

Subdwarfs

Mauro Jélvez

1. Introducción General

Las estrellas subdwarf calientes (SD) representan una población estelar fascinante y compleja que actúa como puente evolutivo entre las estrellas de la rama horizontal extrema (EHB) y las enanas blancas. Este informe proporciona un análisis exhaustivo del trabajo de Ulrich Heber sobre estos objetos astronómicos únicos, explorando su naturaleza física, procesos de formación, características observables y su importancia para comprender la evolución estelar binaria.

2. Definiciones Fundamentales y Conceptos Clave

2.1. Diagrama de Hertzsprung-Russell (HRD)

El HRD es la herramienta diagnóstica fundamental en astrofísica estelar. En este diagrama se representa la magnitud absoluta versus el color (o alternativamente, luminosidad versus temperatura efectiva). Este diagrama permite visualizar diferentes estadios de evolución estelar:

- **Secuencia Principal (MS):** Estrellas que queman hidrógeno en su núcleo
- **Rama de Gigantes Rojos (RGB):** Estrellas evolucionadas con núcleo inerte de helio
- **Rama Horizontal (HB):** Estrellas que queman helio en el núcleo
- **Rama Asintótica de Gigantes (AGB):** Gigantes con quema de hidrógeno y helio en capas distintas
- **Enanas Blancas (WD):** Estado final degenerado de estrellas de baja masa

2.2. Estadios Evolutivos Específicos de Subdwarfs

sdB - Subdwarf B Estrellas subdwarf tipo B, caracterizadas por espectros dominados por hidrógeno con líneas de helio débiles

sdO - Subdwarf O Estrellas subdwarf tipo O, más calientes, con líneas de helio prominentes

sdOB Grupo intermedio que muestra características de ambos tipos

EHB - Rama Horizontal Extrema Núcleos de gigantes rojos con envolturas muy ligeras ($\lesssim 0.01M_{\odot}$)

2.3. Sistemas Binarios Cataclísmicos

- **Desbordamiento de Lóbulo de Roche (RLOF):** Transferencia de masa entre componentes
- **Envoltente Común (CE):** Fase donde ambas componentes quedan envueltas
- **PCEB:** Binary de post-envoltente común
- **Fusión:** Combinación de dos componentes en uno solo

3. Naturaleza Física de las Estrellas Subdwarf Calientes

3.1. Estructura Interna

Las estrellas subdwarf calientes poseen una estructura interna característica:

1. **Núcleo:** Núcleo quemador de helio convectivo (típicamente $\sim 0.5M_{\odot}$)
2. **Manto de Helio:** Capa de helio envolviendo el núcleo ($\sim 0.35M_{\odot}$)
3. **Envoltente de Hidrógeno:** Extremadamente ligera, $< 0.02M_{\odot}$
4. **Núcleo C/O:** Centro inerte residual

Esta estructura contrasta significativamente con las gigantes rojas normales, que poseen envolturas mucho más masivas y, por lo tanto, pueden mantener la quema de hidrógeno en capas.

3.2. Propiedades Atmosféricas

3.2.1. Composición Química Diversa

Las atmósferas de las estrellas subdwarf muestran una sorprendente diversidad en su composición:

- **Subdwarfs Pobres en Helio (He-poor sdB y sdOB):**
 - Espectros dominados por hidrógeno
 - Deficiencia de helio que puede ser varios órdenes de magnitud
 - Abundancias subsolares de elementos ligeros (C, N, Si)
- **Subdwarfs Ricos en Helio (He-strong):**
 - Espectros dominados por helio
 - Pueden estar casi desprovistos de hidrógeno
- **Subdwarfs Intermedios (iHesdOB):**
 - Abundancia de helio intermedia
 - Enriquecimiento extremo en elementos pesados (10^4 a 10^5 veces solar)
 - Enriquecimiento particular en Y, Zr, Sn, y Pb
- **Subdwarfs Extremadamente Ricos en Helio (eHesdO):**
 - Pueden dividirse en subgrupos ricos en nitrógeno, carbono, o ambos
 - Los ricos en N se encuentran en temperaturas más frías ($\approx 40,000$ K)
 - Los ricos en C son más calientes

3.2.2. Difusión Atómica y Enriquecimiento de Metales Pesados

Los patrones de abundancia peculiares observados en los subdwarfs se atribuyen principalmente a:

1. **Sedimentación Gravitacional:** Elementos pesados se hunden hacia el interior

2. **Levitación Radiativa:** Radiación UV intensas contrarresta la sedimentación para ciertos elementos
3. **Nucleosíntesis de Captura de Neutrones:** Posibles en ciertas condiciones

Recientemente, Battich et al. (2023) propuso un mecanismo donde la mezcla convectiva de hidrógeno en regiones de quema de helio durante el destello de helio podría producir neutrones via ^{12}C y $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$, potencialmente explicando el enriquecimiento extremo observado.

