

Interacting Binaries

Mauro Jélvez

1. Binarias Interactivas: Evolución Estelar en Sistemas Binarios

Los sistemas binarios interactivos representan uno de los campos más fascinantes de la astrofísica estelar, donde la evolución individual de las estrellas se ve profundamente alterada por la influencia mutua entre las componentes.

2. Clasificación de Binarias por Separación

2.1. Binarias Separadas (Wide Binaries)

$$a > 1000 R_{\odot} \quad (\text{típicamente})$$

- Las estrellas evolucionan como si estuvieran aisladas
- No hay transferencia de masa significativa
- Períodos orbitales largos ($P > 1$ año)
- Ejemplos: Proxima Centauri - α Centauri

2.2. Binarias Interactivas (Close Binaries)

$$a < 100 - 1000 R_{\odot}$$

- Interacción significativa entre las componentes
- Transferencia de masa y momento angular
- Períodos orbitales cortos ($P < 100$ días)
- Evolución estelar alterada radicalmente

3. Mecanismos de Interacción

3.1. Lóbulo de Roche

$$R_L = a \frac{0.49q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})} \quad \text{para } q = \frac{M_2}{M_1}$$

3.2. Transferencia de Masa

$$\dot{M} = f(R, R_L, \text{evolución})$$

$$\sim 10^{-9} - 10^{-4} M_{\odot}/\text{año}$$

4. Fenómenos en Binarias Interactivas

4.1. Paradoja de Algol

$$M_1 > M_2$$

$$\text{Edad}_1 < \text{Edad}_2$$

$$\text{Evolución}_1 > \text{Evolución}_2$$

Explicación: Transferencia de masa invierte las masas originales.

4.2. Blue Stragglers

$$M_{BS} > M_{TO}$$

(6)

Estrellas más masivas y azules que el punto de vuelco (turn-off) del cúmulo.

5. Diagrama de Evolución de Binarias Interactivas

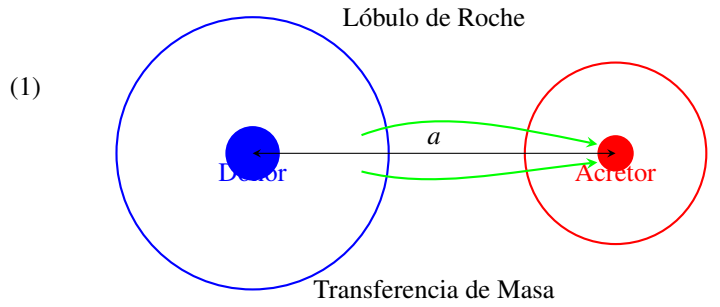


Fig. 1. Esquema de una binaria interactiva mostrando el lóbulo de Roche y la transferencia de masa.

6. Tipos de Binarias Interactivas

6.1. Binarias de Rayos X

$$L_X \sim 10^{36} - 10^{38} \text{ erg/s}$$

(7)

6.2. Variables Cataclísmicas

$$\Delta m \sim 2 - 8 \text{ mag}$$

(8)

6.3. Binarias de Contacto

$$R_1, R_2 \geq R_{L,1}, R_{L,2}$$

(9)

7. Evolución de Binarias Interactivas

7.1. Fases de Evolución

1. Fase de secuencia principal aislada
2. Llenado del lóbulo de Roche
3. Transferencia de masa
4. Fase de envoltente común
5. Formación de objetos compactos

7.2. Tiempos Característicos

$$\tau_{KH} \sim 10^7 - 10^8 \text{ años}$$

(10)

$$\tau_{MT} \sim 10^4 - 10^6 \text{ años}$$

(11)

$$\tau_{CE} \sim 10^2 - 10^3 \text{ años}$$

(12)

8. Ecuaciones Fundamentales

8.1. Estabilidad de la Transferencia

$$\frac{\dot{R}}{R} = \zeta_{\text{ad}} \frac{\dot{M}}{M} + \zeta_{\text{th}} \frac{\dot{M}}{M} \quad (13)$$

8.2. Evolución Orbital

$$\frac{\dot{a}}{a} = -2 \frac{\dot{M}_1}{M_1} \left(1 - \beta \frac{M_1}{M_2} - \frac{1 - \beta}{2} \frac{M_1}{M_1 + M_2} \right) \quad (14)$$

9. Ejemplos Observacionales

9.1. Algol (Persei)

$$\begin{aligned} M_1 &= 3.6 M_{\odot} \\ M_2 &= 0.8 M_{\odot} \\ P &= 2.87 \text{ días} \\ a &= 14.5 R_{\odot} \end{aligned}$$

9.2. Blue Stragglers en M30

$$\begin{aligned} M &\sim 1.2 - 1.6 M_{\odot} \\ \text{Edad} &\sim 13 \text{ Gyr} \\ M_{\text{TO}} &\sim 0.8 M_{\odot} \end{aligned}$$

