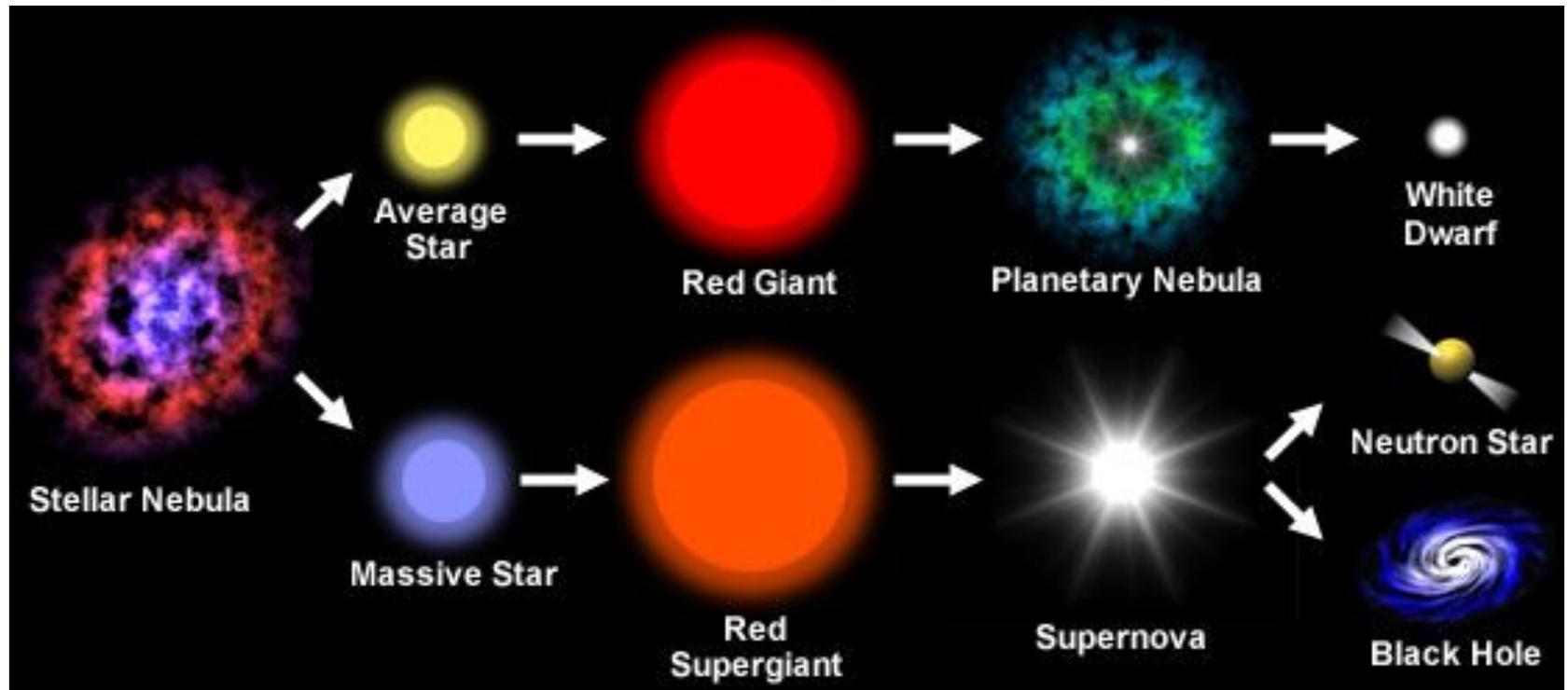


Sistemas Estelares 2024

Evolución Estelar
Prof. Gabriel Ferrero.

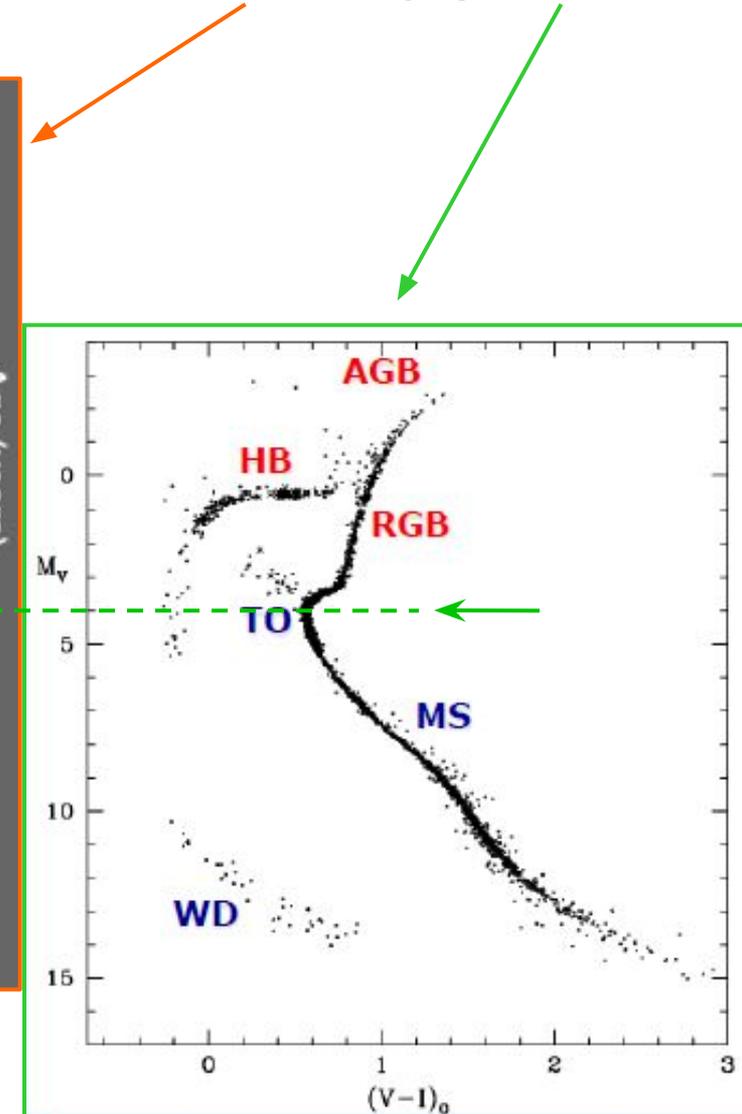
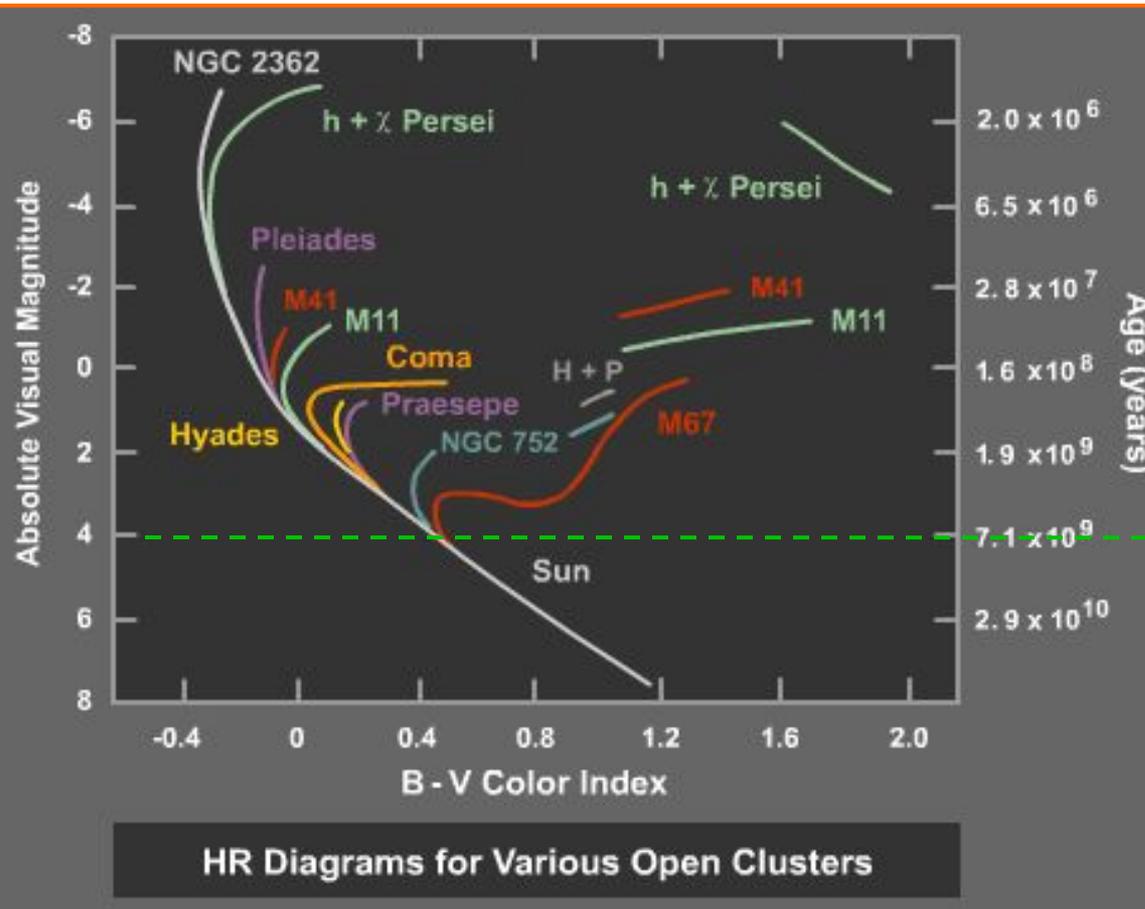
Las ciencias naturales se distinguen de las matemáticas puras por el rol crucial que juegan los experimentos y las observaciones. Es por eso que el progreso en las ciencias es más lento que en matemáticas. Hay muchas estructuras lógicas y autoconsistentes, pero muchas de ellas dan una descripción errónea del universo real, pero no porque sean ilógicas, sino simplemente porque la naturaleza no se comporta de ese modo. Sin experimentos y observaciones que la guíen, la mente humana erraría y erraría, una y otra vez, en su intento por descifrar los enigmas del universo real.

