas, particularmente con datos del satélite Gaia.

#### La Firma Observacional en el Diagrama HR

- **Acumulación de Estrellas:** En el diagrama color-magnitud de Gaia, se observa una sobre-densidad de enanas blancas en el rango de temperaturas donde ocurre la cristalización.





**Fig. 17.** Diagrama color-magnitud de enanas blancas dentro de 100 pc observadas por Gaia. La acumulación de estrellas en ciertas regiones (visible como sobre-densidades en el diagrama original) proporciona evidencia directa de la cristalización. Adaptado de Tremblay et al. (2019).

- **Retraso en el Enfriamiento:** La liberación de calor latente durante la cristalización hace que las enanas blancas permanezcan más tiempo en ciertos rangos de luminosidad.
- **Edad de Cristalización:** Para una enana blanca típica de  $0.6M_{\odot}$ , la cristalización comienza a:

$$T_{\text{eff}} \approx 6,000 - 7,000 \text{ K} \quad \text{correspondiente a} \quad t_{\text{cool}} \approx 2 - 3 \text{ Gyr}$$

#### Parámetros Físicos de la Cristalización

**Temperatura del Núcleo** La cristalización ocurre cuando la temperatura del núcleo alcanza:

$$T_{\text{cryst}} \approx 10^6 \text{ K}$$

que corresponde a temperaturas efectivas superficiales de  $\sim 6,000 - 12,000 \text{ K}$  dependiendo de la masa y composición.

#### Energía Liberada

- **Calor Latente:** La cristalización libera aproximadamente:  
 $\Delta E_{\text{latent}} \approx 0.1 - 0.3 k_B T$  por ión
- **Energía Gravitatoria:** La separación de fases (sedimentación del oxígeno) libera energía gravitatoria adicional.
- **Total:** La energía total liberada puede retardar el enfriamiento en  $\sim 1 - 2 \text{ Gyr}$ .

#### 13.9. Separación de Fases y Sedimentación

##### Proceso de Separación

- **Diferencia de Densidad:** El oxígeno (más pesado) tiende a hundirse, mientras que el carbono (más ligero) flota.
- **Liberación de Energía Gravitatoria:** Este reordenamiento libera energía:

$$\Delta E_{\text{grav}} \approx \frac{GM^2}{R} \times \text{fracción de separación}$$

- **Tiempo Característico:** La separación de fases ocurre en escalas de tiempo de  $\sim 10^8 - 10^9$  años.

#### Consecuencias Estructurales

- **Perfil de Composición:** Se desarrolla un gradiente de composición con O en el centro y C en las capas externas.
- **Opacidad:** Cambios en la composición afectan la opacidad y el transporte de calor.
- **Capacidad Calorífica:** La estructura ordenada del sólido afecta la capacidad calorífica del núcleo.

#### 13.10. Implicaciones para la Sismología de Enanas Blancas

##### Estrellas ZZ Ceti y Cristalización

- **Banda de Inestabilidad:** Las estrellas ZZ Ceti (DA pulsantes) se encuentran justo por encima del rango de cristalización.
- **Sondeo del Interior:** Las frecuencias de pulsación son sensibles al estado de cristalización del núcleo.
- **Detectabilidad:** Se espera que las pulsaciones se amortigüen cuando una fracción significativa del núcleo cristaliza.

#### Firmas Sísmicas

- **Modos de Gravedad:** Sensibles a los gradientes de composición en el núcleo.
- **Separación de Frecuencias:** Los patrones de separación entre modos pulsacionales revelan la estructura interna.
- **Amortiguamiento:** La viscosidad en el núcleo cristalino puede afectar las amplitudes de pulsación.

#### 13.11. Consecuencias para Sistemas Binarios

##### Enanas Blancas Magnéticas y Cristalización

- **Generación de Campos Magnéticos:** Como discutió Schreiber et al. (2021), la convección durante la cristalización puede activar dinamos.
- **Correlación Masa-Campo:** Las enanas blancas más masivas cristalizan antes, posiblemente explicando por qué las MWDs tienden a ser más masivas.
- **Distribución de Edades:** El aumento en la fracción de MWDs con la edad es consistente con un mecanismo ligado a la cristalización.

#### Variables Cataclísmicas

- **Edad del Sistema:** El estado de cristalización de la enana blanca proporciona una edad mínima para el sistema.
- **Estabilidad Térmica:** La cristalización puede afectar la respuesta térmica a la acreción.
- **Explosiones de Nova:** La estructura cristalina del núcleo puede influir en la propagación de las ignition fronts.

#### Binarias Detached

- **Datación del Sistema:** La posición en la secuencia de enfriamiento permite datar sistemas binarios antiguos.
- **LTT 560:** Si esta enana blanca está en la fase de cristalización, proporcionaría información sobre su historia evolutiva.
- **Sincronización de Edades:** Comparación entre la edad de enfriamiento y la edad evolutiva de la compañera.

#### 13.12. Resultados Clave de Tremblay et al. (2019)

##### Muestra de Gaia

- **Selección:**  $\sim 15,000$  enanas blancas dentro de 100 pc con astrometría y fotometría precisas.
- **Diagrama HR:** La diagrama color-magnitud revela estructuras finas en la secuencia de enfriamiento.
- **Edad del Disco:** El corte en la función de luminosidad indica una edad del disco delgado de  $\sim 7 - 9 \text{ Gyr}$ .

## Evidencia de Acumulación

- **Sobre-densidades:** Se observan acumulaciones de estrellas en  $T_{\text{eff}} \approx 6,000 \text{ K}$  y  $T_{\text{eff}} \approx 5,000 \text{ K}$ .
- **Interpretación:** Estas acumulaciones corresponden a los inicios de la cristalización del núcleo y la separación de fases.
- **Masas:** La posición de las acumulaciones depende de la masa, verificando las predicciones teóricas.

### 13.13. Incertidumbres y Perspectivas Futuras

#### Problemas Abiertos

- **Proporción C/O:** La proporción exacta de carbono y oxígeno en el núcleo afecta la temperatura de cristalización.
- **Enriquecimiento de Neón:** En enanas blancas masivas, la presencia de neón modifica el diagrama de fases.
- **Efectos de Sedimentación:** La sedimentación de elementos pesados antes de la cristalización.
- **Rotación y Magnetismo:** Cómo afectan estos factores al proceso de cristalización.

#### Futuras Pruebas Observacionales

- **Gaia DR4/DR5:** Muestras más grandes y mejores fotometría permitirán estudios más detallados.
- **LSST:** Detección de enanas blancas muy frías (antiguas) en el halo galáctico.
- **JWST:** Espectroscopía infrarroja de enanas blancas frías para estudiar sus atmósferas.
- **TESS/PLATO:** Astrosismología de enanas blancas pulsantes para sondear núcleos cristalinos.

#### Desarrollos Teóricos

- **Simulaciones de Dinámica Molecular:** Para entender mejor la física de la cristalización en plasmas densos.
- **Modelos de Enfriamiento Mejorados:** Que incluyan efectos de rotación, magnetismo, y composición realista.
- **Diagramas de Fases:** Mejores cálculos de los diagramas de fase para mezclas C/O/Ne.

## 14. Estrellas de Neutrones

Las estrellas de neutrones representan el siguiente escalón en compactidad después de las enanas blancas, donde la gravedad es tan extrema que incluso la presión de degeneración electrónica es insuficiente, llevando a la formación de materia neutrónica degenerada.



Fig. 18.

Table 12. Comparación entre enanas blancas y estrellas de neutrones

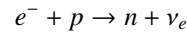
Parámetro	Enana Blanca	Estrella de Neutrones
Masa típica	$0.6 - 1.0 M_{\odot}$	$1.0 - 2.0 M_{\odot}$
Radio	$0.01 R_{\odot} \approx 1 R_{\oplus}$	$10 - 20 \text{ km}$
Densidad media	$10^6 \text{ g/cm}^3$	$10^{14} \text{ g/cm}^3$
Mecanismo de soporte	Degeneración electrónica	Degeneración neutrónica + repulsión nuclear
Progenitoras típicas	$0.7 - 8 M_{\odot}$	$8 - 25 M_{\odot}$
Gravedad superficial	$\log g \sim 8$	$\log g \sim 14$

### 14.1. Parámetros Fundamentales y Comparación

### 14.2. Formación en Supernovas de Colapso del Núcleo

#### Proceso de Colapso

- **Límite de Chandrasekhar:** Cuando el núcleo de hierro de una estrella masiva excede  $\sim 1.4 M_{\odot}$ , la presión de degeneración electrónica se vuelve insuficiente.
- **Captura Electrónica:** Los electrones son capturados por protones:



- **Neutralización:** Este proceso reduce la presión de degeneración electrónica, acelerando el colapso.
- **Rebote del Núcleo:** Cuando la densidad alcanza  $\sim 10^{14} \text{ g/cm}^3$ , la repulsión nuclear fuerte detiene abruptamente el colapso.
- **Onda de Choque:** El rebote produce una onda de choque que, combinada con la energía de los neutrinos, expulsa las capas externas.

#### Rango de Masas Progenitoras

- **Límite Inferior:**  $\sim 8 M_{\odot}$  - masa mínima para producir un núcleo de Fe que colapsa.
- **Límite Superior:**  $\sim 25 M_{\odot}$  - por encima de esta masa, el remanente típicamente forma un agujero negro.
- **Dependencia de Metalicidad:** Estrellas de baja metalicidad pueden producir estrellas de neutrones a masas mayores debido a menor pérdida de masa.

### 14.3. Estructura Interna y Ecuación de Estado

#### Capas Estructurales

1. **Atmósfera:** ( $\rho < 10^6 \text{ g/cm}^3$ ) Capa muy delgada de plasma ordinario.
2. **Corteza Externa:** ( $10^6 < \rho < 4 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$ ) Núcleos atómicos en red cristalina con electrones degenerados.
3. **Corteza Interna:** ( $4 \times 10^{11} < \rho < 2 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ ) Núcleos exóticos ricos en neutrones + superfluido de neutrones.
4. **Núcleo Externo:** ( $\rho > 2 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ ) Materia neutrónica degenerada, probablemente en estado superfluido.
5. **Núcleo Interno:** Composición desconocida - posiblemente materia de quarks o hiperones.

## Ecuación de Estado

La ecuación de estado de la materia neutrónica es el principal desconocido en la física de estrellas de neutrones:

$$P = P(\rho, T, Y_e)$$

donde las incertidumbres incluyen:

- Transiciones de fase a materia de quarks
- Apariencia de hiperones
- Propiedades de superconductividad y superfluidez

### 14.4. Manifestaciones Observacionales en Sistemas Binarios

#### Púlsares

- **Mecanismo:** Estrellas de neutrones en rotación rápida con campos magnéticos intensos que emiten haces de radiación.
- **Púlsares Binarios:** Proporcionan las pruebas más precisas de la Relatividad General.
- **Púlsar Binario Hulse-Taylor:** Descubierto en 1974, proporcionó la primera evidencia indirecta de ondas gravitacionales.