10. Formación de Objetos Compactos

10.1. Progenitores de SNe Ia

$$M_{\text{Ch}} = 1.4 M_{\odot} \quad (15)$$

10.2. Binarias de Neutrones

$$P \sim \text{ms} - \text{segundos} \quad (16)$$

11. Importancia Cosmológica

11.1. Candelas Standard

$$\sigma(M) \sim 0.1 - 0.2 \text{ mag} \quad (17)$$

11.2. Relación de Phillips

$$\Delta m_{15} \propto M \quad (18)$$

Table 1. Comparación entre binarias aisladas e interactivas

Característica	Binarias Aisladas	Binarias Interactivas
Evolución estelar	Normal	Alterada
Transferencia de masa	No	Sí
Lóbulo de Roche	No lleno	Lleno
Tiempo de vida	τ_{nuclear}	$\tau_{\text{transferencia}}$
Productos finales	Estrellas aisladas	Objetos compactos

12. Modelado Teórico

12.1. Códigos de Evolución

$$\frac{\partial M}{\partial t} = f(\text{composición, estructura}) \quad (19)$$

12.2. Métodos Numéricos

$$\dot{M} = \min(\dot{M}_{\text{RLOF}}, \dot{M}_{\text{wind}}) \quad (20)$$

13. Retos Observacionales

13.1. Sesgos de Detección

$$P_{\text{det}} \propto \frac{R^2}{a^2} \quad (21)$$

13.2. Determinación de Parámetros

$$\sigma(M) \propto \frac{1}{\sin^3 i} \quad (22)$$

14. Conclusiones

Las binarias interactivas:

- Son laboratorios únicos para estudiar física estelar
- Producen fenómenos inexplicables con evolución aislada
- Son cruciales para la comprensión de SNe Ia
- Permiten testar teorías de estructura estelar
- Proporcionan información sobre formación de objetos compactos
- Son esenciales para la cosmología observacional

15. Blue Stragglers: Estrellas Rejuvenecidas en Sistemas Estelares

Las **blue stragglers** (rezagadas azules) constituyen uno de los enigmas más fascinantes de la astrofísica estelar. Son estrellas que aparecen más azules y luminosas que el punto de vuelco (turn-off) de los cúmulos estelares, desafiando los modelos standard de evolución estelar.

16. Definición y Características

16.1. Propiedades Observacionales

$$M_{\text{BS}} > M_{\text{TO}} \quad (23)$$

$$T_{\text{eff, BS}} > T_{\text{eff, TO}} \quad (24)$$

$$L_{\text{BS}} > L_{\text{TO}} \quad (25)$$

16.2. Ubicación en el Diagrama HR

$$(B - V)_{\text{BS}} < (B - V)_{\text{TO}} \quad (26)$$

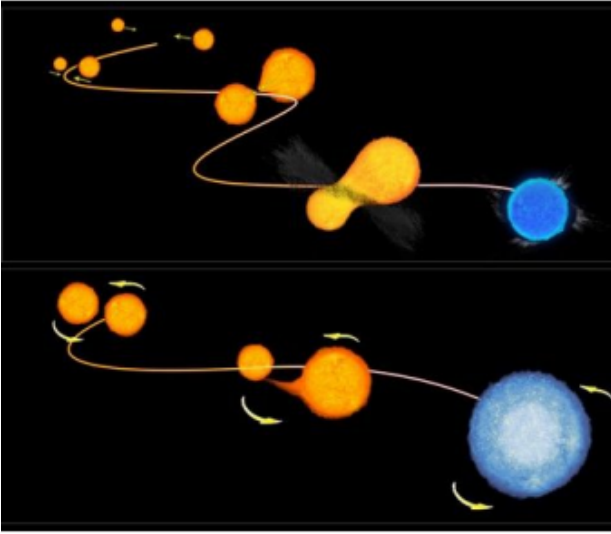
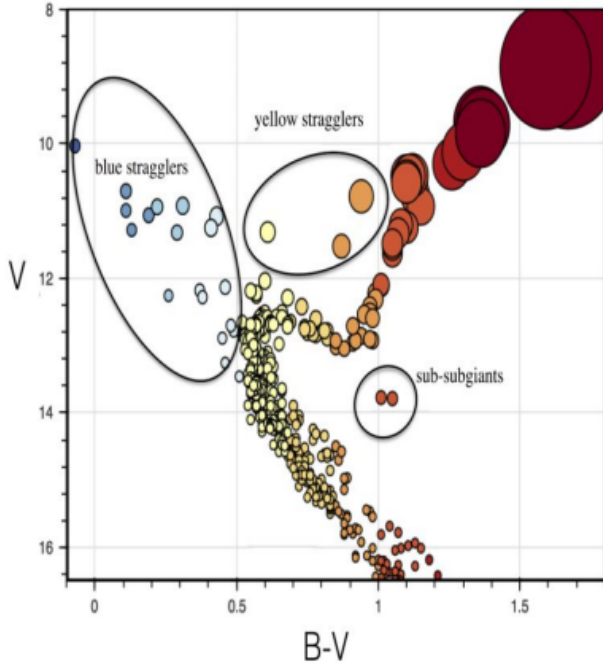
17. Mecanismos de Formación