Frank Shu, *The Physical Universe: An Introduction to Astronomy*.



Esquema (básico) de la evolución de estrellas “aisladas”

Diagramas color-magnitud: características en relación al comportamiento evolutivo observable en cúmulos abiertos y globulares



Recordando la teoría básica de evolución estelar

Los diagramas Color - Magnitud de cúmulos abiertos y globulares, y de estrellas en los alrededores del Sol, se explican con la *teoría de evolución estelar*. El objetivo de esta teoría es explicar tales diagramas y lograr reproducirlos calculando modelos de estrellas.

- Considerando estrellas con *simetría esférica* y en *equilibrio hidrostático*, se requieren 4 ecuaciones diferenciales para describir la estructura de la estrella en función del radio:

$$\frac{dM}{dR}, \frac{dL}{dR}, \frac{dT}{dR}, \frac{dP}{dR} \text{ y la ecuación de estado del gas.}$$

En ese caso, la estructura de la estrella queda determinada por su *masa*, *composición química* (abundancias) y otros factores.

Usualmente, los modelos se calculan en coordenadas lagrangianas $M = M(r)$

Es necesario comparar el **diag HR observado "color - M_V "** con el teórico " **T_{eff} - M_{bol}** ".

Sobre la Secuencia Principal las estrellas son *esencialmente químicamente homogéneas* y *fusionan* ("quemán") $H \rightarrow He$ en sus núcleos:

Si M  $< 1.5 - 2 M_{\odot}$: ciclo p-p
 $> 1.5 - 2 M_{\odot}$: ciclo CNO

Diagrama color-magnitud de un cúmulo globular

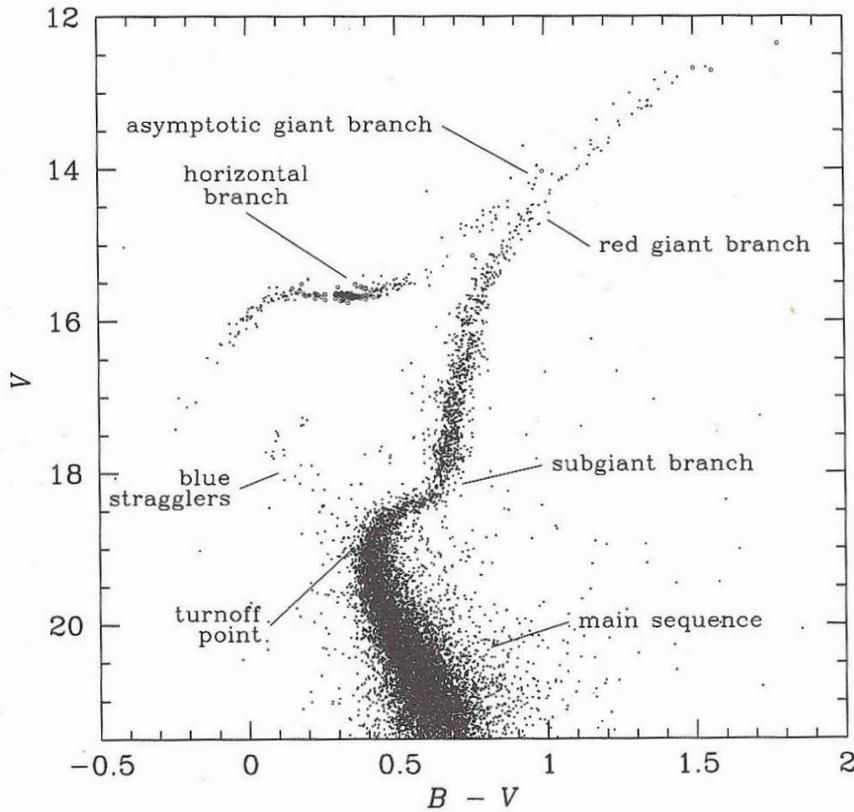


Figure 6.2 The color-magnitude diagram for the globular cluster M3. Known variable stars are shown as open circles, and the principal sequences are annotated. [From data published in Buonanno *et al.* (1994)]

Población estelar simple (SSP): es un conjunto de estrellas de igual edad y composición química, que nacieron en un brote de formación estelar de duración despreciable.