#### Binarias de Rayos X

- **Acreción:** Material de la compañera cae sobre la estrella de neutrones, calentándose y emitiendo rayos X.
- **Propulsores de Rayos X:** Estallidos termonucleares en la superficie.
- **Millisecond Pulsars:** Púlsares reciclados por acreción en sistemas binarios.

#### Ondas Gravitacionales

- **Fuentes para LIGO/Virgo:** Fusiones de estrellas de neutrones binarias.
- **GW170817:** Primera detección de ondas gravitacionales de una fusión de estrellas de neutrones, con contraparte electromagnética.

### 14.5. Estrellas de Neutrones en Diferentes Tipos de Binarias

#### Binarias de Alta Masa

- **Progenitoras:** Sistemas masivos donde ambas componentes evolucionan rápidamente.
- **Ejemplos:** PSR B1913+16 (púlsar binario), Cygnus X-1 (candidato a agujero negro).
- **Características:** Períodos orbitales cortos, alta excentricidad.

#### Binarias de Baja Masa

- **Progenitoras:** Sistemas con gran diferencia de masa entre componentes.
- **Ejemplos:** Púlsares milisegundo, binarias de rayos X de baja masa.
- **Características:** Períodos orbitales cortos, órbitas circulares.

## Binarias de Enana Blanca - Estrella de Neutrones

- **Formación:** Sistemas donde la estrella de neutrones se formó primero y la compañera evolucionó a enana blanca.
- **Importancia:** Laboratorios para estudiar física fundamental.
- **Ejemplos:** PSR J0348+0432 - prueba precisa de Relatividad General.

### 14.6. Límites de Masa y Estabilidad

#### Límite Inferior

- **Masa Mínima:**  $\sim 1.0 M_{\odot}$  - determinada por la masa del núcleo de Fe que colapsa.
- **Estrellas de Neutrones de Baja Masa:** Raras, posiblemente formadas en colapsos electron-capture.

#### Límite Superior

- **Límite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff:** Análogo al límite de Chandrasekhar para estrellas de neutrones.
- **Valor:**  $2 - 3 M_{\odot}$ , dependiendo de la ecuación de estado.
- **Mediciones:** Púlsares como PSR J0348+0432 ( $2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$ ) y PSR J0740+6620 ( $2.08 \pm 0.07 M_{\odot}$ ) proporcionan restricciones.

### 14.7. Implicaciones para la Física Fundamental

#### Pruebas de Relatividad General

- **Avance del Periastro:** Medido con precisión de  $\sim 0.1\%$  en algunos púlsares binarios.
- **Decrecimiento Orbital:** debido a emisión de ondas gravitacionales.
- **Dilatación Temporal Gravitatoria:** Efecto Shapiro medido en sistemas binarios.

#### Materia en Condiciones Extremas

- **Superfluidez:** Los neutrones en el núcleo pueden formar superfluidos.
- **Superconductividad:** Los protones pueden volverse superconductores.
- **Materia de Quarks:** Posible transición de fase en el núcleo interno.

### 14.8. Perspectivas Futuras

- **NICER:** Mediciones precisas de masa y radio mediante timing de rayos X.
- **SKAI y ngVLA:** Búsqueda y estudio de púlsares en diferentes entornos.
- **LISA:** Detección de binarias de estrellas de neutrones ultracompactas.
- **Próximas Fusiones:** Más detecciones de fusiones de estrellas de neutrones con LIGO/Virgo.

## 15. Púlsares: Faros Cósmicos

Los púlsares son estrellas de neutrones en rápida rotación que emiten haces de radiación electromagnética, actuando como relojes cósmicos de extraordinaria precisión. Su estudio ha proporcionado algunas de las pruebas más rigurosas de la física fundamental.

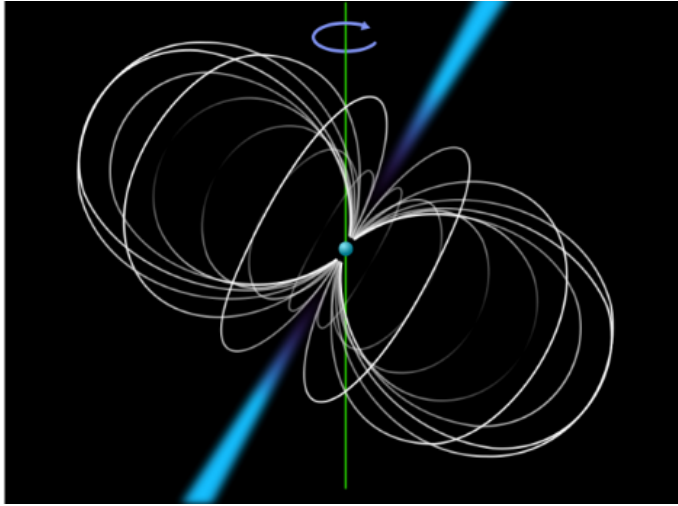


Fig. 19.

### 15.1. Mecanismo de Emisión y el Efecto Faro

#### Conservación de Magnitudes Físicas

##### – Conservación del Momento Angular:

$$I_{\text{progenitor}}\omega_{\text{progenitor}} = I_{\text{NS}}\omega_{\text{NS}}$$

Dado que  $I_{\text{NS}} \sim 10^{-9} I_{\text{progenitor}}$ , la estrella de neutrones gira mucho más rápido.

##### – Conservación del Flujo Magnético:

$$B_{\text{NS}} = B_{\text{progenitor}} \left( \frac{R_{\text{progenitor}}}{R_{\text{NS}}} \right)^2$$

Con  $R_{\text{progenitor}}/R_{\text{NS}} \sim 10^5$ , los campos se amplifican a  $\sim 10^{10-15}$  G.

#### El Efecto Faro

- **Geometría:** El eje magnético está inclinado respecto al eje de rotación.
- **Emisión:** Los haces de radiación se emiten desde los polos magnéticos.
- **Detectabilidad:** Solo vemos el púlsar cuando el haz barre nuestra línea de visión.
- **Período:** El intervalo entre pulsos corresponde al período de rotación de la estrella de neutrones.

### 15.2. Parámetros Característicos de los Púlsares

Table 13. Rangos de parámetros para diferentes tipos de púlsares

Tipo	Período de Rotación	Campo Magnético	Mag-
Púlsares Nor- males	0.1 – 10 s	$10^{12} - 10^{13}$ G	
Púlsares Milisegundo	1 – 30 ms	$10^8 - 10^{10}$ G	
Magnetares	2 – 12 s	$10^{14} - 10^{15}$ G	
Púlsares de Rayos X	1 – 1000 ms	$10^8 - 10^{12}$ G	

### 15.3. Descubrimiento Histórico y Curiosidades

#### El Descubrimiento de Jocelyn Bell

- **Contexto:** 1967, proyecto de investigación de postgrado en radioastronomía.
- **Instrumento:** Radio telescopio diseñado para estudiar quasars.
- **Hallazgo:** Señales periódicas extremadamente regulares, inicialmente denominadas LGM-1 (Little Green Men).
- **Identificación:** Primero se pensó en inteligencia extraterrestre, luego se reconoció como un objeto astrofísico natural.

#### Curiosidades Históricas

- **Premio Nobel Controversial:** 1974 otorgado a Antony Hewish (supervisor) pero no a Jocelyn Bell, a pesar de ser quien hizo el descubrimiento.
- **Segundo Nobel:** 1993 a Russell Hulse y Joseph Taylor por el descubrimiento del primer púlsar binario, confirmando predicciones de Relatividad General.
- **Primeros Exoplanetas:** Wolszczan & Frail (1992) descubrieron los primeros planetas extrasolares alrededor del púlsar PSR B1257+12.
- **Nobel de Exoplanetas:** 2019 otorgado por planetas alrededor de estrellas de tipo solar (Mayor & Queloz, 1995).

### 15.4. Clasificación de Púlsares

#### Por Período de Rotación

- **Púlsares Normales:** Períodos típicos 0.1-10 s, campos magnéticos fuertes.
- **Púlsares Milisegundo:** Períodos < 30 ms, campos magnéticos débiles, típicamente en sistemas binarios.

#### Por Mecanismo de Alimentación

- **Púlsares Rotación-Alimentados:** Energía proveniente de la rotación.

$$\dot{E}_{\text{rot}} = -I\omega\dot{\omega} = 4\pi^2 I \frac{\dot{P}}{P^3}$$

- **Púlsares Alimentados por Acreción:** En sistemas binarios, energía proveniente de la acreción de materia.

#### Por Banda Espectral

- **Radio Púlsares:** Detectados principalmente en radio.
- **Púlsares de Rayos X:** Emisión dominante en rayos X, típicamente en sistemas binarios.
- **Púlsares de Rayos Gamma:** Detectados por telescopios como Fermi-LAT.

### 15.5. Púlsares en Sistemas Binarios

#### Formación de Púlsares Milisegundo

1. **Sistema Binario:** Estrella de neutrones con compañera de baja masa.
2. **Fase de Acreción:** Transferencia de masa y momento angular.
3. **Spin-up:** La estrella de neutrones acelera su rotación.
4. **Reactivación:** Finalizada la acreción, emerge como púlsar milisegundo.

## Importancia para Pruebas de Relatividad

- **PSR B1913+16:** Descubierto en 1974, primera evidencia indirecta de ondas gravitacionales.
- **PSR J0737-3039:** Sistema doble de púlsares, laboratorio único para Relatividad General.
- **PSR J0348+0432:** Estrella de neutrones masiva con compañera enana blanda.

## 15.6. Aplicaciones y Usos de los Púlsares

### Relojes Cósmicos

- **Precisión:** Algunos púlsares son más estables que los relojes atómicos terrestres.
- **Navegación:** Propuesta para sistemas de navegación interestelar.
- **Red de Tiempo:** Posible uso para sincronizar relojes en el Sistema Solar.

### Detectores de Ondas Gravitacionales

- **Pulsar Timing Arrays:** Usando múltiples púlsares para detectar ondas gravitacionales de baja frecuencia.
- **Proyectos:** EPTA, NANOGrav, PPTA - búsqueda de fondo de ondas gravitacionales.

### Medios Interestelares

- **Dispersión:** Medición de densidad de electrones en el medio interestelar.
- **Scattering:** Estudio de inhomogeneidades en el medio interestelar.
- **Campo Magnético Galáctico:** Medición a través de rotación Faraday.