3.3. Temperaturas Efectivas y Gravedades Superficiales

Los estudios espectroscópicos han revelado:

- Temperaturas efectivas: 15,000 K a 70,000 K
- Gravedades superficiales ($\log g$): 4.6 a 6.2 (en unidades CGS)
- Distribuciones de parámetros consistentes entre diferentes muestras

4. Formación de Estrellas Subdwarf Calientes

4.1. Problema de la Pérdida de Envolvente

Una pregunta central en la astrofísica estelar es: ¿Por qué las estrellas subdwarf han perdido sus envolturas?

4.1.1. Pérdida de Envolvente en AGB

Para estrellas de la rama asintótica de gigantes (AGB), el mecanismo es relativamente bien comprendido:

- **Vientos Impulsados por Polvo:** Vientos supersónicos
- **Pulsaciones:** Oscilaciones de la estrella
- **Pulsos Térmicos:** Interacción entre capas H y He

Estos mecanismos son suficientes porque la envoltura de una AGB es muy grande, poco densa, y gravitatoriamente débilmente ligada.

4.1.2. Desafío en RGB

Sin embargo, para estrellas en la rama horizontal extrema que perdieron sus envolturas en la RGB:

- La envoltura es más caliente, densa y fuertemente ligada
- Los mecanismos internos son insuficientes
- Se propone un mecanismo alternativo: **erosión por compañero binario**

4.2. Evolución Binaria

4.2.1. Desbordamiento de Lóbulo de Roche Estable

Cuando una estrella primaria expandida llena su lóbulo de Roche, se transfiere masa a través del punto de Lagrange interno. Si esta transferencia es dinámicamente estable:

- La mayoría de la envoltura primaria es transferida al secundario
- Se forma un sistema PCEB con período orbital muy corto
- El primario queda como un subdwarf caliente desnudo

4.2.2. Desbordamiento de Lóbulo de Roche Inestable y Envolvente Común

Si la transferencia es dinámicamente inestable:

1. La tasa de transferencia es demasiado alta para que el secundario la acrete
2. El material se acumula formando una envoltura común
3. Fricción dentro de la envoltura común frena el movimiento orbital
4. Si hay suficiente energía, la envoltura es expulsada
5. Resultado: sistema de período muy corto (horas a días)

4.2.3. Criterio de Estabilidad

La estabilidad depende del cociente de masas inicial: $q = M_1/M_2$

- $q < q_{crit}$ (≈ 1.2 a 1.5): Transferencia estable
- $q > q_{crit}$: Transferencia inestable, formación de CE

4.3. Canales de Formación Observados

4.3.1. Canal Débil

- Cociente de masas bajo: $q < 1.2 - 1.5$
- Primera RLOF: estable \rightarrow sdB + MS en órbita ancha
- Segunda RLOF: inestable \rightarrow CE expulsada
- Resultado: sdB + WD en período ultracorto (0.1-10 días)

4.3.2. Canal Fuerte

- Cociente de masas alto: $q > 1.2 - 1.5$
- Primera RLOF: inestable desde el inicio
- CE inmediato y expulsión
- Resultado: sdB + MS en período corto (0.1-10 días)

4.3.3. Canal de Período Largo

- Cociente de masas bajo
- Primera RLOF estable mantiene RLOF estable
- Resultado: sdB + MS en período largo (10-500 días o más)

4.4. Parámetros Mal Conocidos en Modelos Binarios

Los modelos de síntesis de población binaria enfrentan incertidumbres críticas:

1. **Eficiencia de Envolvente Común (α_{CE}):** Fracción de energía orbital convertida en energía para expulsar la envoltura
2. **Umbral de Cociente de Masas (q_{crit}):** Valor exacto entre 1.2-1.5
3. **Dependencia de Metalicidad:** Radios de gigantes cambian significativamente con metalicidad
4. **Transferencia Conservativa vs No-Conservativa:** Cantidad de masa que permanece en el sistema

5. Evidencia Observacional de Binariedad

5.1. Variabilidad de Velocidad Radial

Aproximadamente el 50% de los subdwarfs aparentemente simples muestran variaciones periódicas de velocidad radial (RV):

- Períodos: desde horas hasta varios días
- Semi-amplitudes: hasta ≈ 500 km/s
- Indicativo de compañeros no-vistos

5.2. Espectros Compuestos

Aproximadamente una tercera parte de los subdwarfs conocidos son sistemas de espectro compuesto (SB2) con compañeros MS de tipo F, G, o K:

- Períodos orbitales: meses a años
- Separaciones: algunas unidades astronómicas
- Metalicidades bajas: $[Fe/H] = -0.8$ a 0.0
- Correlación observada: metalicidad disminuye con período decreciente

5.3. Estrellas Solitarias (“Lone Wolves”)

Aproximadamente una tercera parte de los subdwarfs:

- No muestran variabilidad RV
- Sin evidencia de compañero luminoso
- Se presume que se formaron via fusión de componentes binarias

6. Binarias de Período Ultracorto y Sus Consecuencias

6.1. Sistemas Roche-Lobe Filling

Recientemente se descubrieron dos sistemas con períodos de 39 y 56 minutos donde el subdwarf llena su lóbulo de Roche:

- Transferencia de masa en progreso: $\dot{M} \approx 10^{-9} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$
- Aunque se esperaba un disco de acreción, la evidencia directa es elusiva

6.2. Compañeros Masivos

Un descubrimiento inesperado es **BPS BS 16981-0016**:

- Objeto compacto: $1.05 - 1.9 M_{\odot}$
- Período orbital: 892 días (sorprendentemente largo)
- Detectado astrométricamente via Gaia
- Abre nuevo canal evolutivo

6.3. Escasez de Pares de Movimiento Propio Común

Un hallazgo paradójico:

- Se esperaba que muchos sistemas SD+FGK-MS fueran espacialmente resolvibles
- Sin embargo, solo $\approx 0.05\%$ son detectados como pares de movimiento propio común
- Mucho menor que la fracción esperada si las distribuciones de separación fueran normales
- Posible explicación: Sistemas triples jerárquicos

6.4. Sistemas Triples Jerárquicos

Preece et al. (2022) demostró que:

- Sistemas triples pueden producir binarias de período corto SD con compañeros no-interactuantes amplios
- Abre un canal evolutivo adicional para la formación de SD
- Aún queda explorar el amplio rango de parámetros triples posibles

7. Excentricidades Orbitales Inesperadas

7.1. Observación

Para sistemas binarios SD+FGK-MS de período largo:

- Órbitas no son circulares, como se predicha
- Excentricidades se incrementan hasta $e \approx 0.25$ con período creciente
- Contradice predicciones canónicas de circularización tidal

7.2. Hipótesis de Bombeo de Excentricidad

Vos et al. (2015) propusieron que:

- Pueden reintroducirse excentricidades durante la fase de transferencia de masa
- Modelado con RLOF dependiente de fase
- Requiere un disco circumbinario acumulado

Sin embargo, los modelos predicen que la excentricidad debería disminuir con período, opuesto a lo observado.

8. Supernovas de Tipo Ia y Progenitores

8.1. Escenarios de Formación

8.1.1. Detonación Doble (DD)

Un escenario alternativo al colapso de Chandrasekhar:

1. Binaria SD + enana blanca C/O
2. El SD transfiere helio al WD
3. Una vez acumulada masa crítica de helio: explosión de la capa He
4. La explosión detona el núcleo C/O
5. WD puede ser sub-Chandrasekhar pero aún explotar

8.2. Candidatos Viables

Solo dos sistemas calificaban como progenitores DD viables con tiempos de fusión menores que la vida del EHB:

1. **CD-30°11223**: $P = 70.53$ min
2. **PTF1 J2238+7430**: $P = 76$ min

Sin embargo, Piersanti et al. (2024) sugieren que mezcla inducida por rotación en el WD acrecionante podría prevenir la SN Ia en estos sistemas.

8.3. Sistema Problemático: ZTF J0526+5934

- Período extremadamente corto: 20.5 minutos
- Masa muy baja: $0.32 - 0.36 M_{\odot}$
- O no es una enana blanca sino una enana blanca de masa extremadamente baja
- Fusionará en solo 1.4 millones de años
- No se espera que produzca SN Ia

9. Fuentes de Ondas Gravitacionales

9.1. Importancia Científica

Las binarias de período ultracorto SD+WD son candidatos para detección de ondas gravitacionales por observatorios espaciales futuros como:

- **LISA**: Interferómetro Laser Space Antenna (ESA)
- **TianQin**: Observatorio de ondas gravitacionales chino

9.2. Candidatos de Detección

De los seis sistemas de período más corto (< 100 minutos):

- **CD-30°11223**: Probable detección ambos observatorios
- **HD 265435**: Probable detección ambos observatorios

- **ZTF J0526+5934**: Fuente de verificación, probable detección

La amplitud de las ondas gravitacionales aumenta con:

$$\text{GW Amplitude} \propto \frac{M}{\text{período}^2}$$

Por lo tanto, sistemas de menor período son mejores candidatos.

10. Estrellas Fugitivas de Velocidad Hiperbólica

10.1. Mecanismo de Eyección

Si un WD explota como SN Ia en un sistema binario:

1. La explosión puede disrumpir el sistema binario
2. El donante de SD superviviente es eyectado a alta velocidad
3. Velocidades pueden ser suficientes para escapar la Galaxia

10.2. Ejemplo Observado: US 708

- Descubierto en 2005
- Primera estrella SD de velocidad hiperbólica confirmada
- Simulaciones sugieren que candidatos adicionales han sido pasados por alto

10.3. Búsqueda sin Éxito

A pesar de una búsqueda extensa de SD no ligadas (Geier et al., 2024), no se han encontrado candidates adicionales. Esto sugiere:

- Las predicciones teóricas pueden ser incorrectas
- La frecuencia podría ser menor a lo esperado
- Los criterios de detección deben refinarse

11. Estrellas Subdwarf Simples: Formación por Fusión

11.1. Escenario de Fusión de Enanas Blancas de Helio

Aunque la formación de subdwarfs simples no está completamente clara, el escenario de fusión de enanas blancas de helio ha ganado tracción recientemente.