¿Por qué tiene ese aspecto este diagrama Color - Magnitud?

No muestra una “trayectoria evolutiva”,
corresponde a una “isocrona”

Cúmulo globular: la mejor aproximación a una SSP

“Galactic Astronomy”
Binney & Merrifield

Comparación de las trayectorias evolutivas (o "tracks") a partir de la Secuencia Principal: estrellas de 0.25 a $15 M_{\odot}$

Se muestra sólo parte de cada trayectoria

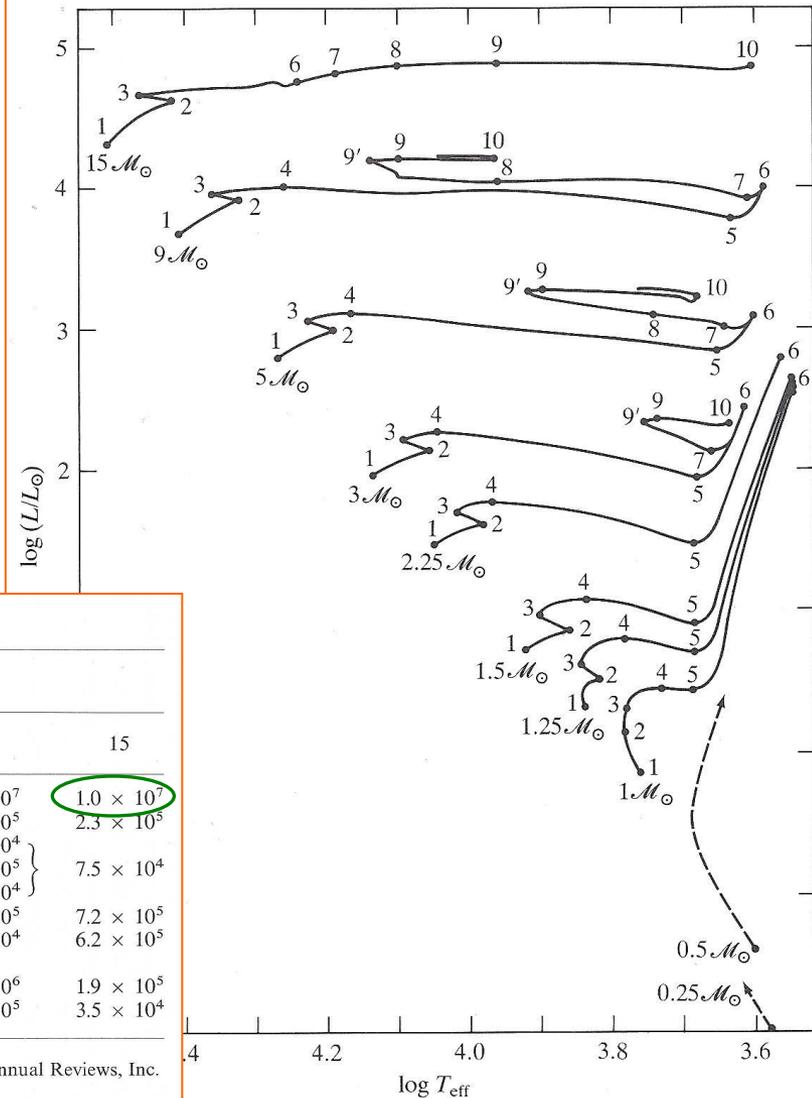


Table 3-9. Stellar-Evolution Times (Years)

| Evolution-track interval | Mass (M_{\odot}) | | | | | | | |
|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 1.0 | 1.25 | 1.5 | 2.25 | 3 | 5 | 9 | 15 |
| 1-2 | 7×10^9 | 2.8×10^9 | 1.5×10^9 | 4.8×10^8 | 2.2×10^8 | 6.5×10^7 | 2.1×10^7 | 1.0×10^6 |
| 2-3 | 2×10^9 | 1.8×10^8 | 8.1×10^7 | 1.6×10^7 | 1.0×10^7 | 2.2×10^6 | 6.1×10^5 | 2.3×10^5 |
| 3-4 | 1.2×10^9 | 1.0×10^9 | 3.5×10^8 | 3.7×10^7 | 1.0×10^7 | 1.4×10^6 | 9.1×10^4 | 7.5×10^4 |
| 4-5 | 1.6×10^8 | 1.5×10^8 | 1.0×10^8 | 1.3×10^7 | 4.5×10^6 | 7.5×10^5 | 1.5×10^5 | |
| 5-6 | $\geq 10^9$ | $\geq 4 \times 10^8$ | $\geq 2 \times 10^8$ | 3.8×10^7 | 4.2×10^6 | 4.9×10^5 | 6.6×10^4 | |
| 6-7 | - | - | - | - | 2.5×10^7 | 6.1×10^6 | 4.9×10^5 | 7.2×10^5 |
| 7-8 | - | - | - | - | - | 1.0×10^6 | 9.5×10^4 | |
| 8-9 | - | - | - | - | 4.1×10^7 | 9.0×10^6 | 3.3×10^6 | 1.9×10^5 |
| 9-10 | - | - | - | - | | 6.0×10^6 | 9.3×10^5 | 1.6×10^5 |

SOURCE: (13). Reproduced, with permission, from the *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Volume 5. © 1967 by Annual Reviews, Inc.

Figure 3-17. Post-main-sequence evolution tracks for stars with $0.25 M_{\odot} \leq M \leq 15 M_{\odot}$. Ages at the labeled points are given in Table 3-9. For $M \leq 2.25 M_{\odot}$, the tracks are terminated at the point of core helium ignition. For $M \geq 3 M_{\odot}$, the tracks are terminated shortly before helium-core exhaustion. [Reproduced with permission from the *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Volume 5. Copyright © 1967 by Annual Reviews, Inc.]