## 15.7. Logros Científicos Destacados

### Premios Nobel Relacionados

- **1974 - Antony Hewish:** Por el descubrimiento de los púlsares (controversial por la exclusión de Jocelyn Bell).
- **1993 - Russell Hulse & Joseph Taylor:** Por el descubrimiento del primer púlsar binario y verificación de la emisión de ondas gravitacionales.
- **2017 - Rainer Weiss, Kip Thorne, Barry Barish:** Por la detección directa de ondas gravitacionales, incluyendo fusiones de estrellas de neutrones.

### Descubrimientos Fundamentales

- **Confirmación de Estrellas de Neutrones:** Prueba directa de la existencia de estos objetos predichos teóricamente.
- **Pruebas de Relatividad General:** Mediciones de precisión sin precedente.
- **Primeros Exoplanetas:** PSR B1257+12 alberga el primer sistema planetario descubierto fuera del Sistema Solar.
- **Límites de Gravedad Alternativas:** Restricciones a teorías alternativas de gravedad.

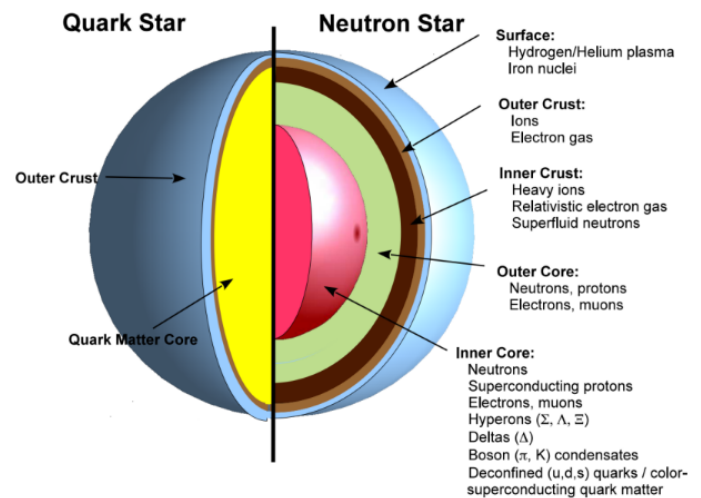
## 15.8. Perspectivas Futuras

- **SKAI y ngVLA:** Descubrirán decenas de miles de nuevos púlsares.

- **Estudios de Múltiples Mensajeros:** Combinación con detecciones de ondas gravitacionales.
- **Cartografiado Galáctico:** Usando púlsares para mapear la estructura de la Vía Láctea.
- **Búsqueda de Irregularidades:** Detección de ondas gravitacionales primordiales.

## 16. Estructura Interna de Estrellas de Neutrones

Las estrellas de neutrones poseen una estructura interna compleja y estratificada donde diferentes estados de la materia coexisten bajo condiciones extremas de densidad y presión. Esta estructura determina sus propiedades observables y es crucial para entender fenómenos como los púlsares y las emisiones de rayos X.



**Fig. 20.** Estructura interna comparada de una estrella de neutrones (izquierda) y una estrella de quarks hipotética (derecha). Se muestran las diferentes capas y composiciones. Adaptado de Weber et al. (2013).

### 16.1. Capas Estructurales de una Estrella de Neutrones

#### Atmósfera y Superficie

- **Composición:** Plasma de hidrógeno/helico y núcleos de hierro.
- **Espesor:**  $\sim 1-10$  cm
- **Densidad:**  $10^0 - 10^6$  g/cm<sup>3</sup>
- **Características:**
  - Fuente de la emisión térmica observada
  - Lugar de formación de líneas espectrales
  - Región donde se producen explosiones termonucleares (bursts)

#### Corteza Externa

- **Composición:** Iones pesados en red cristalina + gas de electrones degenerados.
- **Espesor:**  $\sim 0.3$  km
- **Densidad:**  $10^6 - 4 \times 10^{11}$  g/cm<sup>3</sup>
- **Características:**
  - Sólido cristalino que puede fracturarse (starquakes)
  - Fuente de glitches en púlsares
  - Los electrones son relativistas y degenerados



## Corteza Interna

- **Composición:** Núcleos exóticos ricos en neutrones + neutrones superfluidos + gas de electrones relativistas.
- **Espesor:**  $\sim 1\text{-}2\text{ km}$
- **Densidad:**  $4 \times 10^{11} - 2 \times 10^{14}\text{ g/cm}^3$
- **Características:**
  - Aparecen neutrones libres en estado superfluido
  - Transición de materia nucleares a materia neutrónica
  - Posible existencia de "pasta nuclear" (nuclei exóticos)

## Núcleo Externo

- **Composición:** Neutrones, protones, electrones, muones.
- **Espesor:**  $\sim 5\text{-}8\text{ km}$
- **Densidad:**  $2 \times 10^{14} - \sim 10^{15}\text{ g/cm}^3$
- **Características:**
  - Materia neutrónica homogénea
  - Neutrones en estado superfluido
  - Protones superconductores
  - Electrones y muones degenerados

## Núcleo Interno

- **Composición:** Desconocida - múltiples posibilidades:
  - Hipermiones ( $\Sigma$ ,  $\Lambda$ ,  $\Xi$ )
  - Resonancias  $\Delta$
  - Condensados de bosones ( $\pi$ ,  $K$ )
  - Materia de quarks desconfiados
  - Materia de quarks superconductora de color
- **Densidad:**  $> 10^{15}\text{ g/cm}^3$
- **Importancia:** Determina la ecuación de estado a altas densidades

## 16.2. Estados Exóticos de la Materia

### Superfluidez y Superconductividad

- **Superfluidez de Neutrones:** En corteza interna y núcleo externo, los neutrones forman pares de Cooper.
- **Superconductividad de Protones:** En el núcleo externo, los protones forman pares superconductores.
- **Consecuencias Observables:**
  - Glitches en púlsares
  - Enfriamiento rápido por emisión de neutrinos
  - Acoplamiento entre componentes

## Materia de Quarks

- **Transición de Fase:** Posible transición de materia hadrónica a materia de quarks.
- **Estrellas Híbridas:** Estrellas de neutrones con núcleos de quarks.
- **Estrellas de Quarks:** Objetos hipotéticos compuestos completamente por quarks desconfiados.

## 16.3. Estrellas de Quarks

### Definición y Características

- **Composición:** Materia de quarks desconfiados (u, d, s).
- **Estabilidad:** Podrían ser más estables que las estrellas de neutrones a ciertas densidades.
- **Estructura:** Más homogénea que las estrellas de neutrones, sin transición abrupta entre capas.

## Evidencia Observacional

- **Candidatos:** Algunas estrellas de neutrones de baja masa podrían ser estrellas de quarks.
- **Propiedades:** Radio más pequeño para misma masa, diferentes curvas de enfriamiento.
- **Importancia:** Confirmar su existencia probaría la estabilidad de la materia de quarks strange.

## 16.4. El Papel de los Electrones y la Neutralidad

### Neutralidad Eléctrica

- **Importancia:** Las estrellas de neutrones no son eléctricamente neutras en todas sus capas.
- **Electrones en la Corteza:** Proporcionan la presión de degeneración principal.
- **Magnetismo:** Los iones y electrones en la corteza sostienen y generan campos magnéticos.

### Conducción Eléctrica y Térmica

- **Electrones de Conducción:** Responsables de la alta conductividad térmica y eléctrica.
- **Importancia para Campos Magnéticos:** Permiten la existencia de campos magnéticos persistentes.
- **Enfriamiento:** Afectan la eficiencia del transporte de calor desde el interior.

## 16.5. Implicaciones para Sistemas Binarios

### Binarias de Rayos X

- **Acreción:** El material acrecido interactúa con la atmósfera y corteza.
- **Propulsores Termonucleares:** Explosiones en la superficie que dependen de la composición de la corteza.
- **Calentamiento por Fricción:** La acreción puede calentar la corteza y afectar su estructura.

### Fusiones de Estrellas de Neutrones

- **Señal de Ondas Gravitacionales:** Depende de la ecuación de estado y estructura interna.
- **Kilonovae:** La eyección de material depende de las propiedades de la corteza.
- **Remanente:** El producto de la fusión depende de las ecuaciones de estado de ambos componentes.

### Púlsares Binarios

- **Momentos de Inercia:** Dependen de la distribución de masa interna.
- **Acoplamiento Corteza-Núcleo:** Afecta la evolución rotacional y los glitches.
- **Precesión Libre:** Puede revelar información sobre la estructura interna.

## 16.6. Ecuaciones de Estado y Restricciones Observacionales

### Mediciones de Masa y Radio

- **NICER:** Mediciones precisas de relación masa-radio para varias estrellas de neutrones.

- **Límites de Masa:** Púlsares como PSR J0348+0432 ( $2.01M_{\odot}$ ) y PSR J0740+6620 ( $2.08M_{\odot}$ ).
- **Restricciones:** Las ecuaciones de estado deben permitir estas masas.

## Ondas Gravitacionales

- **GW170817:** La señal de fusión proporciona restricciones en la ecuación de estado.
- **Deformabilidad de Marea:** Parámetro  $\Lambda$  que depende de la compresibilidad de la materia.
- **Radio:** Inferido de las observaciones de ondas gravitacionales y contrapartes electromagnéticas.

### 16.7. Perspectivas Futuras

- **NICER:** Más mediciones de masa y radio con mejor precisión.
- **Próximas Fusiones:** Más eventos como GW170817 con mejores datos.
- **Radio Telescopios:** SKAI y ngVLA para estudios de timing de púlsares.
- **Simulaciones Numéricas:** Modelos más realistas de materia nuclear y de quarks.
- **Experimentos Terrestres:** Colisionadores de iones pesados para estudiar materia a alta densidad.

## 17. Ondas Gravitacionales en Sistemas Binarios Compactos

Las ondas gravitacionales representan una de las predicciones más fascinantes de la Relatividad General y su detección ha abierto una nueva ventana para observar el universo. Los sistemas binarios compactos son las fuentes más importantes para estudiar estos fenómenos.

### 17.1. Fundamentos Físicos

#### Principios Básicos

- **Masa deforma el espaciotiempo:** Concepto central de la Relatividad General.
- **Masas aceleradas emiten ondas:** Análogo a cargas aceleradas emitiendo radiación electromagnética.
- **Transporte de energía:** Como demostró Feynman, las ondas gravitacionales transportan energía fuera del sistema.