17.1. Modelo de Colisión

$$M_{\text{merge}} = M_1 + M_2 - M_{\text{loss}} \quad (27)$$

17.2. Modelo de Transferencia de Masa

$$\dot{M} \sim 10^{-9} - 10^{-7} M_{\odot}/\text{año} \quad (28)$$



18. Diagrama de Formación de Blue Stragglers

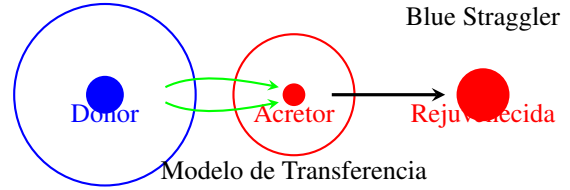
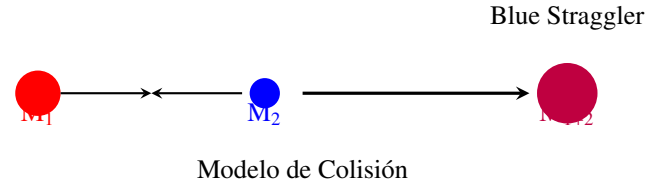


Fig. 3. Mecanismos de formación de blue stragglers: colisión y transferencia de masa.

19. Física de los Procesos

19.1. Colisiones Estelares

$$\tau_{\text{coll}} \sim \frac{1}{n\sigma v} \sim 10^9 - 10^{10} \text{ años} \quad (29)$$

19.2. Transferencia de Masa

$$\dot{M} = C \left(\frac{R}{R_L} - 1 \right)^n \quad (30)$$

20. Tipos de Rezagadas

20.1. Blue Stragglers

$$T_{\text{eff}} \sim 6000 - 30000 \text{ K} \quad (31)$$

$$M \sim 1.2 - 2.0 M_{\odot} \quad (\text{en cúmulos viejos}) \quad (32)$$

20.2. Yellow Stragglers

$$T_{\text{eff}} \sim 5000 - 6000 \text{ K} \quad (33)$$

$$M \sim 1.0 - 1.4 M_{\odot} \quad (34)$$

20.3. Sub-Subgiants

$$L \sim L_{\text{TO}}, \quad T_{\text{eff}} < T_{\text{TO}} \quad (35)$$

21. Evidencia Observacional

21.1. Distribución en Cúmulos

$$f_{\text{BS}} \propto \rho_{\text{core}} \quad (36)$$

21.2. Rotación

$$v \sin i \sim 10 - 100 \text{ km/s} \quad (37)$$

22. Modelos Teóricos

22.1. Nucleosíntesis

$$X \rightarrow Y \rightarrow \text{He-burning} \quad (38)$$

22.2. Mezcla Inducida

$$\nabla_{\text{actual}} > \nabla_{\text{ad}} \quad (39)$$

23. Ejemplos en Cúmulos

23.1. M3 (NGC 5272)

$$\begin{aligned} N_{\text{BS}} &\sim 30 \\ f_{\text{BS}} &\sim 0.01 \\ M_{\text{TO}} &\sim 0.8 M_{\odot} \\ M_{\text{BS}} &\sim 1.2 - 1.6 M_{\odot} \end{aligned}$$

23.2. M30 (NGC 7099)

$$\begin{aligned} N_{\text{BS}} &\sim 10 \\ f_{\text{BS}} &\sim 0.005 \\ \text{Edad} &\sim 13 \text{ Gyr} \end{aligned}$$

24. Importancia Astrofísica

24.1. Pruebas de Evolución Estelar

$$\tau_{\text{nuclear}}^{US} \cdot \tau_{\text{dinámico}} \quad (40)$$

24.2. Cinemática de Cúmulos

$$\sigma_{\text{BS}} \neq \sigma_{\text{normal}} \quad (41)$$

25. Modelos Numéricos

25.1. Simulaciones de Colisiones

$$E_{\text{bind}} = E_{\text{grav}} + E_{\text{thermal}} \quad (42)$$

25.2. Evolución de Binarias

$$\frac{da}{dt} = f(M_1, M_2, \dot{M}) \quad (43)$$

Table 2. Comparación de mecanismos de formación de blue stragglers

Característica	Colisión	Transferencia
Entorno preferido	Cúmulos densos	Binarias cercanas
Masa final	$M_1 + M_2$ - pérdidas	M_{accretor}
Composición	Mezclada	Enriquecida
Rotación	Alta	Variable
Tiempo escala	Corto (10^3 años)	Largo (10^6 años)

26. Retos Observacionales

26.1. Confirmación de Mecanismos

$$\frac{N_{\text{BS, coll}}}{N_{\text{BS, transfer}}} \propto \frac{\rho}{\rho_{\text{crit}}} \quad (44)$$

26.2. Abundancias Químicas

$$[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{BS}} \text{ vs. } [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{cluster}} \quad (45)$$

27. Conclusiones

Las blue stragglers:

- Son laboratorios únicos para física de colisiones estelares
- Proporcionan información sobre dinámica de cúmulos
- Permiten estudiar mezcla y nucleosíntesis en condiciones extremas
- Son cruciales para entender evolución de binarias
- Ofrecen pruebas para modelos de estructura estelar
- Son indicadores de la historia dinámica de sistemas estelares