Trayectorias evolutivas de estrellas de baja masa

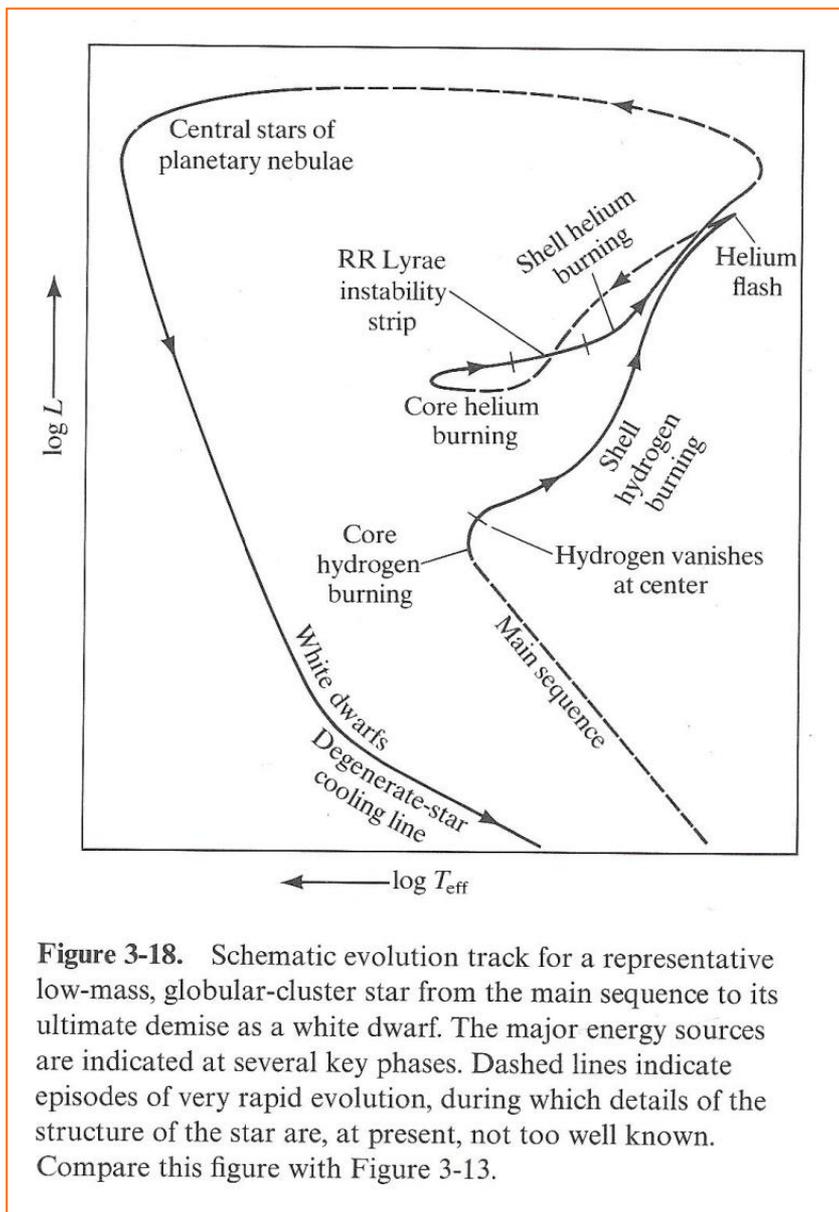


Figure 3-18. Schematic evolution track for a representative low-mass, globular-cluster star from the main sequence to its ultimate demise as a white dwarf. The major energy sources are indicated at several key phases. Dashed lines indicate episodes of very rapid evolution, during which details of the structure of the star are, at present, not too well known. Compare this figure with Figure 3-13.

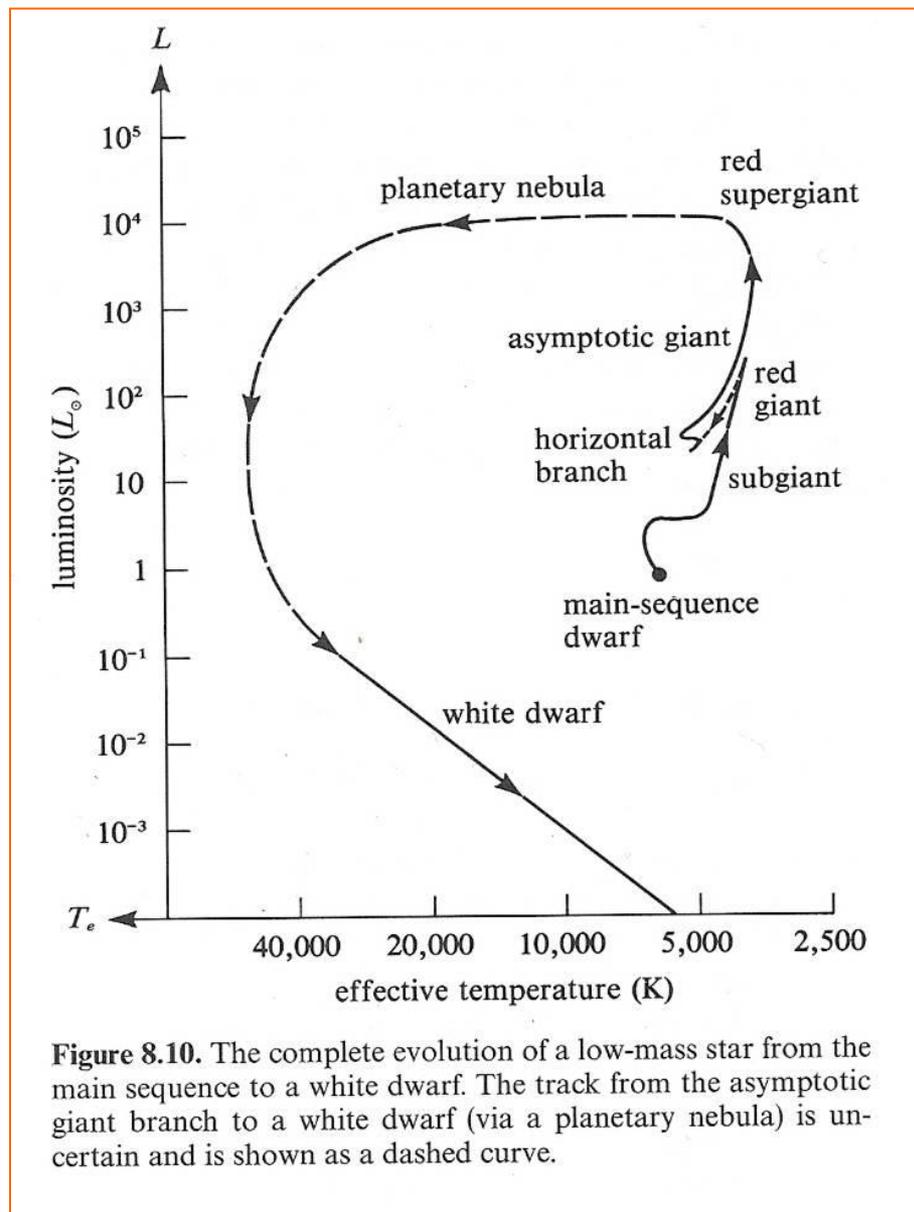


Figure 8.10. The complete evolution of a low-mass star from the main sequence to a white dwarf. The track from the asymptotic giant branch to a white dwarf (via a planetary nebula) is uncertain and is shown as a dashed curve.