#### Ecuación de Einstein Linearizada

Para campos débiles, la métrica puede escribirse como:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

donde  $h_{\mu\nu}$  satisface la ecuación de onda:

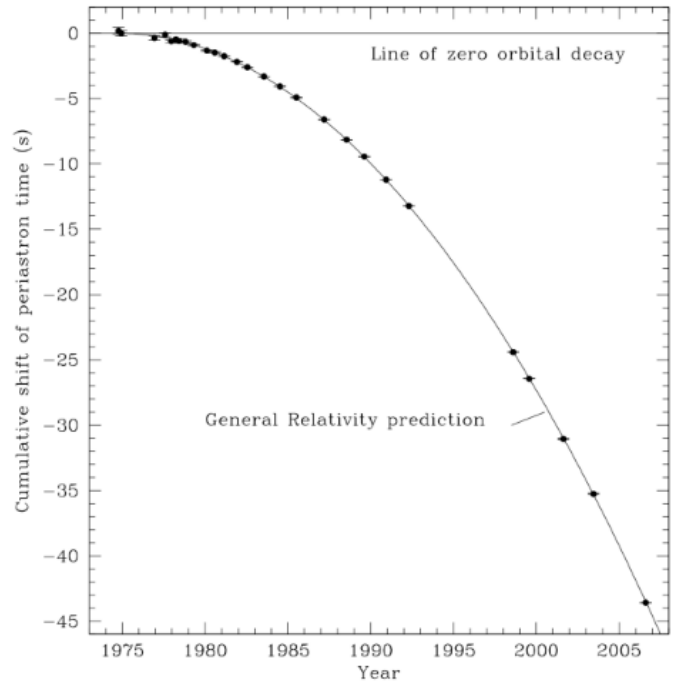
$$\square h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

### 17.2. El Púlsar Binario Hulse-Taylor: PSR B1913+16

#### Parámetros del Sistema

#### Importancia Histórica

- **Descubrimiento:** 1974 por Russell Hulse y Joseph Taylor.



**Fig. 21.** (Arriba) Concepto fundamental: masas aceleradas emiten ondas gravitacionales. (Abajo) Decrecimiento orbital del púlsar binario PSR B1913+16, mostrando perfecto acuerdo con la predicción de Relatividad General. Adaptado de Weisberg et al. (2010).

**Table 14.** Parámetros orbitales de PSR B1913+16

Parámetro	Valor
Período orbital	$P_{\text{orb}} = 7.75 \text{ h}$
Decrecimiento del período	$\Delta P_{\text{orb}} = -76.5 \times 10^{-3} \text{ s/año}$
Decrecimiento del semieje	$\Delta a = -3.5 \text{ m/año}$
Tiempo hasta fusión	$\Delta t_{\text{merger}} = 3 \times 10^8 \text{ años}$
Masa total	$M_1 + M_2 = 2.83 M_{\odot}$
Excentricidad	$e = 0.617$

- **Premio Nobel 1993:** Por la primera evidencia indirecta de ondas gravitacionales.
- **Precisión:** El decrecimiento orbital medido coincide con la predicción de Relatividad General con precisión de 0.2%.

### 17.3. Energía y Potencia Radiada

#### Fórmula de Potencia

Para un sistema binario, la potencia radiada en ondas gravitacionales es:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{32}{5} \frac{G^4}{c^5} \frac{\mu^2 M^3}{a^5} f(e)$$

donde:

- $\mu = M_1 M_2 / M$  es la masa reducida
- $M = M_1 + M_2$  es la masa total
- $f(e)$  es una función de la excentricidad

#### Consecuencias Orbitales

- **Decrecimiento del Semieje:**

$$\frac{da}{dt} = -\frac{64}{5} \frac{G^3}{c^5} \frac{M_1 M_2 M}{a^3} f(e)$$

– **Decrecimiento del Período:**

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{96\pi}{5} \left( \frac{2\pi G}{P} \right)^{5/3} \frac{M_1 M_2}{M^{1/3}} f(e)$$

#### 17.4. Detección Directa: GW170817

##### El Evento Histórico

- **Fecha:** 17 de agosto de 2017
- **Detectores:** LIGO (Hanford y Livingston) y Virgo
- **Fuente:** Fusión de dos estrellas de neutrones en NGC 4993 ( $\sim 40$  Mpc)
- **Duración:**  $\sim 100$  segundos en banda de LIGO/Virgo

##### Parámetros Físicos

- **Masas:**  $M_1 = 1.36 - 1.60 M_\odot$ ,  $M_2 = 1.17 - 1.36 M_\odot$
- **Masa del Remanente:**  $\sim 2.74 M_\odot$
- **Energía Radiada:**  $\sim 0.025 M_\odot c^2$  en ondas gravitacionales
- **Señal:** Más de 8,000 ciclos orbitales detectados

#### 17.5. Contrapartes Electromagnéticas

##### Kilonova AT 2017gfo

- **Detección:** 1.7 segundos después de las ondas gravitacionales
- **Características:**
  - Emisión en múltiples bandas (UV, óptico, IR)
  - Evolución rápida de color y luminosidad
  - Evidencia de producción de elementos pesados (proceso r)
- **Importancia:** Confirmación de que las fusiones de estrellas de neutrones son sitios de nucleosíntesis de elementos pesados

##### Emisión de Rayos Gamma

- **GRB 170817A:** Estallido de rayos gamma corto detectado por Fermi/INTEGRAL
- **Retraso:**  $\sim 1.7$  segundos después del pico de ondas gravitacionales
- **Interpretaci:** Jet relativista visto ligeramente fuera del eje

#### 17.6. Implicaciones para la Física Fundamental

##### Pruebas de Relatividad General

- **Velocidad de las Ondas Gravitacionales:**  $v_{GW} = c$  con precisión de  $10^{-15}$
- **Desviaciones de GR:** Límites en teorías modificadas de gravedad
- **Principio de Equivalencia:** Verificado con alta precisión

##### Ecuación de Estado de Materia Neutrónica

- **Deformabilidad de Marea:** Parámetro  $\Lambda$  restringe la ecuación de estado
- **Radio de Estrellas de Neutrones:** Inferido de  $\Lambda$ :  $R \approx 11-13$  km
- **Restricciones:** Elimina ecuaciones de estado muy blandas o muy rígidas

#### 17.7. Sistemas Binarios como Fuentes de Ondas Gravitacionales

##### Tipos de Fuentes

**Table 15.** Principales fuentes de ondas gravitacionales de sistemas binarios

Sistema	Frecuencia	Detector	Estado
Binarias de EN-EN	$10^{-4} - 10^{-1}$ Hz	LISA	Futuro
Binarias de AG-AG	$10 - 10^3$ Hz	LIGO/Virgo	Detectado
Binarias de EN-AG	$10 - 10^3$ Hz	LIGO/Virgo	Detectado
Binarias de ENs	$10 - 10^3$ Hz	LIGO/Virgo	Detectado
Púlsares bina-rios	$10^{-9} - 10^{-6}$ Hz	PTA	Evidencia

##### Evolución de Sistemas Binarios Compactos

1. **Fase detached:** Pérdida de energía por ondas gravitacionales
2. **Fase de contacto:** Transferencia de masa y posible fusión
3. **Fusión:** Emisión intensa de ondas gravitacionales
4. **Remanente:** Estrella de neutrones, agujero negro, o dispersión

#### 17.8. Astronomía de Múltiples Mensajeros

##### GW170817 como Paradigma

- **Ondas Gravitacionales:** Información sobre masas y distancias
- **Rayos Gamma:** Información sobre procesos relativistas
- **Kilonova:** Información sobre composición y dinámica ejecta
- **Afterglow:** Información sobre entorno y jet

##### Sinergia Científica

- **Constante de Hubble:** Medición independiente de  $H_0$
- **Nucleosíntesis:** Confirmación del proceso r en fusiones
- **Física Nuclear:** Restricciones en ecuación de estado

#### 17.9. Perspectivas Futuras

##### Mejoras en Detectores

- **LIGO A+:** Mejora de sensibilidad en curso
- **Virgo+:** Actualizaciones similares
- **KAGRA:** Detector criogénico en Japón
- **LIGO-India:** Nuevo detector planeado

##### Nuevos Observatorios

- **LISA:** Observatorio espacial para bajas frecuencias (lanzamiento 2030s)
- **ET:** Telescopio Einstein, detector subterráneo de tercera generación
- **CE:** Cosmic Explorer, versión mejorada de LIGO

## Ciencia Esperada

- **Tasas de Fusión:** ~ decenas de eventos por año con LIGO A+
- **Populaciones:** Distribuciones de masa y espín de objetos compactos
- **Cosmología:** Mediciones de  $H_0$  con precisión ~ 2%
- **Física Fundamental:** Pruebas de Relatividad General en régimen fuerte

## 18. Agujeros Negros: El Límite Final de la Compactación

Los agujeros negros representan el estado más extremo de compactación gravitatoria, donde la curvatura del espaciotiempo se vuelve tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar. Son la consecuencia natural de la Relatividad General cuando la gravedad vence a todas las fuerzas conocidas.

### 18.1. El Concepto de Agujero Negro

#### Velocidad de Escape

La velocidad de escape para que un objeto de masa  $m$  escape de un cuerpo de masa  $M$  y radio  $R$  se deriva de la conservación de energía:

$$E_{\text{cin}} = E_{\text{grav}} \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = Gm\frac{M}{R} \Rightarrow v^2 = 2G\frac{M}{R}$$

Cuando esta velocidad de escape iguala o excede la velocidad de la luz, obtenemos la condición para un agujero negro:

$$2G\frac{M}{R} \geq c^2 \Rightarrow R \leq \frac{2GM}{c^2}$$

#### Radio de Schwarzschild

El radio crítico donde la velocidad de escape iguala a  $c$  define el radio de Schwarzschild:

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \approx 3 \left( \frac{M}{M_\odot} \right) \text{ km}$$

### 18.2. Ejemplos y Comparaciones

#### Diferentes Objetos Compactos

**Table 16.** Comparación de radios para diferentes objetos compactos

Objeto	Masa	Radio (vs. $R_S$ )
Enana Blanca	$1.0M_\odot$	$R \approx 5,000 \text{ km} \gg R_S$
Estrella de Neutrones	$1.4M_\odot$	$R \approx 20 \text{ km} > R_S$
Agujero Negro	$1.4M_\odot$	$R = R_S \approx 4.2 \text{ km}$
Agujero Negro Estelar	$10M_\odot$	$R_S \approx 30 \text{ km}$
Agujero Negro Supermasivo	$10^6M_\odot$	$R_S \approx 3 \times 10^6 \text{ km}$

## Ejemplo Numérico

Para una estrella de neutrones típica:

$$M = 1.4M_\odot \Rightarrow R_S = 2 \times 6.67 \times 10^{-11} \times 1.4 \times 1.99 \times 10^{30} / (3 \times 10^8)^2 \approx 4.2 \text{ km}$$

Mientras que el radio real de una estrella de neutrones es ~ 20 km, lo que significa que  $R > R_S$  y por tanto la luz puede escapar.