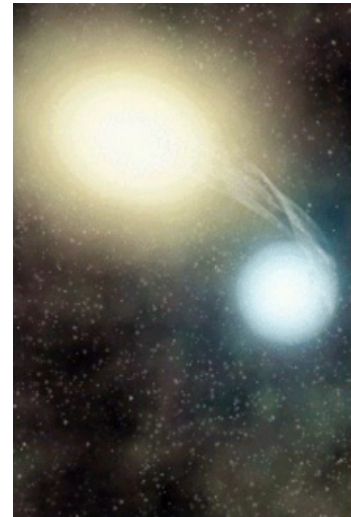
28. La Paradoja de Algol: Un Enigma de Evolución Binaria

La paradoja de Algol (β Persei) representa uno de los problemas más intrigantes en la evolución estelar binaria. Este sistema muestra una contradicción aparente entre las masas estelares y sus estados evolutivos, que solo puede resolverse mediante el concepto de transferencia de masa.

29. El Sistema Algol

29.1. Parámetros Observacionales

$$\begin{aligned} \text{Componente A (B8V): } M_1 &= 3.6 M_{\odot} \\ \text{Componente B (K0IV): } M_2 &= 0.8 M_{\odot} \\ \text{Período orbital: } P &= 2.87 \text{ días} \\ \text{Separación: } a &= 14.5 R_{\odot} \\ \text{Excentricidad: } e &\approx 0 \end{aligned}$$



29.2. La Paradoja

$$\frac{M_1}{M_2} = 4.5 \quad \text{pero} \quad \frac{\tau_{\text{evol},1}}{\tau_{\text{evol},2}} \approx 0.1 \quad (46)$$

¿Cómo puede la estrella menos masiva estar más evolucionada?

30. Resolución de la Paradoja

30.1. Transferencia de Masa

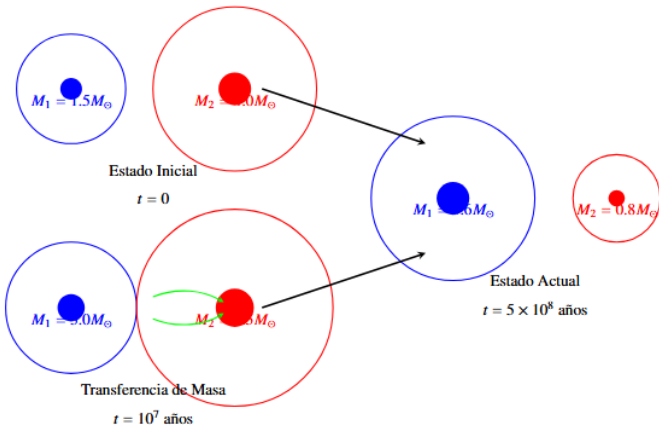
La solución reside en que las masas actuales no reflejan las masas iniciales:

$$M_{1,\text{initial}} < M_{2,\text{initial}} \quad (47)$$

$$M_{1,\text{current}} > M_{2,\text{current}} \quad (48)$$

30.2. Escenario de Evolución

1. Inicialmente: $M_{2,\text{initial}} > M_{1,\text{initial}}$
2. La estrella más masiva evoluciona primero
3. Llena su lóbulo de Roche
4. Transferencia de masa a la compañera
5. Inversión de la relación de masas



31. Física de la Transferencia de Masa

31.1. Lóbulo de Roche

$$R_L = a \frac{0.49q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})} \quad \text{para } q = \frac{M_2}{M_1} \quad (49)$$

31.2. Tasa de Transferencia

$$\dot{M} \sim 10^{-8} - 10^{-7} M_\odot/\text{año} \quad (50)$$

32. Evidencia Observacional

32.1. Envoltura Común

$$M_{\text{env}} \sim 2 - 3 M_\odot \quad \text{perdida del sistema} \quad (51)$$

32.2. Elementos Químicos

Abundancia He enriquecida (52)

Abundancia CNO procesada (53)

33. Modelos de Evolución

33.1. Trayectorias Evolutivas

$$\tau_{\text{KH}} \sim \frac{GM^2}{RL} \sim 10^7 - 10^8 \text{ años} \quad (54)$$

33.2. Estabilidad de la Transferencia

$$\zeta_{\text{ad}} = \left(\frac{\partial \ln R}{\partial \ln M} \right)_{\text{ad}} \quad (55)$$