Evolución de estrellas de baja masa: secuencia principal y rama de subgigantes

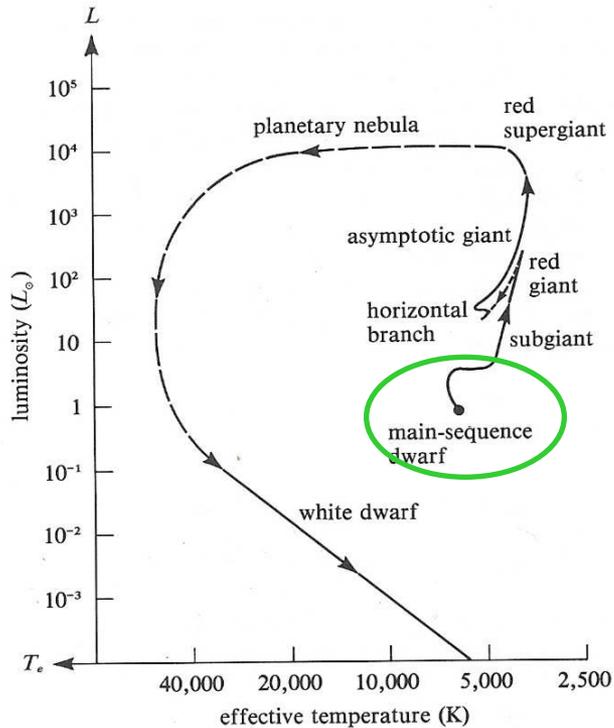


Figure 8.10. The complete evolution of a low-mass star from the main sequence to a white dwarf. The track from the asymptotic giant branch to a white dwarf (via a planetary nebula) is uncertain and is shown as a dashed curve.

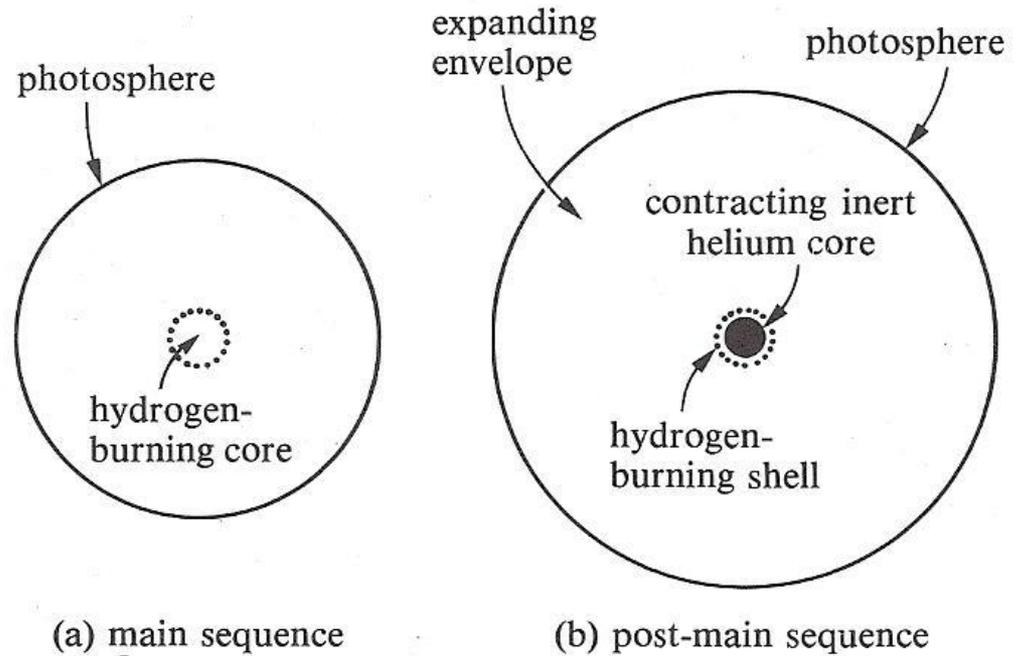


Figure 8.3. The structure of a star (a) on the main sequence and (b) as it begins to leave the main sequence because of core-hydrogen exhaustion.

Evolución de estrellas de baja masa: rama de gigantes rojas

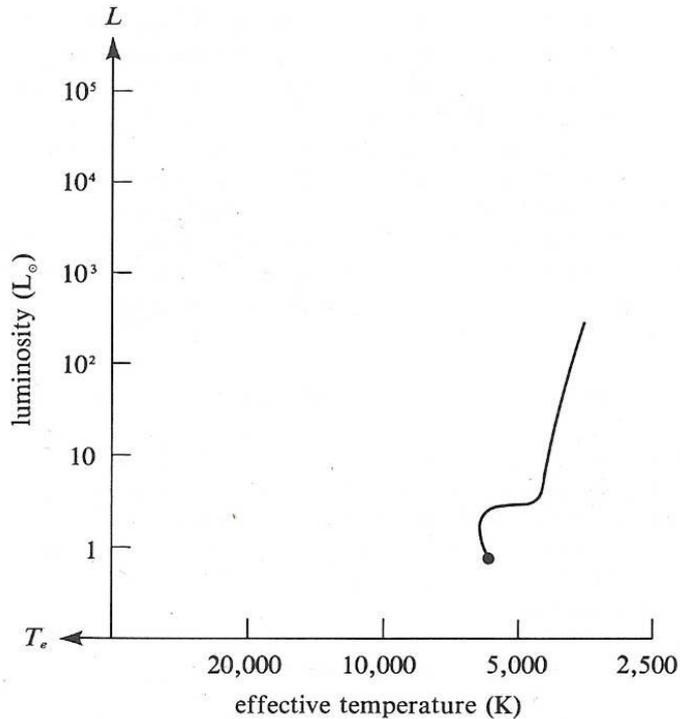


Figure 8.4. Ascent of a low-mass star to the red-giant branch. (Adapted from Icko Iben, *Ann. Rev. Astr. Ap.*, 5, 1967, 571.)

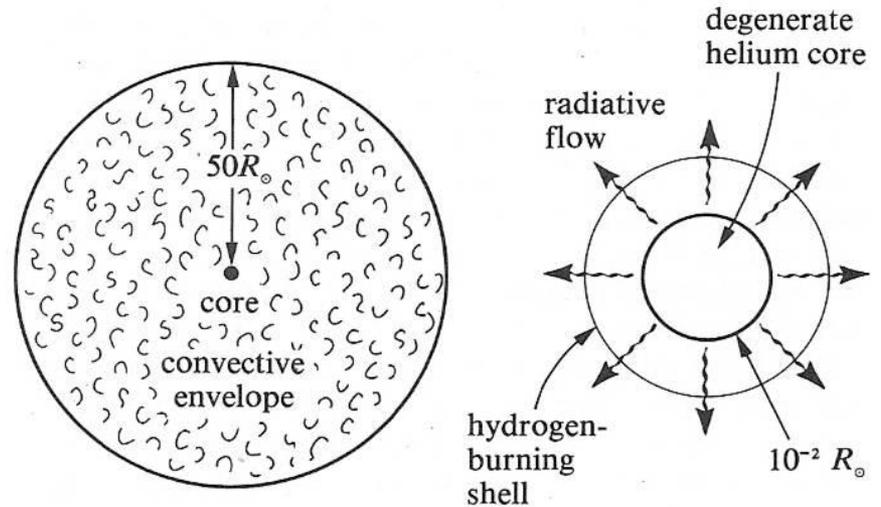


Figure 8.5. The structure of a red giant. The left figure shows the entire star from core to photosphere. The right figure shows an enlarged picture of the region near the core. Notice that the core, which may contain about half the total mass of a low-mass star at this point, occupies only one ten-billionth of the total volume.