### 18.3. Formación de Agujeros Negros

#### Progenitoras Estelares

- **Masa Crítica:** Estrellas con masa inicial  $> 25M_\odot$  típicamente forman agujeros negros.
- **Colapso del Núcleo:** Cuando el núcleo de hierro excede ~  $3M_\odot$ , ni la presión de degeneración neutrónica puede detener el colapso.
- **Formación Directa:** En algunos casos, el colapso puede ser directo sin explosión de supernova.

#### Mecanismo de Formación

1. Agotamiento del combustible nuclear en el núcleo
2. Colapso por gravedad
3. Superación del límite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff
4. Formación del horizonte de eventos
5. Colapso a singularidad (teoremas de Penrose-Hawking)

### 18.4. Tipos de Agujeros Negros

#### Por Masa

- **Agujeros Negros Estelares:**  $3 - 100M_\odot$ , formados por colapso estelar.
- **Agujeros Negros de Masa Intermedia:**  $10^2 - 10^5 M_\odot$ , posiblemente formados por fusiones.
- **Agujeros Negros Supermasivos:**  $10^5 - 10^{10} M_\odot$ , en centros galácticos.

#### Por Propiedades Físicas

- **Schwarzschild:** Sin carga ni rotación.
- **Kerr:** Con rotación (la mayoría en la naturaleza).
- **Reissner-Nordström:** Con carga eléctrica.
- **Kerr-Newman:** Con rotación y carga.

### 18.5. Agujeros Negros en Sistemas Binarios

#### Sistemas Binarios de Rayos X

- **Ejemplos:** Cygnus X-1, LMC X-3, GRS 1915+105
- **Mecanismo:** Acreción de materia de la compañera al agujero negro.
- **Emisión:** Disco de acreción caliente que emite rayos X.
- **Determinación de Masa:** Mediante curvas de velocidad radial de la compañera.

#### Binarias de Agujeros Negros

- **Fuentes de Ondas Gravitacionales:** Como GW150914 (primera detección directa).
- **Formación:** Pueden formarse por:
  - Evolución aislada de binarias masivas
  - Captura dinámica en cúmulos estelares
  - Mecanismos de formación jerárquica

## 18.6. Propiedades del Horizonte de Eventos

### Definición y Características

- **Superficie de no retorno:** Punto donde la velocidad de escape iguala a  $c$ .
- **No es una superficie física:** Es una frontera en el espacio-tiempo.
- **Teoremas de Área:** El área del horizonte nunca decrece (Hawking).
- **Mecánica de Agujeros Negros:** Leyes análogas a la termodinámica.

### Efectos Relativistas

- **Dilatación temporal:** El tiempo se ralentiza cerca del horizonte.
- **Corrimiento al rojo gravitacional:** La luz pierde energía al escapar.
- **Efectos de marea:** Fuerzas diferenciales que pueden destruir objetos.

## 18.7. Detectabilidad y Evidencia Observacional

### Evidencia Indirecta

- **Movimientos Estelares:** En el centro galáctico (Sagittarius A\*).
- **Discos de Acreción:** Emisión de rayos X y características espectrales.
- **Jets Relativistas:** En microcuásares y núcleos galácticos activos.

### Evidencia Directa

- **Ondas Gravitacionales:** Fusiones de agujeros negros binarios.
- **Event Horizon Telescope:** Imagen de la sombra de M87\* y Sgr A\*.

## 18.8. El Telescopio del Horizonte de Eventos (EHT)

### Logros Principales

- **M87\* (2019):** Primera imagen de la sombra de un agujero negro.
- **Sgr A\* (2022):** Imagen del agujero negro en el centro de nuestra galaxia.
- **Técnica:** Interferometría de muy larga base (VLBI) en 1.3 mm.

### Interpretación de las Imágenes

- **Anillo de Fotones:** Región donde los fotones orbitan el agujero negro.
- **Sombra:** Región central oscura correspondiente al horizonte de eventos.
- **Asimetría:** Debida al efecto Doppler y a la rotación del disco.

## 18.9. Agujeros Negros y Termodinámica

### Leyes de la Mecánica de Agujeros Negros

1. **Primera Ley:**  $\delta M = \frac{\kappa}{8\pi} \delta A + \Omega \delta J + \Phi \delta Q$
2. **Segunda Ley:**  $\delta A \geq 0$  (teorema del área)
3. **Tercera Ley:** No se puede alcanzar  $\kappa = 0$  en un proceso físico

### Radiación de Hawking

- **Mecanismo:** Producción de pares partícula-antipartícula cerca del horizonte.
- **Temperatura:**  $T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B} \approx 6 \times 10^{-8} \left( \frac{M_\odot}{M} \right) \text{ K}$
- **Importancia:** Conecta gravedad, termodinámica y mecánica cuántica.

## 18.10. Implicaciones para Sistemas Binarios Compactos

### Evolución de Binarias Masivas

- **Canales de Formación:**
  - Evolución aislada con transferencia de masa
  - Captura dinámica en cúmulos
  - Fragmentación de discos protostelares
- **Problema de la Masa:** Por qué los agujeros negros en binarias tienen masas  $\sim 5 - 15 M_\odot$ ?

### Ondas Gravitacionales de Fusiones

- **Señal Característica:** Chirp seguido de ring-down.
- **Información Extraída:** Masas, espines, distancia.
- **Pruebas de GR:** Compatibilidad con predicciones de Kerr.

## 18.11. Perspectivas Futuras

### Observaciones Mejoradas

- **EHT Mejorado:** Más estaciones, mejores frecuencias.
- **LISA:** Detección de binarias de agujeros negros supermasivos.
- **Telescopios de Rayos X:** Athena, Lynx.

### Desafíos Teóricos

- **Paradoja de la Información:** Qué sucede con la información que cae en un agujero negro?
- **Naturaleza de la Singularidad:** Se necesita una teoría de gravedad cuántica.
- **Agujeros de Gusano:** Posibles conexiones con otras regiones del espaciotiempo.

## 19. Agujeros Negros de Masa Estelar en Sistemas Binarios

Los agujeros negros de masa estelar representan la etapa final de la evolución de estrellas masivas y su estudio en sistemas binarios de rayos X ha proporcionado la evidencia más convincente de su existencia.

### 19.1. Formación y Masa Característica

#### Condición de Colapso

Un agujero negro se forma cuando el núcleo estelar remanente después de la explosión de supernova excede una masa crítica:

$$M_{\text{core}} > 2 - 3 M_\odot$$

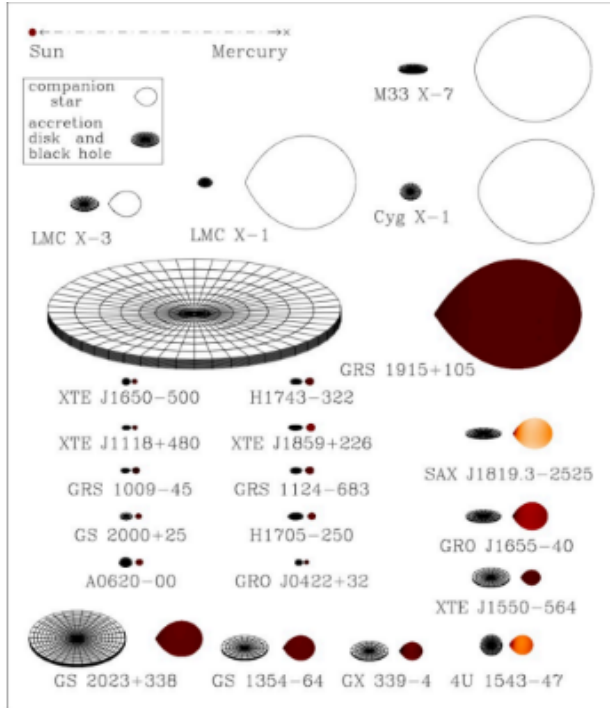
Por encima de este límite, ni la presión de degeneración neutrónica ni la repulsión nuclear pueden contrarrestar la gravedad, leading a colapso inevitable.



## Rango de Masas Observado

- **Mínimo:**  $\sim 3M_{\odot}$  - límite inferior para formación de agujero negro
- **Máximo:**  $\sim 15M_{\odot}$  - típico para agujeros negros estelares
- **Excepciones:** Algunos sistemas como GW190521 sugieren agujeros negros de  $\sim 85M_{\odot}$

## 19.2. Evidencia en Binarias de Rayos X



**Fig. 22.** (Arriba) Comparación de sistemas binarios con agujeros negros. (Abajo) Representación de 22 binarias de rayos X con agujeros negros confirmados dinámicamente. Adaptado de Barabí (2020).

## Confirmación Dinámica

La evidencia más sólida para agujeros negros estelares proviene del estudio de binarias de rayos X donde:

- Se mide la masa del objeto compacto mediante curvas de velocidad radial
- La masa excede el límite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff ( $\sim 3M_{\odot}$ )
- No se observa emisión superficial característica de estrellas de neutrones

## Sistemas Representativos

### 19.3. Formación de Binarias con Agujeros Negros

#### Supervivencia del Sistema Binario

- **Problema:** La explosión de supernova y el "kick" de natal pueden disruptir el sistema binario.
- **Solución:** Para binarias suficientemente cercanas, el "kick" no es lo suficientemente fuerte para disruptir el sistema (Yunelson & Lasota 2008; Paczynski 1990).
- **Mecanismo:** Transferencia de masa previa al colapso puede unir más el sistema.