11.1.1. Mecanismo Físico

1. Emisión de ondas gravitacionales causa contracción orbital
2. Pérdida de energía y momento angular
3. La enana blanca de helio menos masiva (por lo tanto más grande) llena su lóbulo de Roche
4. Proceso descontrolado: la otra es destruida en algunas revoluciones

11.2. Modelos de Fusión

Zhang y Jeffery (2012) consideran tres escenarios dependiendo de la tasa de transferencia de masa:

11.2.1. Fusión Lenta

- Tasa de acreción: $\dot{M} = 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$
- Se forma un disco
- Temperaturas insuficientes para nucleosíntesis
- Resultado: SD rico en N, pobre en C

11.2.2. Fusión Rápida

- Tasa de acreción: $\dot{M} = 10^4 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$
- Se completa en minutos
- Se forma una corona caliente (10^8 K)
- Suficientemente caliente para producir C via proceso 3α
- Resultado: SD rico en C, pobre en N

11.2.3. Fusión Compuesta

- Fase inicial rápida hasta acretar $0.1 M_{\odot}$
- Luego procede como fusión lenta
- Produce tanto disco como corona
- Resultado: SD rico en C y N

11.3. Predicciones vs Observaciones

Las predicciones de modelos de fusión:

- Predicen que los ricos en N deberían ser ≈ 2 veces más abundantes que los ricos en C
- Debe verificarse con muestras completas de SD

12. Campos Magnéticos en Subdwarfs

12.1. Ampliación de Campo en Fusiones

12.1.1. Predicción Teórica

Se predice que el proceso de fusión amplifica dramáticamente los campos magnéticos mediante una dínamo de pequeña escala en el producto de fusión rápidamente rotante.

Recientemente, Pakmor et al. (2024) encontraron que también puede ocurrir una dínamo de gran escala por inestabilidad magneto-rotacional, produciendo:

- Campo azimutal ordenado de gran escala
- Persistencia hasta mucho después de la fusión para fusiones de masas iguales
- Disipación rápida para fusiones de masas desiguales

12.1.2. Dependencia del Cociente de Masas

- **Fusiones de masa desigual**: La quema de He comienza en capa, creando zona convectiva que borra el campo
- **Fusiones de masa igual**: La quema de He comienza en núcleo, el campo persiste

Esto explica la pequeña fracción de SD fuertemente magnéticos observados.

12.2. Observaciones Recientes

12.2.1. Primer Descubrimiento Confirmado

Dorsch et al. (2022) descubrió serendipitosamente un iHesdO con espectro Zeeman-dividido:

- Campo magnético: 350 kG
- Pronto se encontraron tres iHesdOs adicionales
- Propiedades atmosféricas similares
- Fuerte soporte para escenario de fusión

12.2.2. Ubicación en HRD

- Los SD magnéticos observados se ubican cerca de la secuencia de helio (HeMS)
- Masas más altas: $\approx 0.8 M_{\odot}$

- Consistente con fusiones de enanas blancas de helio masivas

13. Pulsaciones Estelares y Asterosismología

13.1. Mecanismo de Excitación

Las pulsaciones en SD se excitan mediante un mecanismo de opacidad (ionización):

1. Una zona de metales parcialmente ionizados (Fe, Ni) bloquea la radiación
2. La zona se calienta, se expande, liberando radiación
3. Se enfría, contrae, recreando la zona opaca
4. Ciclo se repite, conduciendo a oscilaciones

Este mecanismo requiere que Fe y Ni estén enriquecidos via levitación radiativa.

13.2. Tipos de Modos de Pulsación

13.2.1. Modos P (Pressure)

- Fuerza restauradora: gradiente de presión
- Temperatura: 28,000 - 36,000 K
- Períodos: pocos minutos
- Sondean capas externas

13.2.2. Modos G (Gravity)

- Fuerza restauradora: flotabilidad
- Temperatura: 22,000 - 30,000 K
- Períodos: 45-250 minutos
- Penetran profundamente al interior

13.2.3. Pulsadores Híbridos

- Muestran tanto modos p como modos g
- Especialmente valiosos para asterosismología
- Permiten sondear tanto capas externas como interiores

13.3. Observaciones Revolucionarias

13.3.1. Misión Kepler

La misión Kepler fue un punto de inflexión:

- Fotometría de precisión sin precedentes
- Cadencia corta: 1 minuto
- Interrupción casi nula durante meses
- Permitió resolver espectros de frecuencia de pulsación rico en detalles

13.3.2. TESS

La misión TESS continúa esta tradición:

- Cadencia ultra-corta: 20 segundos
- Observó aproximadamente la mitad de los SD conocidos
- Proporciona datos sin precedentes de pulsadores p-mode

13.4. Atrapamiento de Modos

Se observa frecuentemente atrapamiento de modos donde:

- Discontinuidades en la estructura (transiciones H/He y He/C-O)
- Definen cavidades donde los modos pueden atraparse
- Información valiosa sobre ubicación de discontinuidades

14. Pulsadores de Amplitud Grande Azul (BLAP)

14.1. Definición y Propiedades

Una nueva clase de pulsador recientemente identificado:

- Pulsaciones radiales de modo único
- Curvas de luz de forma similar a diente de sierra (como RR Lyr)
- Rango de temperatura y abundancia de helio similar a SD
- Gravedad superficial más baja que SD típicos

14.2. Dos Grupos Observacionales

14.2.1. Grupo de Baja Gravedad

- $\log g = 4.2$ a 4.7
- Períodos de pulsación: 20-60 minutos
- Amplitudes: 0.2-0.4 magnitudes

14.2.2. Grupo de Alta Gravedad

- $\log g = 5.3$ a 5.7
- Períodos de pulsación: 2-8 minutos
- Amplitudes: 0.05-0.2 magnitudes

14.3. Cambios de Período a Largo Plazo

- Observaciones de largo plazo revelan cambios en períodos de pulsación
- Tasa típica: $\approx 10^{-7} \text{ yr}^{-1}$
- Mayoría muestran períodos crecientes
- Aproximadamente 1/4 muestran períodos decrecientes

14.4. Escenarios Evolutivos Competitivos

14.4.1. Escenario 1: Progenitores de Enanas Blancas de Baja Masa

- BLAP son núcleos de helio de gigantes con envoltura poco profunda
- Núcleo de helio inerte
- Progenitores de WD de baja masa ($\approx 0.3M_{\odot}$)
- Pasando a través de zona de inestabilidad BLAP antes de convertirse en WD
- Períodos de oscilaciones radiales de bajo orden concuerdan mejor con este escenario

14.4.2. Escenario 2: Progenitores o Progenie de EHB

- BLAP son progenitores o descendientes de estrellas EHB que queman helio
- Masas similares a EHB: $\approx 0.5M_{\odot}$
- Evolucionando hacia o alejándose de la rama EHB

14.4.3. Escenario Emergente: Fusión HeWD+MS

Zhang et al. (2023) propusieron un nuevo canal:

- Fusión de enana blanca de helio con estrella MS
- Evoluciona a través del régimen observado BLAP
- Después de que comenzó la quema de capa de He pero antes de que se estableciera plenamente la quema de núcleo de He
- Destellos de helio en capas introducen períodos de expansión y contracción
- Propiedades de pulsación coinciden con observaciones

- Canaliza nueva formación viable para BLAP simple

15. Rotación Estelar y Sincronización Órbita-Espín

15.1. Velocidad de Rotación Proyectada

15.1.1. Estrellas Simples

- Velocidad rotacional proyectada: $v_{rot} \sin i$ pequeña
- En o por debajo del límite de detección: pocos km/s
- Indica rotación lenta

15.1.2. Binarias Cercanas

- Fuerzas de marea aceleran rotación
- Pueden alcanzar sincronización: $v_{rot} \sin i \approx 200$ km/s en casos extremos
- Alineamiento de ejes rotacionales

15.2. Estudio de Rotación mediante Asterosismología

Para estrellas que rotan lentamente donde el ensanchamiento espectral es indetectable:

- Curvas de luz de larga duración permiten estudiar rotación estelar
- Levantamiento de degeneración azimutal
- Multiplete espaciados uniformemente en espectros de frecuencia
- Espaciado de multiplete promedio \rightarrow período rotacional

15.2.1. Resultados

Para estrellas simples:

- Períodos rotacionales derivados: 20-300 días
- Demasiado lento para detectar ensanchamiento de línea espectral
- Consistente con evolución sin interacción significativa

15.3. Sincronización en Sistemas Binarios

15.3.1. Observación

Silvotti et al. (2022) encontraron que:

- Sincronización puede establecerse en SD cercanos con períodos orbitales $\approx 1/4$ día o menos
- En sistemas más amplios, la rotación del SD no está ligada a la órbita

15.3.2. Desafío Teórico

Modelos de acoplamiento convectivo basados en teoría de longitud de mezcla fallan:

- No alcanzan rotación síncrona incluso para núcleos expandidos
- Particularmente para el caso mejor estudiado: NY Vir
- Requiere mejoras en modelado de convección

15.3.3. Progreso Reciente

Ma y Fuller (2024) demostraron que:

- Excitación de ondas de gravedad internas por fuerzas de marea

- Puede conducir a sincronización tidal dentro de la vida del sdB
- Para períodos binarios por debajo de 0.2 días
- Consistente con observaciones

16. Parámetros Estelares: Radio, Luminosidad y Masa

16.1. Métodos de Determinación

16.1.1. Eclipsantes Binarias Doble-Línea

Históricamente el principal método, pero:

- Muy pocas binarias SD adecuadas disponibles
- Método limita el número de determinaciones de parámetros

16.1.2. Asterosismología

- Espectros de frecuencia de pulsación ricos permiten determinación de masa
- Particularmente valioso para pulsadores híbridos
- Complementario con métodos de curva de luz/velocidad radial

16.1.3. Paralaje de Gaia con Fotometría Multi-banda

Revolución traída por la misión Gaia:

1. Derivar diámetros angulares de distribuciones de energía espectral (SED)
2. Ajustar fotometría multi-filtro con espectros de modelo
3. Contabilizar enrojecimiento interestelar y extinción
4. Estimar T_{eff} , luminosidad
5. Construir HRD

16.2. Derivación de Radio

Combinando diámetro angular de ajustes SED con distancia Gaia:

$$R = \frac{\theta}{2} \times d$$

donde θ es diámetro angular y d es distancia de paralaje.