Evolución de estrellas de baja masa: rama horizontal

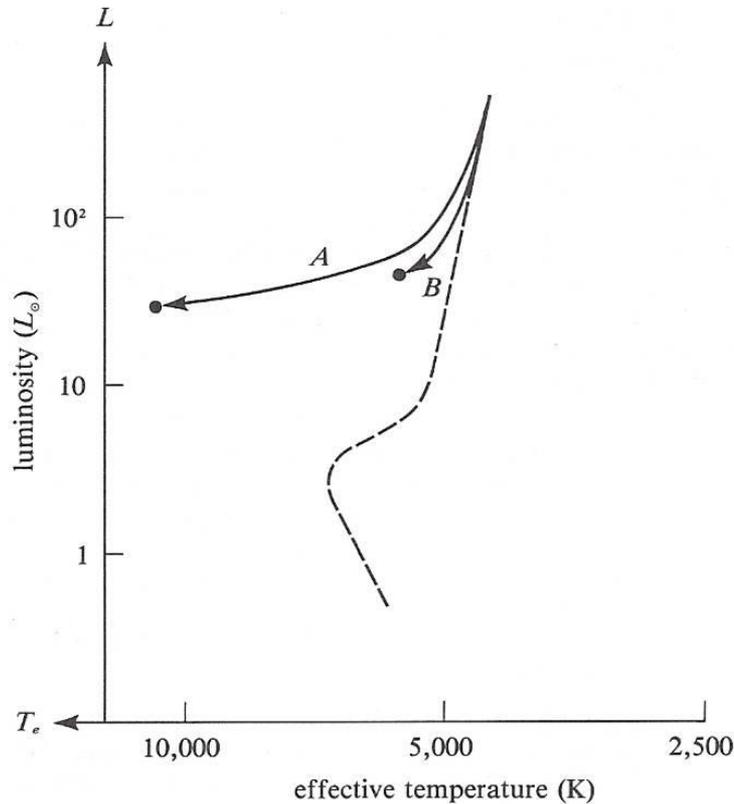


Figure 8.6. Descent of a low-mass star with poor heavy-element abundances (Population II star) from the tip of the red-giant branch to the horizontal branch. Track *A* corresponds to a star which suffered a relatively large loss of mass during the red-giant phase of stellar evolution. Track *B* corresponds to a star which suffered relatively little loss of mass. (Adapted from Icko Iben, *Ann. Rev. Astr. Ap.*, 5, 1967, 571.)