**Table 17.** Principales binarias de rayos X con agujeros negros confirmados

Sistema	Masa ( $M_{\odot}$ )	BH	Período (días)	Tipo
Cyg X-1	$14.8 \pm 1.0$	5.6		HMXB
LMC X-1	$10.9 \pm 1.4$	3.9		HMXB
LMC X-3	$6.9 \pm 0.8$	1.7		HMXB
A0620-00	$6.6 \pm 0.3$	0.3		LMXB
GRS 1915+105	$12.4 \pm 2.0$	33.5		LMXB
XTE J1118+480	$6.9 \pm 0.3$	0.2		LMXB
GS 2023+338	$9.0 \pm 0.6$	6.5		LMXB

## Canales de Formación

### 1. Canal Aislado:

- Binaria masiva original
- Transferencia de masa durante la evolución
- Colapso de la primaria a agujero negro
- Supervivencia del sistema

### 2. Captura Dinámica:

- En cúmulos estelares densos
- Interacciones de tres cuerpos
- Formación de binarias exóticas

## 19.4. Clasificación de Binarias de Rayos X con Agujeros Negros

### Por Masa de la Compañera

- **HMXB (High Mass X-ray Binaries):** Compañera masiva ( $> 5M_{\odot}$ )
  - Ejemplos: Cyg X-1, LMC X-1, LMC X-3
  - Vientos estelares como fuente de acreción
  - Períodos orbitales típicamente largos
- **LMXB (Low Mass X-ray Binaries):** Compañera de baja masa ( $< 1M_{\odot}$ )
  - Ejemplos: A0620-00, XTE J1118+480
  - Transferencia de masa por desbordamiento del lóbulo de Roche
  - Períodos orbitales cortos

### Por Comportamiento de Acreción

#### – Estados de Acreción:

- Estado quieto (quiescent): baja luminosidad
- Estado de outburst: alta luminosidad
- Estado ultra-luminoso: muy alta luminosidad

- **Transiciones:** Los sistemas pueden transitar entre diferentes estados

## 19.5. Propiedades Observacionales Características

### Espectros de Rayos X

- **Componente Térmica:** Disco de acreción multitemperatura ( $kT \sim 1$  keV)
- **Componente no Térmica:** Corona Comptonizada ( $kT \sim 100$  keV)
- **Líneas de Hierro:** Línea  $K\alpha$  a 6.4-6.9 keV, útil para estudiar efectos relativistas

## Variabilidad Temporal

- **QPOs (Quasi-Periodic Oscillations):** Oscilaciones cuasi-periódicas en diferentes frecuencias
- **Estallidos:** Aumentos bruscos de luminosidad
- **Comportamiento Caótico:** Como en GRS 1915+105

### 19.6. El Papel de los "Kicks" de Natal

#### Origen de los Kicks

- **Asimetría en la Explosión:** Eyección asimétrica de material en la supernova
- **Neutrinos:** Emisión asimétrica de neutrinos
- **Magnetohidrodinámica:** Efectos de campos magnéticos fuertes

#### Consecuencias para Binarias

- **Disrupción:** Sistemas con separaciones grandes son disruptidos
- **Supervivencia:** Sistemas cercanos pueden sobrevivir con órbitas modificadas
- **Excentricidad:** Los kicks pueden inducir excentricidad orbital

### 19.7. Métodos de Determinación de Masa

#### Técnicas Espectroscópicas

- **Curva de Velocidad Radial:**

$$K = \left( \frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_1 \sin i}{(M_1 + M_2)^{2/3}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}}$$

- **Función de Masa:**

$$f(M) = \frac{(M_2 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{PK_1^3}{2\pi G}$$

#### Técnicas Adicionales

- **Eclipses:** Para determinar la inclinación
- **Curvas de Luz:** Modelado del efecto de elipsoidal
- **Espectroscopía de Irradiación:** Para sistemas con discos calientes

### 19.8. Sistemas Notables

#### Cyg X-1: El Primer Candidato

- **Descubrimiento:** 1964, uno de los primeros fuentes de rayos X descubiertas
- **Compañera:** HD 226868, supergigante O9.7 Iab
- **Masa:**  $14.8 \pm 1.0 M_\odot$
- **Importancia:** Primer objeto ampliamente aceptado como agujero negro

#### GRS 1915+105: El Microcuásar

- **Características:** Jets superlumínicos, variabilidad compleja
- **Masa:**  $12.4 \pm 2.0 M_\odot$
- **Importancia:** Prototipo de microcuásar

## A0620-00: El Binario de Referencia

- **Características:** Binaria de baja masa, outburst famoso en 1975
- **Masa:**  $6.6 \pm 0.3 M_\odot$
- **Importancia:** Sistema bien estudiado y caracterizado

### 19.9. Implicaciones para la Astrofísica Estelar

#### Límite Superior de Masa

- **Problema:** Por qué no se observan agujeros negros de masa estelar por encima de  $\sim 15 M_\odot$ ?
- **Pérdida de Masa:** Vientos estelares en metalicidades solares
- **Explosiones de Pair-Instability:** Para estrellas muy masivas
- **Sesgos Observacionales:** Dificultad para detectar sistemas con agujeros negros masivos

#### Evolución de Binarias Masivas

- **Problema de la Masa Faltante:** Discrepancia entre masas de agujeros negros y estrellas de neutrones en binarias
- **Mecanismos de Formación:** Diferentes canales para diferentes tipos de binarias
- **Relación con Supernovas:** Conexión entre tipo de supernova y remanente

### 19.10. Perspectivas Futuras

#### Nuevos Observatorios

- **Athena:** Telescopio de rayos X de próxima generación
- **Lynx:** Concepto para telescopio de rayos X de alta resolución
- **eXTP:** Observatorio chino de timing y polarimetría

#### Estudios Poblacionales

- **Censos Completos:** Identificación de todos los sistemas en la Galaxia
- **Distribuciones de Masa:** Mejor caracterización de la función de masa
- **Conteo de Sistemas Quiescentes:** Búsqueda en el estado de baja luminosidad

#### Sinergia con Ondas Gravitacionales

- **Comparación de Poblaciones:** Agujeros negros en binarias de rayos X vs. fusiones
- **Calibración:** Usar sistemas conocidos para calibrar detectores
- **Búsqueda de Contrapartes:** Identificación de contrapartes electromagnéticas de fusiones

## 20. Agujeros Negros de Masa Intermedia: El Eslabón Perdido

Los agujeros negros de masa intermedia (IMBHs por sus siglas en inglés) representan una clase hipotética de objetos con masas entre  $10^2$  y  $10^5 M_\odot$ , que podría cerrar la brecha entre los agujeros negros de masa estelar y los supermasivos. Su existencia sigue siendo uno de los problemas abiertos más importantes en la astrofísica moderna.

## 20.1. El Problema del Hueco de Masa

### Distribución de Masas de Agujeros Negros

**Table 18.** Clasificación de agujeros negros por masa

Tipo	Rango de Masa	Estado
<b>Agujeros Negros Estelares</b>	$3 - 100M_{\odot}$	Confirmado
<b>Agujeros Negros de Masa Intermedia</b>	$10^2 - 10^5M_{\odot}$	No confirmado
<b>Agujeros Negros Supermasivos</b>	$10^5 - 10^{10}M_{\odot}$	Confirmado

### Importancia Científica

- **Eslabón Evolutivo:** Podrían representar las semillas de los agujeros negros supermasivos.
- **Prueba de Mecanismos de Crecimiento:** Verificarían modelos de formación jerárquica.
- **Cosmología:** Proporcionarían información sobre el universo temprano.

## 20.2. Mecanismos de Formación Propuestos

### En Cúmulos Estelares Densos

- **Fusiones Secuenciales:** Colisiones y fusiones repetidas en núcleos de cúmulos.
- **Crecimiento por Acreción:** Acreción de gas y estrellas en cúmulos jóvenes.
- **Colapso Directo:** De estrellas de población III muy masivas.

### En Galaxias Enanas y Núcleos Desnudos

- **Remanentes de Fusiones:** Núcleos de galaxias disruptadas.
- **Crecimiento Secuencial:** En galaxias de baja masa.
- **Formación Primordial:** En el universo temprano.

## 20.3. Evidencia Observacional

### Fuentes Ultraluminosas de Rayos X (ULXs)

- **Definición:** Fuentes de rayos X con  $L_X > 10^{39}$  erg/s
- **Interpretación:** Podrían ser IMBHs acreciendo a tasas sub-Eddington:

$$L_{\text{Edd}} \approx 1.3 \times 10^{38} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ erg/s}$$

- **Ejemplos Notables:**
  - M82 X-1:  $L_X \sim 10^{41}$  erg/s
  - ESO 243-49 HLX-1:  $L_X \sim 10^{42}$  erg/s
  - M101 ULX-1: Variable, con posibles QPOs

### Dispersión de Velocidades Estelares

- **Fundamento:** La presencia de un IMBH en un cúmulo estelar debería aumentar la dispersión de velocidades en el núcleo.

- **Relación M- $\sigma$ :** Extensión de la relación para agujeros negros supermasivos:

$$M_{\text{BH}} \propto \sigma^{\alpha}$$

- **Resultados:** Mediciones en cúmulos globulares como  $\omega$  Centauri y G1 en M31 son aún inconclusas.

### Propulsores de Rayos X Ultra-Luminosos

- **QPOs:** Oscilaciones cuasi-periódicas en ULXs podrían indicar masas intermedias.
- **Estados espectrales:** Similares a los de binarias de rayos X pero escalados en masa.
- **Variabilidad:** Escalas de tiempo características más largas.

## 20.4. Candidatos Principales

### En Cúmulos Globulares

**Table 19.** Principales candidatos a IMBH en cúmulos globulares

Cúmulo	Masa Estimada ( $M_{\odot}$ )	Método	Confianza
$\omega$ Centauri	$\sim 40,000$	Cinemática	Media
G1 (M31)	$\sim 20,000$	Dispersión de velocidades	Media
M15	$\sim 2,000$	Cinemática	Baja
47 Tucanae	$\sim 2,000$	Púlsares	Media
NGC 6388	$\sim 5,700$	Dispersión de velocidades	Media

### En Galaxias Cercanas

- **M82 X-1:** En el núcleo de la galaxia starburst M82, masa estimada  $\sim 400 - 10,000M_{\odot}$
- **ESO 243-49 HLX-1:** Fuente hiper-luminosa, masa  $\sim 20,000M_{\odot}$
- **NGC 2276-3c:** En galaxia interactuante, posible IMBH de  $\sim 50,000M_{\odot}$

## 20.5. Técnicas de Detección y Confirmación

### Métodos Dinámicos

- **Cinemática Estelar:** Medición de dispersión de velocidades en núcleos de cúmulos.
- **Curvas de Rotación:** Para discos de gas en núcleos galácticos.
- **Proper Motions:** Movimientos propios de estrellas alrededor del candidato.

### Métodos de Emisión

- **Espectroscopía de Rayos X:** Líneas de hierro y características de disco.
- **Timing:** QPOs y variabilidad característica.
- **Relación de Escala:** Comparación con sistemas de masa conocida.

## Ondas Gravitacionales

- **Fusiones de IMBHs:** Señales en el rango de frecuencia de LISA.
- **Extreme Mass Ratio Inspirals (EMRIs):** Fusiones con ratios de masa extremos.
- **Detectabilidad:** Con futuros detectores como LISA y Einstein Telescope.

### 20.6. Problemas y Controversias

#### Explicaciones Alternativas para ULXs

- **Acreción Super-Eddington:** Fuentes de rayos X normales en régimen de acreción supercrítico.
- **Haz Orientado:** Beaming y efectos de orientación.
- **Estrellas de Neutrones:** Púlsares ultraluminosos como M82 X-2.

#### Problemas Dinámicos

- **Retroceso por Ondas Gravitacionales:** Los IMBHs podrían ser expulsados de los cúmulos.
- **Segregación Massiva:** Competencia con otros mecanismos dinámicos.
- **Límites de Observación:** Dificultad para distinguir entre diferentes escenarios.