34. Cálculos Numéricos

34.1. Masas Iniciales Estimadas

$$M_{1,\text{initial}} \approx 1.5 M_\odot$$

$$M_{2,\text{initial}} \approx 4.0 M_\odot$$

$$\Delta M \approx 3.2 M_\odot \quad \text{transferida/perdida}$$

34.2. Tiempos Característicos

$$\tau_{\text{MS},2} \sim 150 \text{ Myr}$$

$$\tau_{\text{transfer}} \sim 50 \text{ Myr}$$

$$\tau_{\text{current}} \sim 500 \text{ Myr}$$

35. Sistemas Similares

35.1. Otros Sistemas Algol

$$\text{U Cep: } M_1 = 4.9 M_\odot, M_2 = 2.9 M_\odot$$

$$\text{Lyrae: } M_1 = 3.3 M_\odot, M_2 = 13.3 M_\odot$$

$$\text{W Serpentis: } M_1 = 2.0 M_\odot, M_2 = 9.0 M_\odot$$

36. Importancia en Astrofísica

36.1. Pruebas de Evolución Estelar

$$\frac{dM}{dt} = f(\text{estructura, composición}) \quad (56)$$

36.2. Progenitores de Binarias Compactas

$$\text{Algol} \rightarrow \text{SN Ia?} \rightarrow \text{Binarias de rayos X} \quad (57)$$

Table 3. Comparación entre estados inicial y actual de Algol

Parámetro	Estado Inicial	Estado Actual
$M_1 (M_\odot)$	1.5	3.6
$M_2 (M_\odot)$	4.0	0.8
$R_1 (R_\odot)$	1.0	2.9
$R_2 (R_\odot)$	3.0	3.5
$T_{\text{eff},1} (\text{K})$	12,000	13,000
$T_{\text{eff},2} (\text{K})$	15,000	4,500
Estado evolutivo	MS	Gigante

37. Retos Observacionales

37.1. Determinación de Parámetros

$$\sigma(M) \propto \frac{1}{\sin^3 i} \quad (58)$$

37.2. Abundancias Químicas

$$[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{surface}} \text{ vs. } [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{core}} \quad (59)$$

38. Conclusiones

La paradoja de Algol:

- Ilustra dramáticamente los efectos de la transferencia de masa
- Proporciona pruebas cruciales para modelos de evolución binaria
- Demuestra que las masas actuales no siempre reflejan la historia evolutiva
- Es fundamental para entender la formación de binarias interactivas
- Ofrece insights sobre la pérdida de masa y momento angular
- Sigue siendo un laboratorio único para física estelar

39. Binarias Compactas Cercanas: Sistemas de Períodos Ultracortos

Las binarias compactas cercanas representan sistemas estelares con períodos orbitales extremadamente cortos (horas o menos) que contienen al menos un objeto compacto: enanas blancas, estrellas de neutrones o agujeros negros. Estos sistemas son laboratorios únicos para estudiar física en condiciones extremas.

40. Características Generales

40.1. Parámetros Orbitales

$$P \sim \text{minutos a horas}$$

$$a \lesssim R_{\odot}$$

$$v_{\text{orb}} \sim 100 - 1000 \text{ km/s}$$

40.2. Tipos de Sistemas

- **Variables Cataclísmicas (CVs):** WD + MS
- **Binarias de Rayos X:** NS/BH + compañera
- **Enanas Dobles Blancas:** WD + WD
- **AM CVn:** WD + WD/He-star



42. Diagrama de Formación de Binarias Compactas

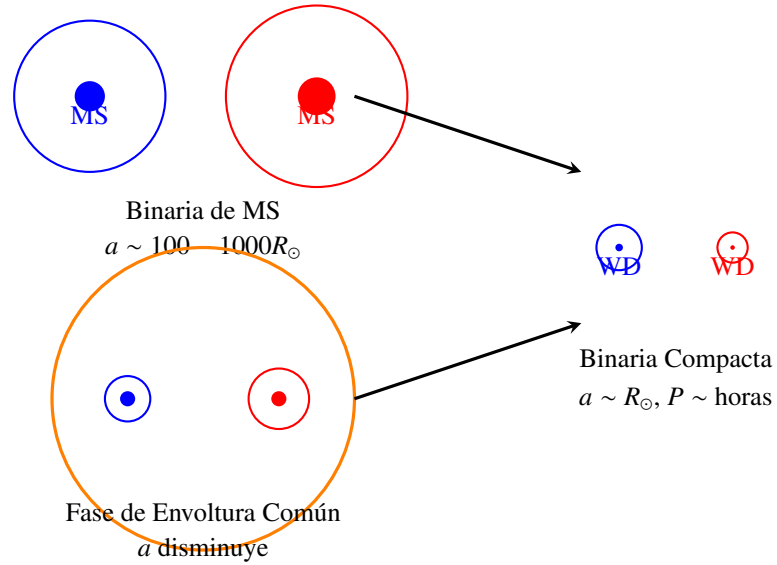


Fig. 4. Formación de binarias compactas mediante fase de envoltura común.