16.3. Derivación de Masa

La masa se obtiene de la ley de gravedad de Newton:

$$M = \frac{gR^2}{G}$$

donde:

- g es la gravedad superficial derivada de análisis espectral cuantitativo
- R es el radio
- G es la constante gravitacional

Requerimiento crítico: Mediciones precisas de gravedad superficial de espectroscopia de alta fidelidad.

16.4. Estudio Comprensivo de Schaffenroth et al. (2022)

16.4.1. Método de Validación

1. Derivar masas de 7 variables elipsoidales (SD+WD) usando método Gaia+SED
2. Comparar con resultados de análisis RV+curva de luz
3. Encontrar acuerdo excelente

16.4.2. Muestras Más Amplias

- 18 sistemas de efecto de reflexión eclipsante (sdB+MS, tipo HW Vir)
- 30 sistemas variables elipsoidales (SD+WD)

16.4.3. Distribuciones de Masa Derivadas

Sistemas HW Vir (sdB+MS):

- Pico de distribución: $0.46^{+0.08}_{-0.12} M_{\odot}$
- Coincide con valor canónico: $0.47 M_{\odot}$ (Dorman et al., 1993)

Sistemas Elipsoidal Variables (SD+WD):

- Masas promedio algo inferiores: $0.38^{+0.12}_{-0.08} M_{\odot}$
- Distribución acumulativa proporciona evidencia de que masas SD en binarias con WD son más ligeras que aquellas con compañeros MS

17. Poblaciones Galácticas de Subdwarfs

17.1. Estructura Galáctica

La Galaxia puede describirse por tres componentes principales:

1. **Disco Delgado:** Población joven, metalicidad solar
2. **Disco Grueso:** Edad intermedia, metalicidad subsolar
3. **Halo:** Población antigua, muy subestelar, alta velocidad dispersion

17.2. Distribución de Subdwarfs

Luo et al. (2021) mediante datos de Gaia DR2 y espectroscopia LAMOST:

- Analizaron cinemática de muestra grande (> 1500 SD calientes)
- Determinaron pertenencia poblacional de componentes Galácticas
- Encontraron SD en las tres poblaciones Galácticas
- Distribuciones de parámetros atmosféricos consistentes con estudios previos

17.3. Subdwarfs del Halo Galáctico

17.3.1. Muestra de Halo de Geier et al. (2024)

- SD de movimiento rápido seleccionados via movimiento propio Gaia
- Muestra de SD débiles y distantes
- Rango de distancia: 2.5 a 15 kpc del Sol
- Utilizado espectroscopia SDSS y seguimiento con múltiples telescopios

17.3.2. Resultados

- Distribuciones de parámetros atmosféricos notablemente similares a población mixta Galáctica
- Consistencia sugiere que propiedades no dependen fuertemente de ubicación
- Comparan bien con modelos canónicos EHB (Han et al., 2003)

18. Subdwarfs en Cúmulos Globulares

18.1. Enigma de Morfología de Rama Horizontal

Cúmulos globulares muestran diversas morfologías de rama horizontal:

- Algunos cúmulos dominados por estrellas rojas HB (RHB)
- Pocos muestran ramas HB azules pronunciadas (BHB)
- Solo algunos tienen extremo EHB: NGC 6752 y ω Centauri (Cen)
- Mecanismo produciendo esta diversidad aún no explicado

18.2. Comparación: NGC 6752 vs Centauri

18.2.1. NGC 6752

- Población SD muy diferente a estrellas de campo
- **Ningún** SD rico en helio encontrado
- Contrasta fuertemente con campo

18.2.2. Centauri

- Existe población de SD rico en helio
- Forma aglomeración en extremo caliente de EHB
- Similar a población de halo de campo (Latour et al., 2023)

18.2.3. Diferencias Interesantes

- Aunque población SD a lo largo de banda EHB es similar en ambas poblaciones (field y cúmulo Cen)
- sdOs son raros en Cen comparado con población halo SD de campo
- Extremos HesdOBs completamente ausentes en Cen

18.3. Perspectiva Futura

Estas diferencias agregan a diversidad de propiedades HB en cúmulos globulares, aún por explicar.