### 20.7. Implicaciones para la Evolución de Agujeros Negros

#### Semillas de Agujeros Negros Supermasivos

- **Problema del Crecimiento:** Cómo crecen los agujeros negros de  $\sim 100M_{\odot}$  a  $10^9M_{\odot}$  en solo  $\sim 1$  Gyr.
- **Semillas Masivas:** Los IMBHs podrían ser las semillas que aceleran el crecimiento.
- **Crecimiento Jerárquico:** Fusiones sucesivas en el universo temprano.

#### En el Contexto Cosmológico

- **Estructura a Gran Escala:** Distribución de IMBHs en el universo.
- **Reionización:** Posible contribución a la reionización cósmica.
- **Fondo de Ondas Gravitacionales:** Contribución al fondo estocástico.

### 20.8. Resultados de Observaciones Recientes

#### Estudios con el Telescopio Hubble

- **Cinemática en Cúmulos:** Límites superiores para masas de IMBHs.
- **Proper Motions:** Estudios de movimientos estelares en cúmulos cercanos.
- **Fotometría:** Búsqueda de excesos de luz en núcleos.

#### Observaciones de Rayos X

- **Chandra y XMM-Newton:** Caracterización espectral de ULXs.
- **NuSTAR:** Estudios en rayos X duros de candidatos.
- **Swift:** Monitoreo de variabilidad a largo plazo.

## Radio Observaciones

- **VLBI:** Búsqueda de emisión compacta.
- **ALMA:** Estudios de discos de gas en núcleos.
- **SKAI:** Futuros estudios de sensibilidad mejorada.

### 20.9. Perspectivas Futuras

#### Nuevos Observatorios

- **JWST:** Estudios infrarrojos de cúmulos estelares.
- **Athena:** Espectroscopía de alta resolución en rayos X.
- **LISA:** Detección de fusiones de IMBHs.
- **Nancy Grace Roman:** Estudios de lentes gravitacionales.

#### Técnicas Mejoradas

- **Astrometría de Precisión:** Con Gaia y futuras misiones.
- **Espectroscopía Multi-objeto:** En cúmulos estelares.
- **Monitoreo a Largo Plazo:** De candidatos variables.

#### Simulaciones Numéricas

- **Dinámica de Cúmulos:** Modelos N-body mejorados.
- **Formación y Crecimiento:** Simulaciones cosmológicas.
- **Señales de Ondas Gravitacionales:** Predicciones para detectores.

### 20.10. Conclusiones sobre el Estado Actual

- **Evidencia Circunstancial:** Existe evidencia sugerente pero no concluyente.
- **Múltiples Líneas de Investigación:** Se necesitan diferentes enfoques.
- **Importancia Fundamental:** La confirmación tendría profundas implicaciones.
- **Futuro Prometedor:** Nuevos observatorios podrían resolver el misterio.

## 21. Agujeros Negros Supermasivos (SMBH) en Sistemas Binarios

### 21.1. Características Generales

Los Agujeros Negros Supermasivos (SMBH, por sus siglas en inglés) son objetos con un rango de masa extremadamente alto:

$$M_{\text{SMBH}} \sim 10^5 - 10^{10} M_{\odot} \quad (1)$$

Se encuentran, con alta probabilidad, en los centros de la mayoría de las galaxias masivas e intermedias.

### 21.2. Formación y el Problema de los Tiempos

El proceso de formación de los SMBH no se comprende completamente. Una hipótesis es que se forman a partir de un agujero negro de menor masa (por ejemplo, de origen estelar) que incrementa su masa mediante **acreción**. Sin embargo, existe un problema fundamental:

No está claro cómo los agujeros negros en galaxias distantes (a alto redshift) pueden crecer hasta el límite superior de masa ( $\sim 10^{10} M_{\odot}$ ) en un tiempo inferior al **Tiempo de Hubble**.

### 21.3. Relación con Estrellas Binarias y Binarias de AGN

Este contexto es relevante para nuestra asignatura por las siguientes razones:

- **Semillas Binarias:** La coalescencia de agujeros negros de masa estelar en sistemas binarios puede proporcionar las "semillas" a partir de las cuales crecen los SMBH mediante acreción y fusiones posteriores.
- **AGN Binarios:** Cuando dos galaxias con sus propios SMBH se fusionan, se puede formar un **sistema binario de SMBH** en el núcleo de la galaxia resultante. El estudio de la dinámica de estos sistemas es una extensión directa de la física de estrellas binarias.
- **Pruebas Observacionales:** La detección de ondas gravitacionales de sistemas binarios de SMBH con el observatorio *LISA* será una prueba directa de este modelo de formación y crecimiento.

La acreción en un SMBH en un sistema binario puede verse modulada por la interacción con su compañera, afectando la luminosidad del Núcleo Galáctico Activo (AGN) y proporcionando un canal de crecimiento de masa alternativo o complementario.

## 22. El Agujero Negro en el Centro de la Vía Láctea

Las observaciones del centro galáctico proporcionan la evidencia más directa de la existencia de un Agujero Negro Supermasivo (SMBH), conocido como **Sagittarius A\* (Sgr A\*)**.

### 22.1. Monitoreo de la Estrella S2

El estudio de la órbita de la estrella **S2** alrededor de Sgr A\* ha sido fundamental para confirmar la presencia del agujero negro y testear efectos de la Relatividad General (RG).

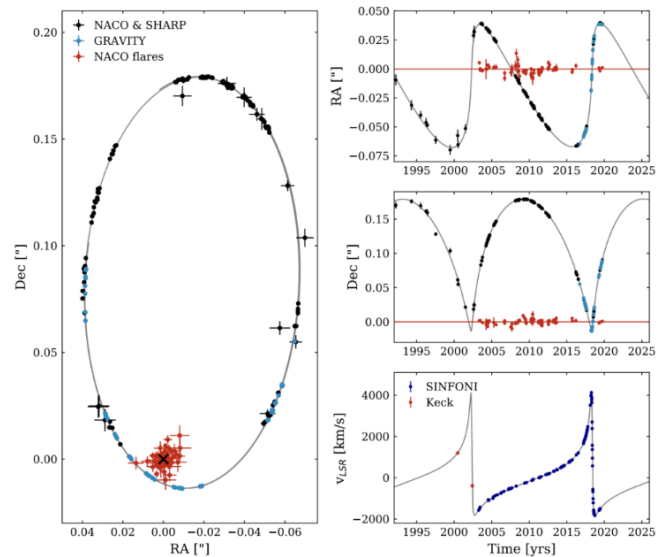
### 22.2. Resultados Clave y Técnicas Observacionales

- **Técnicas Instrumentales:** Se utilizaron instrumentos de vanguardia como:
  - **NACO & SHARP:** Para astrometría de alta precisión
  - **GRAVITY:** Interferometría de muy alta resolución angular
  - **SINFONI & Keck:** Para espectroscopía y mediciones de velocidad radial
- **Precesión del Periastro (SP):** La órbita de S2 muestra una **precesión relativista** que impide que la órbita se cierre, consistente con las predicciones de la Relatividad General para un agujero negro de  $\sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$ .
- **Emisión de Sgr A\*:** Los puntos rojos corresponden a emisión infrarroja durante estados de brillo (*flares*) del agujero negro mismo, permitiendo localizarlo directamente respecto a S2.

### 22.3. Relevancia para Estrellas Binarias

El sistema S2-Sgr A\* representa el **caso límite de un sistema binario** donde un componente es un agujero negro supermasivo:

- **Dinámica Kepleriana Extrema:** Permite estudiar órbitas en regímenes de campo gravitatorio muy fuerte, donde efectos relativistas son medibles.



**Fig. 23.** Resumen de los resultados observacionales del monitoreo de la órbita S2-Sgr A\* desde 1992 hasta 2019. **Izquierda:** Posiciones astrométricas de S2 desde SHARP, NACO (puntos negros) y GRAVITY (puntos azules), con la órbita de mejor ajuste en RG (línea gris). La órbita no se cierra debido a la Precesión Schwarzschild (SP). **Derecha:** Desplazamiento en Ascensión Recta (AR) y Declinación (Dec) de S2 y de la emisión infrarroja de Sgr A\* respecto al centro de masa. **Inferior:** Velocidad radial de S2. Adaptado de los equipos: NACO, SHARP, GRAVITY, SINFONI y Keck.

- **Precesión Relativista:** Análoga a la precesión de Mercurio pero mucho más pronunciada, demostrando cómo la RG modifica órbitas en sistemas binarios masivos.
- **Efecto Römer:** El retardo en la propagación de la luz afecta la medición de posiciones aparentes, crucial para la astrometría de precisión en binarias.
- **Test de Teorías de Gravedad:** El sistema sirve como laboratorio para teorías gravitacionales beyond RG, parametrizadas mediante el formalismo PPN (Parametrized Post-Newtonian).

### 22.4. Parámetros del Sistema

- **Período orbital de S2:**  $\sim 16$  años
- **Excentricidad:**  $\sim 0.88$  (órbita muy elíptica)
- **Masa de Sgr A\*:**  $\sim 4.1 \times 10^6 M_{\odot}$
- **Distancia al Centro Galáctico:**  $\sim 8.1$  kpc

Este sistema único permite estudiar **efectos relativistas** que serían indetectables en sistemas binarios de masa estelar convencionales, proporcionando un vínculo crucial entre la física de binarias estelares y la de los agujeros negros supermasivos.

## 23. Propiedades del Agujero Negro Central de la Vía Láctea

El estudio del centro galáctico ha revelado propiedades fundamentales de Sagittarius A\* (Sgr A\*), el agujero negro supermasivo central de nuestra galaxia.