43. Variables Cataclísmicas (CVs)

43.1. Estructura

$$(60) \quad M_1 \sim 0.6 - 1.2 M_{\odot} \quad (\text{WD}) \quad (65)$$

$$(61) \quad M_2 \sim 0.1 - 0.8 M_{\odot} \quad (\text{donor}) \quad (66)$$

$$(62) \quad P \sim 80 \text{ min} - 10 \text{ hr} \quad (67)$$

43.2. Acreción

$$\dot{M} \sim 10^{-11} - 10^{-8} M_{\odot}/\text{año} \quad (68)$$

44. Enanas Dobles Blancas

44.1. Parámetros Observacionales

$$P \sim 5 - 60 \text{ min} \quad (69)$$

$$a \sim 0.5 - 3 R_{\odot} \quad (70)$$

$$e \approx 0 \quad (71)$$

44.2. Importancia para LISA

$$h \sim 10^{-22} - 10^{-20} \quad \text{para } f \sim 0.1 - 100 \text{ mHz} \quad (72)$$

41. Formación y Evolución

41.1. Canales de Formación

$$\tau_{\text{form}} \sim \tau_{\text{evol}} + \tau_{\text{MT}} + \tau_{\text{CE}}$$

41.2. Envoltura Común

$$\alpha_{\text{CE}} = \frac{E_{\text{bind}}}{\Delta E_{\text{orb}}}$$

$$(63)$$

$$(64)$$

45. Física de Períodos Ultracortos

45.1. Límite de Roche

$$R_L \approx 0.46a \left(\frac{M_2}{M_1 + M_2} \right)^{1/3} \quad (73)$$

45.2. Estabilidad de Transferencia

$$\dot{M} = C \left(\frac{R_2}{R_L} - 1 \right)^n \quad (74)$$

46. Ejemplos Observacionales

46.1. AM CVn

$$\begin{aligned} P &= 17.1 \text{ min} \\ M_1 &\approx 0.7 M_\odot \\ M_2 &\approx 0.04 M_\odot \\ \dot{M} &\sim 10^{-9} M_\odot/\text{año} \end{aligned}$$

46.2. ES Cet

$$\begin{aligned} P &= 10.3 \text{ min} \\ M_1 &\approx 0.9 M_\odot \\ M_2 &\approx 0.03 M_\odot \end{aligned}$$

47. Ondas Gravitacionales

47.1. Radiación GR

$$\dot{P} = -\frac{96}{5} \frac{G^{5/3}}{c^5} \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^{1/3}} \left(\frac{2\pi}{P} \right)^{5/3} \quad (75)$$

47.2. Tiempo de Coalescencia

$$\tau_{\text{GW}} = \frac{5}{256} \frac{c^5}{G^{5/3}} \frac{a^4}{M_1 M_2 (M_1 + M_2)^{1/3}} \quad (76)$$

48. Nucleosíntesis y Explosiones

48.1. Novas

$$M_{\text{ign}} \sim 10^{-5} - 10^{-4} M_\odot \quad (77)$$

48.2. Supernovas Ia

$$M_{\text{Ch}} = 1.4 M_\odot \quad (78)$$

Table 4. Propiedades de binarias compactas cercanas

Tipo	P (min)	M_1 (M_\odot)	M_2 (M_\odot)	\dot{M} ($M_\odot/\text{año}$)
CVs	80-600	0.6-1.2	0.1-0.8	10^{-11} - 10^{-8}
AM CVn	5-65	0.5-1.0	0.01-0.2	10^{-10} - 10^{-8}
Doble WDs	5-60	0.3-1.0	0.3-1.0	10^{-13} - 10^{-10}
Binarias X	10-1000	1.4-10	0.1-2.0	10^{-10} - 10^{-7}

49. Importancia en Astrofísica

49.1. Cosmología

$$\sigma(M_{Ia}) \sim 0.1 \text{ mag} \quad (79)$$

49.2. Física Fundamental

$$\dot{P}_{\text{GW}} \text{ vs. } \dot{P}_{\text{GR}} \quad (80)$$

50. Retos Observacionales

50.1. Detección

$$f_{\text{det}} \propto \frac{1}{P^{2/3}} \quad (81)$$

50.2. Determinación de Masas

$$\sigma(M) \propto \frac{1}{\sin^3 i} \quad (82)$$

51. Conclusiones

Las binarias compactas cercanas:

- Son laboratorios únicos para física en condiciones extremas
- Proporcionan pruebas de relatividad general mediante GW
- Son progenitores de explosiones termonucleares
- Permiten estudiar acreción y física de plasmas
- Son cruciales para la calibración de candelas standard
- Ofrecen insights sobre evolución de binarias
- Serán objetivos principales de LISA y futuras misiones

52. Estrellas Subenanas Calientes: Quemadores de Helio Desnudos en Sistemas Binarios

Las estrellas subenanas calientes (hot subdwarfs) representan una fase evolutiva peculiar donde estrellas de masa baja e intermedia han perdido casi completamente su envoltura de hidrógeno, exponiendo núcleos de helio en combustión. Su existencia está íntimamente ligada a interacciones en sistemas binarios.