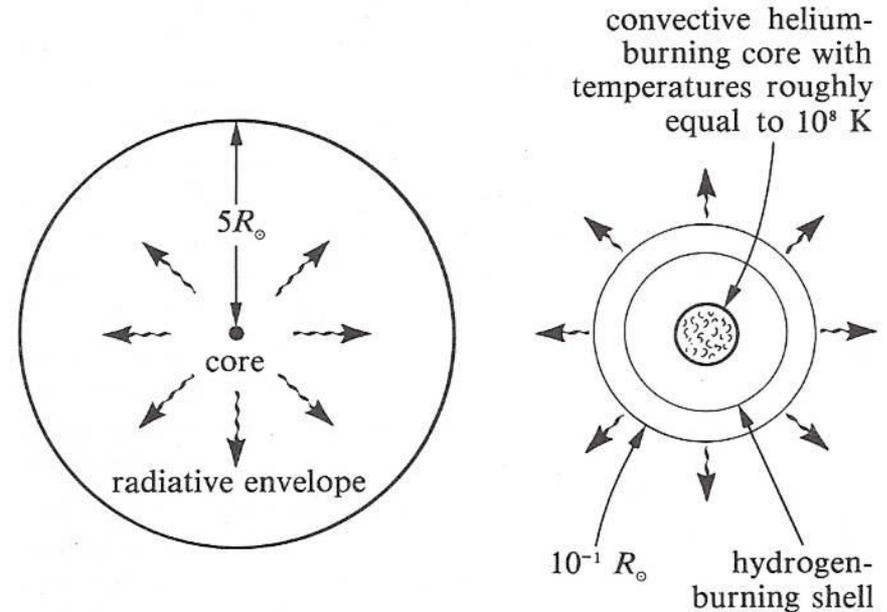
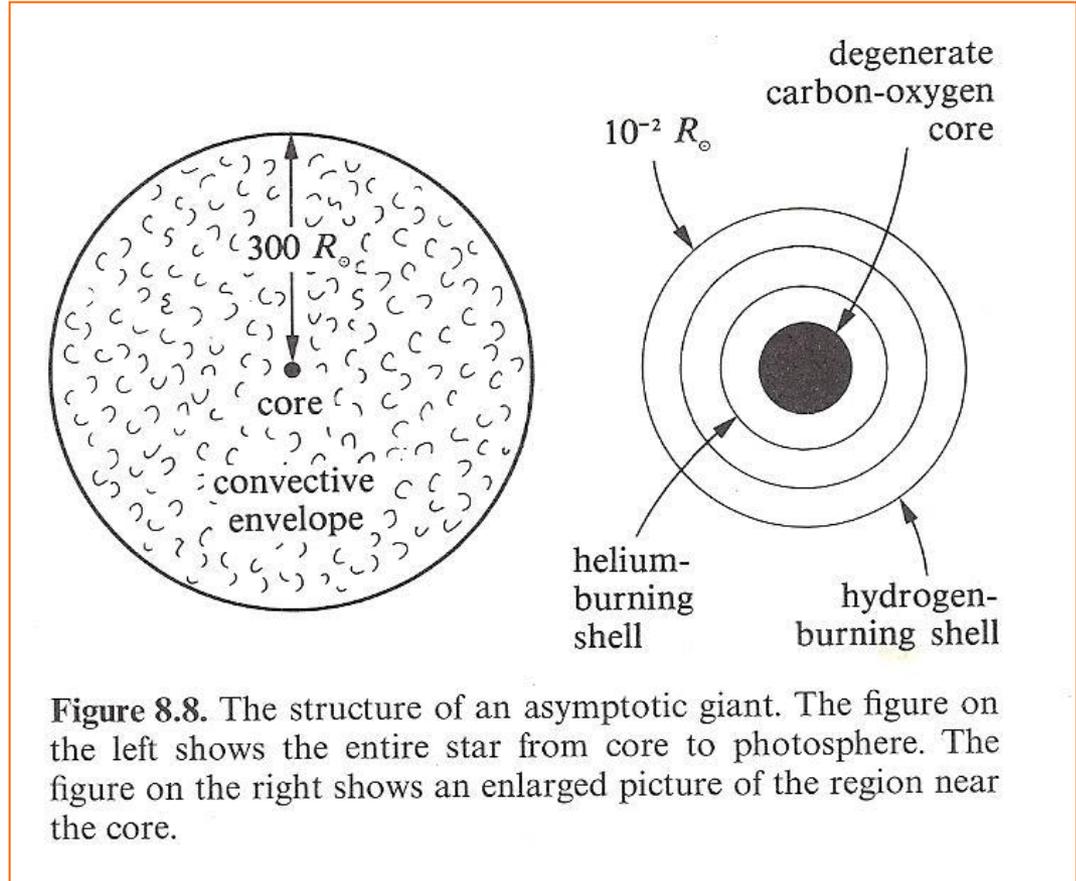
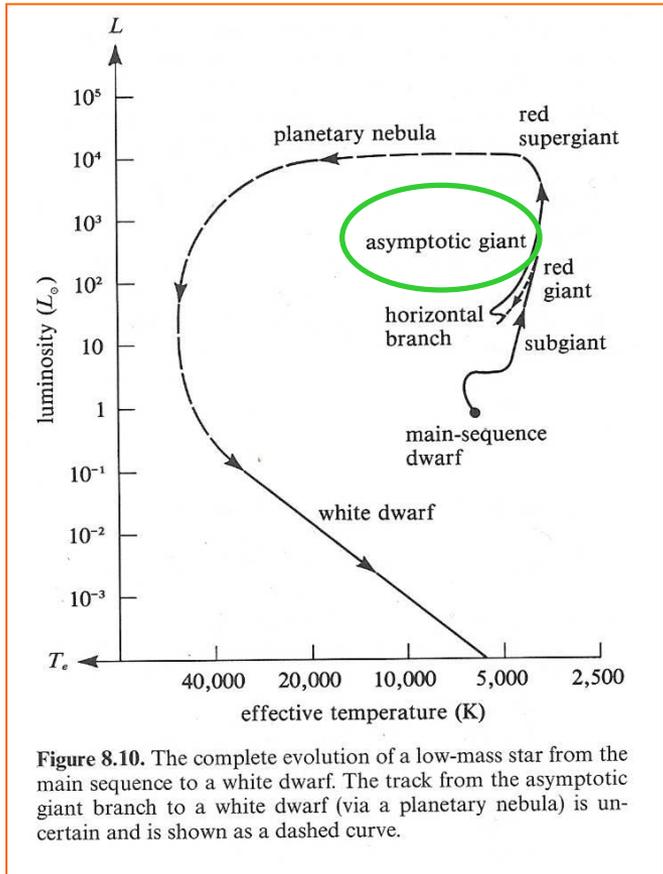
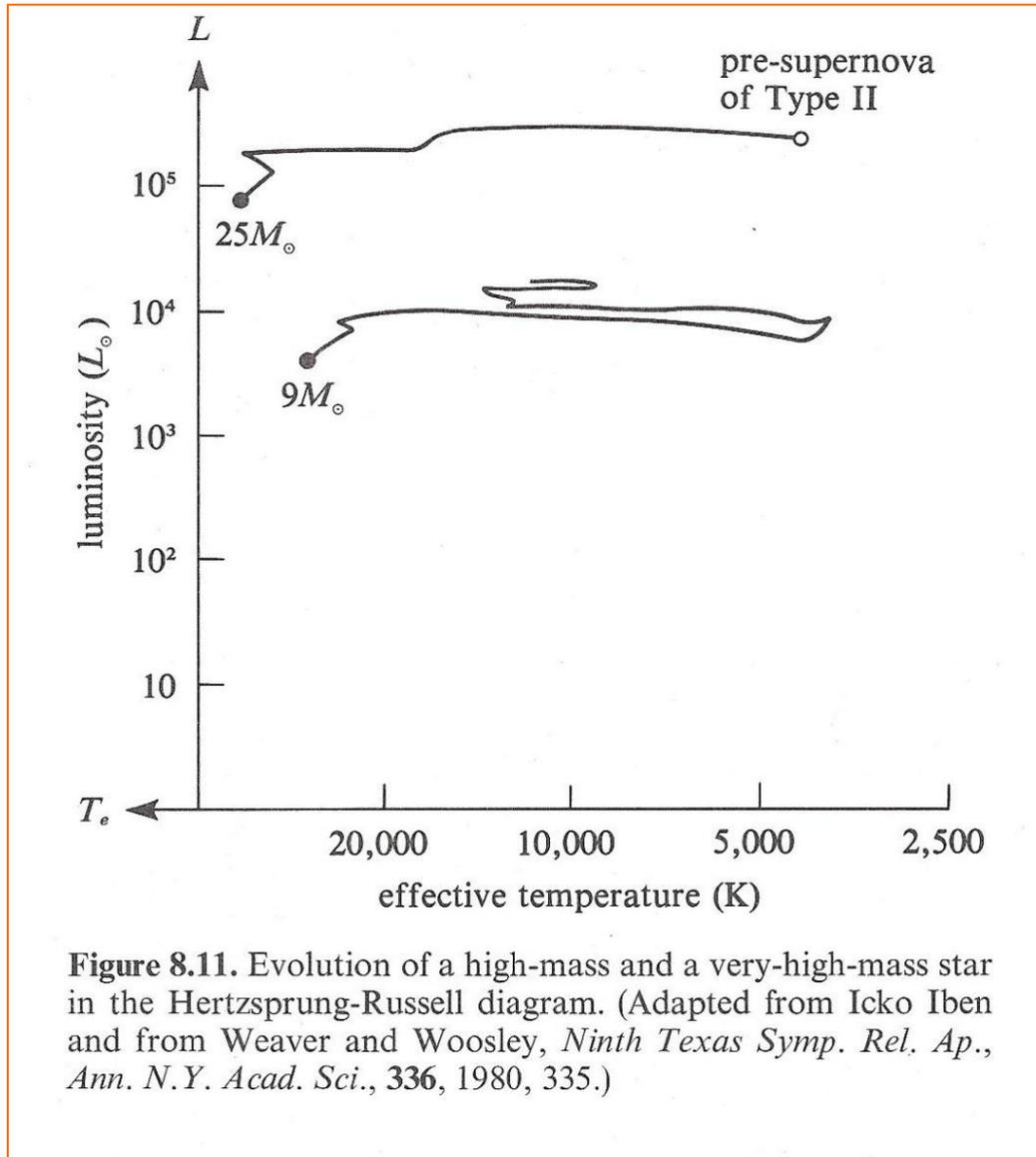


Figure 8.7. The structure of a horizontal-branch star. The left figure shows the entire star from core to photosphere. The right figure shows an enlarged picture of the region near the core.