### 23.1. Parámetros Fundamentales de Sgr A\*

- **Masa:**  $M_{\text{Sgr A}^*} = (4.1 \pm 0.1) \times 10^6 M_{\odot}$
- **Distancia al Sistema Solar:**  $R_0 = 8.1 \pm 0.1$  kpc
- **Radio de Schwarzschild:**  $R_S \approx 0.08$  UA
- **Tamaño angular del horizonte:**  $\theta_S \approx 10 \mu\text{as}$

### 23.2. Estrellas S en Órbitas Cerradas

Las llamadas **estrellas S** orbitan Sgr A\* con parámetros orbitales extremos:

Estrella	Período (años)	Excentricidad	Periastro (UA)
S2	16.0	0.88	120
S12	58.9	0.89	99
S102	11.5	0.68	228

**Table 20.** Parámetros orbitales de algunas estrellas S alrededor de Sgr A\*

### 23.3. Relevancia para Sistemas Binarios Extremos

El sistema Sgr A\*-estrellas S representa un **laboratorio único** para estudiar:

#### 23.3.1. Dinámica Relativista

- **Precesión del Periastro:** La órbita de S2 muestra  $\Delta\omega = 12'$  por órbita
- **Desplazamiento al Rojo Gravitacional:** Medido con precisión  $\Delta\lambda/\lambda \approx 200$  km/s
- **Retardo de Shapiro:** Efecto de retardo temporal de la señal

#### 23.3.2. Acreción en Régimen de Campo Débil

A diferencia de los sistemas binarios de rayos X, Sgr A\* muestra:

- **Baja luminosidad:**  $L_{\text{bol}} \approx 10^{-9} L_{\text{Edd}}$
- **Flujos de acreción sub-Eddington**
- **Procesos de radiación no térmicos**

### 23.4. Comparación con Binarias de Rayos X

Parámetro	Binarias de Rayos X	Sgr A*-S2
Masa del compacto	$5 - 20 M_{\odot}$	$4.1 \times 10^6 M_{\odot}$
Período orbital	horas-meses	16 años
Separación	$10^6 - 10^7$ km	$10^9$ km
Excentricidad típica	baja	0.88

**Table 21.** Comparación entre sistemas binarios convencionales y el sistema Sgr A\*-S2

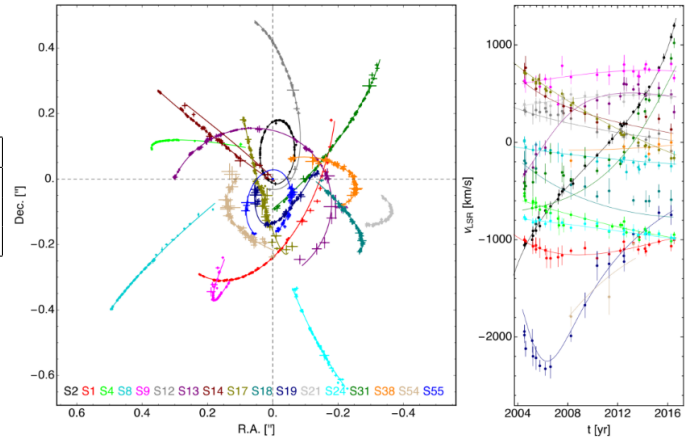
### 23.5. Implicaciones para Formación de Sistemas Binarios

El estudio de Sgr A\* y sus estrellas compañeras proporciona información sobre:

- **Migración radial** de estrellas hacia el núcleo galáctico
- **Procesos de disipación** en discos de acreción circumnucleares
- **Formación de estrellas** en entornos de alta densidad
- **Interacciones dinámicas** en cúmulos estelares centrales

### 23.6. Futuras Direcciones de Investigación

- **Event Horizon Telescope:** Imágenes de la sombra del agujero negro



**Fig. 24.**

- **GRAVITY+:** Medición de efectos relativistas de segundo orden
- **ELT:** Descubrimiento de estrellas más cercanas al horizonte
- **LISA:** Detección de binarias de agujeros negros en el núcleo

El sistema Sgr A\* representa el **caso límite** de sistema binario donde un componente es un agujero negro supermasivo, permitiendo estudiar efectos de Relatividad General inaccesibles en sistemas binarios convencionales.

## 24. El Agujero Negro en M87 (M87\*)

El agujero negro supermasivo en el centro de la galaxia M87 representa un hito en la astrofísica observacional, siendo el primer agujero negro directamente imageado por el **Event Horizon Telescope (EHT)**.

### 24.1. Características Fundamentales de M87\*

- **Masa:**  $M \sim 6.5 \times 10^9 M_{\odot}$  (aproximadamente 1000 veces más masivo que Sgr A\*)
- **Distancia:**  $\sim 16.4$  Mpc
- **Radio de Schwarzschild:**  $R_S \approx 120$  UA
- **Tamaño angular:**  $\sim 40 \mu\text{as}$  (comparable al de Sgr A\* a pesar de la mayor distancia)

### 24.2. La Imagen Histórica del EHT

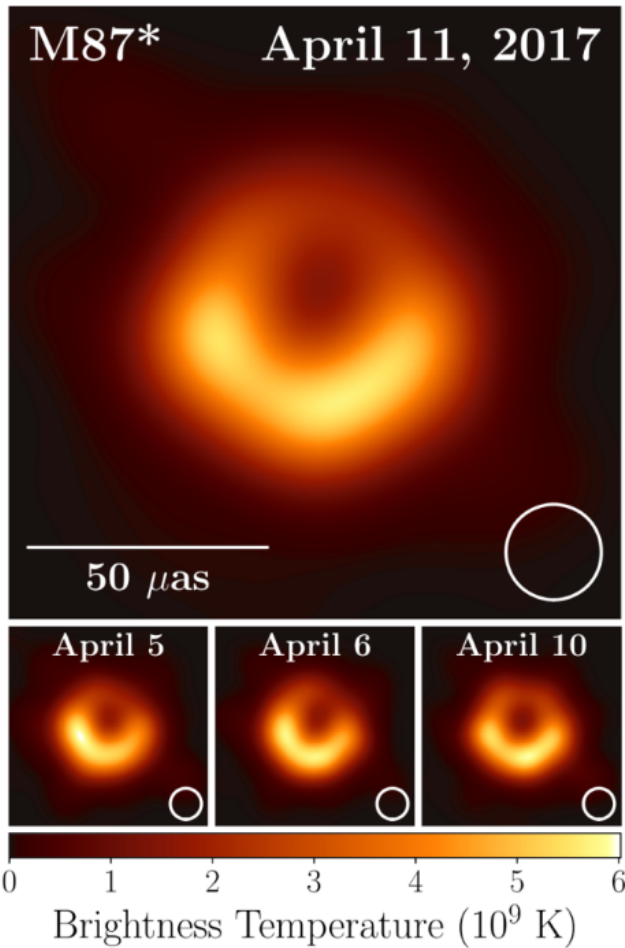
### 24.3. Características Clave de la Imagen

- **Anillo de Fotones:** La imagen muestra el "anillo de fotones" predicho por la Relatividad General, correspondiente a órbitas de fotones inestables alrededor del agujero negro.
- **Sombra del Agujero Negro:** La región central oscura corresponde a la "sombra" del agujero negro, aproximadamente  $\sim 2.6 R_S$  de diámetro.
- **Asimetría del Anillo:** La brillantez asimétrica del anillo se debe al efecto Doppler relativista del gas en movimiento orbital.
- **Estabilidad Temporal:** Las imágenes de diferentes días muestran una estructura consistente, indicando estabilidad en la escala de tiempo observada.

### 24.4. Temperatura de Brillo y Procesos Físicos

La temperatura de brillo extremadamente alta ( $T_b \sim 10^9 - 10^{10}$  K) indica:





**Fig. 25.** Imagen del EHT de M87\* desde observaciones del 11 de abril de 2017. **Arriba:** Imagen promedio de M87\* mostrando la característica estructura de anillo asimétrico. **Abajo:** Imágenes de diferentes días mostrando la estabilidad de la estructura básica. La barra de escala indica 50  $\mu\text{as}$ . Adaptado del equipo del EHT.

- **Emisión no térmica** de electrones relativistas
- **Procesos de sincrotrón** en el plasma magnetizado
- **Auto-absorción** en las regiones más densas

#### 24.5. Relevancia para Sistemas Binarios y Acreción

##### 24.5.1. Geometría del Disco de Acreción

- **Inclinación del Disco:**  $i \sim 20^\circ$  respecto a la línea de visión
- **Dirección del Jet:** Alineado con el eje de rotación del agujero negro
- **Flujo de Acreción:**  $\dot{M} \sim 10^{-3} - 10^{-2} M_\odot \text{ año}^{-1}$

##### 24.5.2. Comparación con Binarias de Rayos X

Característica	Binarias de Rayos X	M87*
Escala de tamaño	$10^3 - 10^4 \text{ km}$	$10^{10} \text{ km}$
Tiempo dinámico	segundos-minutos	días-semanas
Emisión dominante	Rayos X	Radio/Óptico
Mecanismo de emisión	Acreción térmica	Sincrotrón

**Table 22.** Comparación entre sistemas binarios de rayos X y M87\*

#### 24.6. La Simulación de Luminet (1979)

El diagrama de trayectorias de fotones muestra la base teórica para entender la imagen observada:

- **Trayectorias Críticas:** Fotones con parámetro de impacto  $b \approx 5.2 GM/c^2$
- **Anillo de Fotones:** Límite donde los fotones orbitan inestablemente
- **Sombra:** Región de la que no escapa luz al observador

#### 24.7. Implicaciones para AGN y Jets Relativistas

M87\* es particularmente importante porque:

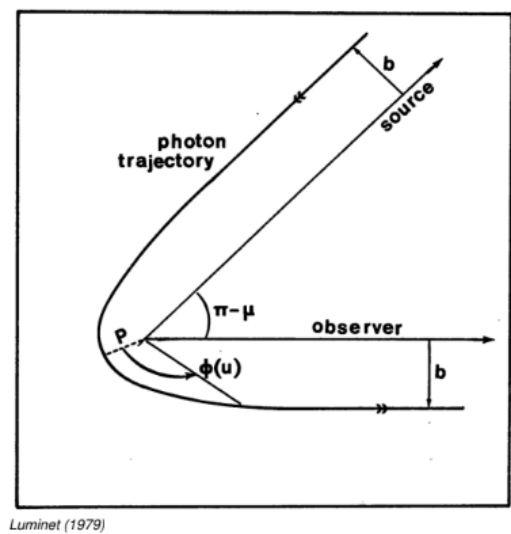
- **Jet Relativista:** Posee un jet bien colimado de  $\sim 5000$  años-luz
- **Mecanismo de Lancamiento:** El jet probablemente se alimenta de la rotación del agujero negro (proceso Blandford-Znajek)
- **Conectividad Escalar:** Muestra cómo procesos en escalas de  $R_S$  afectan estructuras de escala kiloparsec

#### 24.8. Lecciones para Sistemas Binarios

El estudio de M87\* proporciona insights para sistemas binarios:

- **Geometría de Acreción:** Similitudes en la estructura del disco de acreción
- **Procesos de Emisión:** Mecanismos radiativos análogos en diferentes escalas
- **Efectos Relativistas:** Manifestaciones de RG independientes de la escala de masa
- **Retroalimentación:** Cómo los objetos compactos afectan su entorno

La imagen de M87\* representa la culminación de décadas de trabajo teórico y observacional, proporcionando una verificación directa de las predicciones de la Relatividad General en el régimen de campo fuerte y estableciendo un vínculo crucial entre la física de agujeros negros supermasivos y sistemas binarios estelares.



Luminet (1979)

**Fig. 26.**