53. Clasificación y Propiedades

53.1. Tipos de Subenanas Calientes

- sdB : Quemadores de helio en núcleo
- sdO : Quemadores de helio en capa
- sdOB : Intermedias

53.2. Parámetros Físicos

$$\begin{aligned} T_{\text{eff}} &\sim 20,000 - 40,000 \text{ K} \\ \log g &\sim 4.5 - 6.0 \text{ (cgs)} \\ M &\sim 0.45 - 0.55 M_\odot \\ R &\sim 0.1 - 0.3 R_\odot \\ L &\sim 10 - 100 L_\odot \end{aligned}$$

54. Ubicación en el Diagrama HR

54.1. Rama Horizontal Extrema

$$\log L/L_\odot \sim 1.0 - 2.0, \quad \log T_{\text{eff}} \sim 4.3 - 4.6 \quad (83)$$

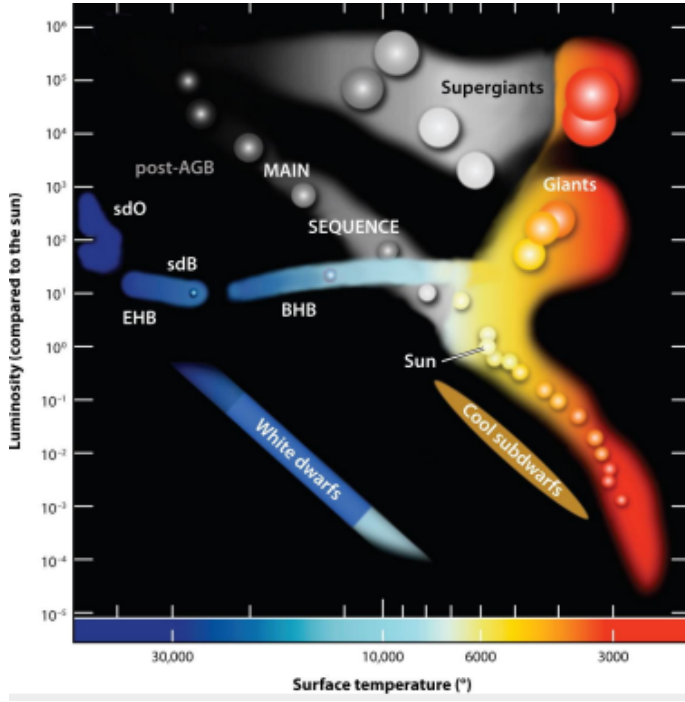
54.2. Composición Química

$$\begin{aligned} X_{\text{surface}} &\sim 0 - 0.1 \\ Y_{\text{surface}} &\sim 0.9 - 1.0 \\ Z_{\text{surface}} &\sim 0.001 - 0.02 \end{aligned}$$

55. Mecanismos de Pérdida de Envoltura

55.1. Transferencia de Masa en Binarias

$$\Delta M_{\text{env}} \sim 0.1 - 0.3 M_\odot \quad (84)$$



57. Diagrama HR de Subenanas

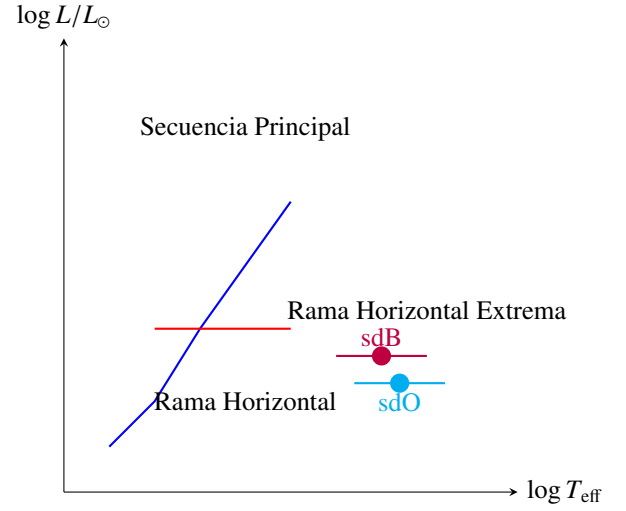
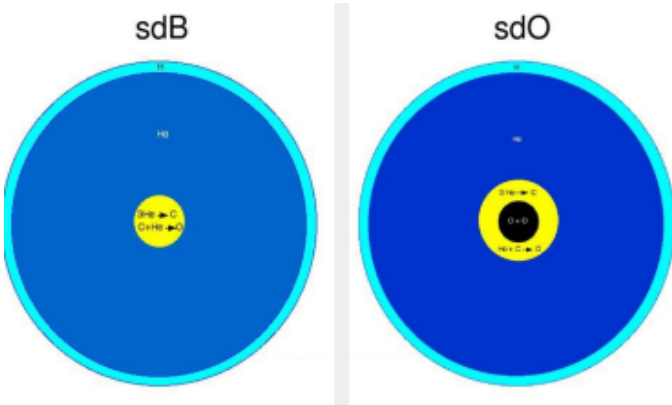


Fig. 5. Ubicación de subenanas calientes en el diagrama HR.