19. Revoluciones Aportadas por Misiones Espaciales

19.1. Hipparcos

- Proporcionó paralajes trigonométricos de precisión
- Solo un puñado de SD tenía paralajes de suficiente precisión
- Información limitada pero crucial

19.2. Gaia Data Release 2 (2018)

Punto de inflexión revolucionario:

- Paralajes trigonométricos de precisión sin precedentes
- Transformó estudio de poblaciones de SD
- Permitted colocación precisa en HRD
- Derivación de parámetros estelares revolucionada

19.3. Gaia Data Release 3 (Más Reciente)

- Datos astrométricos para más de 1.46 mil millones de estrellas
- **6,616** SD espectroscópicamente confirmados
- Más de **60,000** candidatos de SD
- Pequeña población comparada a estrellas MS y WD

- Pero tiempos de vida más cortos hacen su presencia significativa

19.4. Kepler y TESS

19.4.1. Impacto Revolucionario

- Fotometría de precisión extrema sin precedentes
- Permite estudios detallados de asterosismología de SD pulsante
- Análisis de curva de luz de binarias con precisión nunca antes alcanzada
- Minería de datos de decenas de miles de objetos

19.4.2. Kepler

- Fotometría casi ininterrumpida
- Cadencia de 29.4 min o 1 min durante 4 años
- O pocos meses con cadencia ultra-corta

19.4.3. TESS

- Encuesta sistemática del cielo en sectores de observación de 27 días
- Cadencia: 2 min o 20 segundos
- Continúa midiendo curvas de luz casi la mitad de SD conocidos
- Precisión sin precedentes para p-mode pulsators

20. Muestras de Volumen Limitado y Síntesis de Población Binaria

20.1. Importancia de Muestras Completas

20.1.1. Sesgos en Muestras de Flujo Limitado

- Muestras seleccionadas por brillo tienden a favorecer objetos más luminosos
- Favorecen sistemas binarios cercanos o sistemas con compañeros luminosos
- Introducen sesgos sistemáticos en distribuciones de parámetros

20.1.2. Ventaja de Muestras de Volumen Completo

- Derivables con paralajes Gaia
- Evitan sesgos de selección de flujo
- Representan verdaderamente la población local
- Crucial para probar modelos BPS

20.2. Muestra Completa Recientemente Establecida

Dawson et al. (2024) estableció muestra completa de SD:

- **305** SD confirmados
- Completa al 95% a distancia de 500 pc
- Proporciona censo preciso de población local de SD
- Análisis de observaciones de seguimiento en progreso

21. Estrellas Subdwarf Relacionadas de Baja Masa

21.1. Enanas Blancas de Masa Extremadamente Baja (ELM-WD)

21.1.1. Definición

- Masa: $< 0.3 M_{\odot}$
- Se forman si envoltura es despojada temprano en evolución RGB
- Cuando núcleo de helio aún es pequeño
- Núcleo de helio no se calienta lo suficiente para ignición de helio

21.1.2. Progenitores: Pre-ELM WD (Bloated WD)

- Térmicamente hinchado
- Estadio de transición entre despojo y WD inerte

21.2. Sistemas Observados

21.2.1. Compañeros Observados

- **WD+WD**: ELM-WD en binaria con otra WD
- **NS+WD**: Encontrados con estrellas de neutrones (pulsares)
- **MS+WD**: Con estrellas MS de tipos espectrales B tardío a F

21.2.2. Sistema EL CVn

- Binarias con período de aproximadamente un día a decenas de días
- Compañero MS de tipo F a B tardío
- Dinámicamente interactuantes
- Análogos a sistemas SD de período corto

21.3. Descubrimientos Extremos

21.3.1. Sistema de Período Ultra-Largo

Masuda et al. (2019):

- $0.2 M_{\odot}$ ELM-WD en órbita de 450 días
- Alrededor de estrella similar al Sol
- Detectado via auto-lensing gravitacional
- Desafía modelos de evolución binaria

21.3.2. Pre-ELM WD con Compañero Substelar

Irrgang et al. (2021):

- Pre-ELM WD en órbita de 3.4 horas
- Compañero marrón
- Análogo a sistemas SD+M/BD
- Raro pero importante para completitud poblacional

21.4. Pulsaciones en ELM WD

- Oscilaciones multi-periódicas observadas en ELM-WD
- También en pre-ELM WD
- Permiten investigaciones asterosismológicas
- Información sobre estructura interna

21.5. EL CVn como Triples Jerárquicos

Lagos et al. (2020):

- Mayoría de sistemas EL CVn aparentemente simples son en realidad binarias internas de sistemas triples jerárquicos

- Terciario externo afecta evolución dinámica
- Similar a sistemas SD estudiados por Preece et al. (2022)
- Tema aún bajo investigación activa

22. Ejemplo Detallado: NY Vir

22.1. Importancia del Sistema

NY Vir es uno de los sistemas binarios SD mejor estudiados, con:

- Binaria eclipsante de corto período
- sdB+MS con compañero tidalmente acoplado
- Pulsaciones p-mode detectadas
- Permite determinación de masa multi-método

22.2. Métodos de Determinación de Masa

22.2.1. Velocidad Radial y Curva de Luz

- Análisis clásico de RV y LC
- Produce tres soluciones igualmente probables: 0.530, 0.466, y $0.389 M_{\odot}$
- Ambigüedad degenerada

22.2.2. Asterosismología

- Análisis de modos p resueltos
- Masa del sdB: $M = 0.471 \pm 0.006 M_{\odot}$ (muy preciso)
- Muy cercano a valor canónico de $0.47 M_{\odot}$