Evolución de estrellas de baja masa: rama de gigantes asintótica



Trayectorias evolutivas de estrellas de alta masa: 9 y $25 M_{\odot}$



Clasificación observacional de supernovas

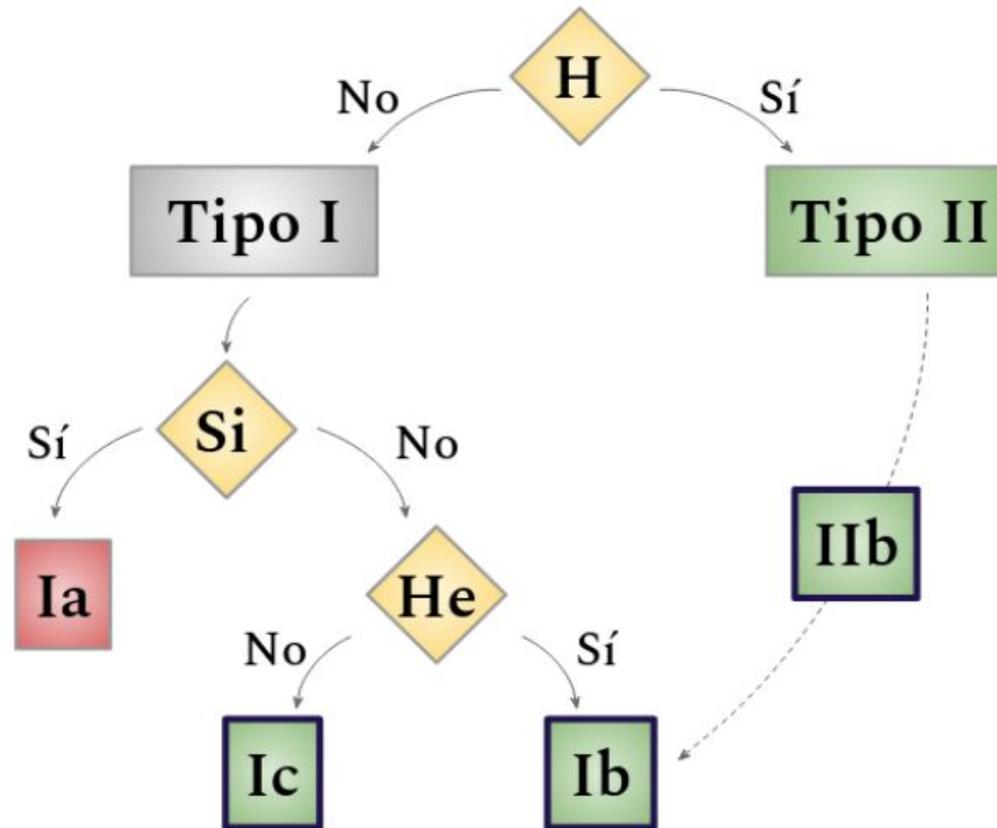


Figura 1.1: Esquema de la clasificación observacional basada en los elementos presentes en el espectro de las supernovas, indicados por los rombos amarillos. En rojo se marca el tipo de supernova que proviene de una explosión termonuclear, y en verde, los tipos correspondientes a supernovas de colapso de núcleo. Los tipos marcados con recuadro azul corresponden a *Stripped-Envelope Supernovae* (supernovas de envoltura removida, ver Sección 1.2) Este esquema no es completo, existen otras subclasificaciones en base a características de la curva de luz y del espectro. Sin embargo, estas subclasificaciones son irrelevantes para esta tesis.

Estrella evolucionada de alta masa: pre-supernova tipo Ib, Ic y II

Evolution of High-Mass Stars

155

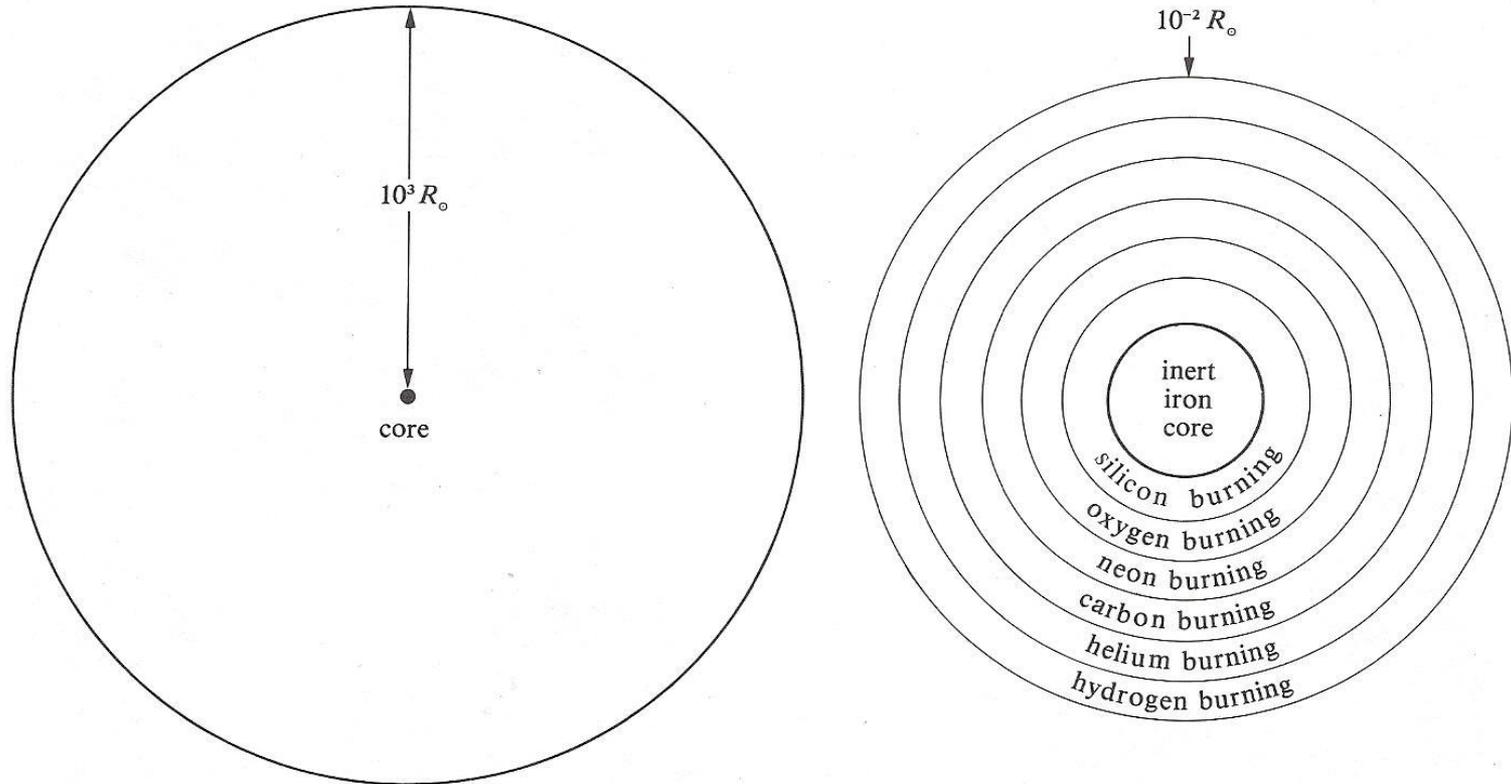


Figure 8.13. The onion-ring structure of a pre-supernova star (a very evolved star of high mass). The diagram on the left shows the dimensions of the entire star, a red supergiant, from core to photosphere. The diagram on the right shows the nuclear-burning regions near the inert iron core.

Bibliografía adicional:

D. Clayton, 1984, *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, Univ. of Chicago Press.

R. Kippenhahn, A. Weigert & A. Weiss, 2012, *Stellar Structure and Evolution*, 2nd. ed., Springer-Verlag.

Divulgativo:

R. Gamen & G. Ferrero, 2023, *Todos tenemos en nuestro interior algo de estrella (masiva)*, Núcleos #10, CEDi, UNNOBA.

<https://publicacionescedi.unnoba.edu.ar/index.php/revistanucleos/article/view/75>