55.2. Envoltura Común

$$\alpha_{\text{CE}} \lambda = \frac{E_{\text{bind}}}{\Delta E_{\text{orb}}} \quad (85)$$



56. Canales de Formación

56.1. Envoltura Común

$$P_{\text{final}} \sim \text{minutos a días} \quad (86)$$

56.2. Transferencia Estable de Masa

$$\dot{M} \sim 10^{-9} - 10^{-7} M_{\odot}/\text{año} \quad (87)$$

56.3. Fusión de Enanas Blancas

$$M_{\text{merge}} = M_{\text{WD1}} + M_{\text{WD2}} \quad (88)$$

58. Evidencia Observacional

58.1. Binariedades

$$\begin{aligned} f_{\text{binary}} &\sim 40 - 60\% \text{ (para sdB)} \\ P &\sim 0.1 - 30 \text{ días} \\ e &\sim 0 \text{ (en sistemas cercanos)} \end{aligned}$$

58.2. Abundancias Químicas

He enriquecido
C, N, O procesados
Fe empobrecido

59. Modelos de Evolución

59.1. Quemado de Helio

$$\tau_{\text{He}} \sim 10^8 \text{ años} \quad (89)$$

59.2. Pérdida de Masa

$$\dot{M}_{\text{wind}} \sim 10^{-13} - 10^{-11} M_{\odot}/\text{año} \quad (90)$$

60. Ejemplos Notables

60.1. PG 1234+134

$$\begin{aligned} P &= 0.16 \text{ días} \\ M_{\text{sdB}} &= 0.47 M_{\odot} \\ M_{\text{comp}} &= 0.12 M_{\odot} \\ T_{\text{eff}} &= 29,500 \text{ K} \end{aligned} \quad (88)$$

60.2. HD 188112

$P = 0.61$ días
 $M_{\text{sdb}} = 0.24 M_{\odot}$
 $M_{\text{comp}} = 0.73 M_{\odot}$
 $T_{\text{eff}} = 21,500$ K

61. Importancia en Astrofísica

61.1. Poblaciones Estelares

$f_{\text{sdb}} \sim 0.1 - 1\%$ en galaxias elípticas (91)

61.2. Evolución Química

$[\alpha/\text{Fe}] \sim +0.3$ dex (92)

Table 5. Comparación entre diferentes tipos de subenanas calientes

Parámetro	sdB	sdO	sdOB
T_{eff} (K)	20,000-30,000	30,000-50,000	25,000-35,000
$\log g$ (cgs)	5.0-6.0	4.5-6.0	5.0-5.8
M (M_{\odot})	0.45-0.55	0.45-0.55	0.45-0.55
H superficial	Bajo	Muy bajo	Intermedio
He superficial	Alto	Muy alto	Alto
f_{binary}	40-60%	20-40%	30-50%

62. Retos Observacionales

62.1. Detección de Companeras

$\Delta m \sim 2 - 5$ mag (93)

62.2. Determinación de Masas

$\sigma(M) \propto \frac{1}{\sin^3 i}$ (94)

63. Conclusiones

Las estrellas subenanas calientes:

- Son evidencia directa de interacciones binarias
- Proporcionan información sobre pérdida de envoltura
- Son cruciales para entender la rama horizontal extrema
- Permiten estudiar quemado de helio en condiciones extremas
- Son importantes para poblaciones estelares viejas
- Ofrecen pruebas para modelos de envoltura común
- Son laboratorios para física de atmósferas calientes

La resolución de estas situaciones paradójicas suele ser la transferencia de masa entre los componentes de un sistema binario cercano.

Por definición, los sistemas binarios cercanos (o interactuantes) son sistemas binarios en los que se produce alguna interacción significativa (distinta de la simple atracción gravitatoria basada en la ley del cuadrado inverso entre masas puntuales).

La interacción puede ser: - Transferencia de masa (relleno del lóbulo de Roche o transferencia de masa impulsada por el viento). - Marea (distorsión de uno o ambos componentes mediante la combinación de efectos gravitacionales y centrífugos). - Radiativa (como en el calentamiento de la cara de un componente por un componente caliente).

Range of binary orbits (MS+MS)

Log Period Nominal [Actual]	Period ² days/years	Orbital Radius ² Solar Radii/AUs	Mean Eccen- tricity	Category Label (Note)
-1 [-0.63]	0.23/0.0006	2.0/0.009	0.00	CONTACT (smallest orbit before stars merge)
0 [0.01]	1.02/0.0028	5.4/0.025	0.05	
1 [0.91]	8.2/0.022	22/0.10	0.23	INTERACTING
2 [1.96]	91/0.25	108/0.50	0.33	(Venus $R = 0.72$ AU, limit of corotation)
3 [3.01]	1021/2.8	2.50	0.41	CLOSE (asteroid belt $R \approx 2.8$ AU)
4 [3.91]	22	10	0.50	(Saturn $R \approx 9.6$ AU)
5 [4.96]	250	50	0.52	MEDIAN (Kuiper Belt $R \approx 50$ AU)
6 [6.01]	2800	250	0.62	(Heliosphere $R \approx 120$ AU)
7 [6.91]	22,000	1000	0.65	WIDE ³ (longest period of solved orbits)
8 [7.96]	250,000	5000	.	(all identified as CPM pairs)
9 [9.01]	2,800,000	25,000	.	FRAGILE ⁴ (widest confirmed $\approx 75,000$ AU)
11 [10.7]	150,000,000	350,000	.	tidal radius (comoving but not bound)

1: P to a calculated for a binary of 2 solar mass stars ($M_1 + M_2 = 2M_{\odot}$)
2: P and a rounded for simplicity
3: Approximately the largest orbital radius of a permanent system
4: Likely to be disrupted by passing stars or giant molecular clouds within the lifetime of the components