22.3. Implicación

- Asterosismología resuelve degeneración de RV/LC
- Proporciona medida de masa más precisa
- Confirma valor canónico de masa SD
- Ejemplifica poder de métodos complementarios

23. Encuestas Espectroscópicas a Gran Escala

23.1. SDSS - Sloan Digital Sky Survey

- Ha identificado miles de candidatos de SD
- Proporciona espectroscopia de baja resolución
- Base de datos enorme para estudios poblacionales

23.2. LAMOST - Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope

- Encuesta de espectroscopia de múltiples objetos
- Proporciona espectros de baja a media resolución
- Muestra homogénea de > 1500 SD calientes
- Permitió análisis de parámetros atmosféricos de población

23.3. ESO/4MOST - Futuro

- Espectroscopia de alta fidelidad de gran escala esperada
- Permitirá determinaciones precisas de gravedad superficial para muestras grandes
- Clave para realizar potencial completo del paralaje Gaia
- Proporcionará tesoro de datos para análisis BPS

24. Conclusiones y Perspectivas Futuras

24.1. Estado Actual del Campo

Las estrellas subdwarf calientes han emergido como laboratorios cruciales para comprender:

1. **Evolución Binaria Cercana:** A través de fases RLOF estable e inestable
2. **Formación de Envolverte Común:** Y eyección
3. **Fusiones Binarias:** Particularmente fusiones WD+WD
4. **Asterosismología:** Sondeo de estructura interna estelar
5. **Síntesis de Población:** Restricciones en parámetros mal conocidos

24.2. Incertidumbres Principales Que Permanecen

- **Eficiencia de Envolverte Común (α_{CE}):** Rango de 0.1-1.0, valor preferido incierto
- **Umbral de Cociente de Masas (q_{crit}):** Rango probable 1.2-1.5, valor preciso desconocido
- **Dependencia de Metalicidad:** En procesos evolutivos binarios
- **Transferencia Conservativa vs No-Conservativa:** Cantidad de masa retenida
- **Mecanismos de Campo Magnético:** En fusiones de WD

24.3. Nuevas Direcciones de Investigación

24.3.1. Subdwarf Magnético

- Cuatro sdOs magnéticos recientemente descubiertos
- Apoya fuertemente escenario de fusión
- Pero solo pequeña fracción esperada ser magnética
- Búsquedas continuas de campos magnéticos en otros subtipos

24.3.2. Progenitores de Supernova Tipo Ia

- Identificación de candidatos DD viables
- Refinamiento de predicciones de modelos
- Conexión potencial con observaciones de supernova

24.3.3. Ondas Gravitacionales

- Tres candidatos firmes para detección de LISA/TianQin
- Observaciones futuras mejorarán sensibilidad
- Primeras detecciones de compact binaries verificarán predicciones

24.3.4. Pulsadores de Amplitud Grande Azul

- Nueva clase recientemente identificada
- Fusión HeWD+MS como canal viable
- Asterosismología de este grupo podría revelar estructura

24.4. Importancia de Muestras Completas

- Muestra de 500 pc de Dawson et al. (2024) proporciona base
- Permite derivación de distribuciones de masa para subtipos diversos
- Crucial para probar predicciones de síntesis de población binaria
- Guía refinamientos en física de formación de CE

24.5. Rol Futuro de Misiones de Gran Escala

24.5.1. 4MOST

- Espectroscopia de alta fidelidad para muestras grandes
- Permitirá determinaciones precisas de gravedad para derivación de masa
- Explotación completa del potencial de Gaia

24.5.2. Mejora de Datos Gaia

- Precisión de paralaje mejorada en futuras entregas de datos
- Permitirá muestras aún más completas y precisas
- Posiblemente nuevos candidatos detectados

24.5.3. Fotometría de Precisión Continua

- TESS continuará observando aproximadamente mitad de población conocida
- Seguimiento futuro de nuevos descubrimientos
- Caracterización de transitorios y sistemas variables

24.6. Resumen de Importancia Científica

Las estrellas subdwarf calientes ocupan región única en el Diagrama de Hertzsprung-Russell, poblando región no cubierta por evolución estelar de objetos simples. Esta característica única, combinada con:

- Abundancia relativa de sistemas binarios
- Accesibilidad a múltiples técnicas de sondeo (asterosismología, velocidad radial, curvas de luz eclipsante)
- Disponibilidad de datos de Gaia revolucionarios
- Conexión potencial a eventos cataclísmicos (SNe Ia, ondas gravitacionales, hipervelocidad)

los convierte en laboratorios incomparables para comprensión de evolución binaria, estructura interna estelar, y fenómenos estelares extremos.

25. Referencia Bibliográfica Principal

El presente informe se basa íntegramente en:

Heber, U. (2024). *Hot Subdwarf Stars*. arXiv:2410.11663v2 [astro-ph.SR]

Este trabajo representa la revisión más completa y actualizada de la investigación en estrellas subdwarf calientes, incorporando avances desde trabajos previos de Heber (2009, 2016) y síntesis de literatura hasta marzo de 2025.