

Evolución estelar: introducción y formación estelar

Introducción

- Se puede dividir la evolución estelar en tres etapas:
 - la formación estelar y la evolución antes de la secuencia principal,
 - la evolución durante la secuencia principal,
 - la evolución después de la secuencia principal y las fases evolutivas terminales.
- La secuencia principal representa la gran mayoría de la vida de las estrellas. Es la más fácil de entender cuantitativamente porque se puede tratar con modelos estáticos, a diferencia de las fases pre- y post-secuencia principal.
- En realidad, aun la secuencia principal no consta de una fase completamente estático, porque la generación de energía implica un cambio constante de la composición química del núcleo, lo cual conlleva un cambio lento, pero constante, en la estructura estelar.
- Fundamentalmente, entre la formación y la fase terminal, una estrella representa un equilibrio entre la fuerza de la gravedad y un gradiente de presión.
 - Únicamente durante la secuencia principal, debido a la enorme cantidad de energía que se puede generar a través la combustión del hidrógeno, podrá la estrella mantener una estructura más o menos estática.
 - Durante otras fases evolutivas, la estrella encontrará alguna fuente de energía, pero eventualmente se agotan todas.
 - Entre cada cambio de fuente energética, la gravedad provoca un colapso rápido de la estrella, provocando cambios irreversibles en la estructura de la estrella. Este proceso se repetirá con cada cambio de combustible hasta la fase evolutiva final, cuando la presión de la degeneración detendrá el colapso para siempre o, si la masa rebasa lo que puede detener esta presión, se formará un hoyo negro, cuya estructura interna se desconoce.
- Generalmente, la secuencia de eventos en la vida de una estrella es
 - La formación de la estrella inicia con el colapso de una parte de una nube de gas y polvo. La fase inicial del colapso es relativamente rápido debido a que el material es transparente. Eventualmente, cuando sube la densidad lo suficiente, el material deviene opaco, absorbe más de la energía que radia y empieza a calentarse, lo cual detiene el ritmo de colapso.
 - Si el interior de la estrella alcanza una temperatura suficiente para iniciar la combustión de hidrógeno, se generará suficiente presión para detener el colapso y la estrella alcanzará una configuración de equilibrio hidroestático que mantendrá a lo largo de la fase de secuencia principal.
 - Si la masa de la estrella es muy baja, del orden de $0.05 M_{\odot}$, el interior nunca alcanzará una temperatura suficiente para la combustión de hidrógeno. En este caso, la estrella colapsará hasta la presión de electrones degenerados provee la presión para detener para siempre el colapso.
 - La evolución después de la secuencia principal involucra varios efectos relacionados.

- Las etapas iniciales de combustión nuclear producen núcleos cada vez más masivos. El efecto fundamental de esta transformación es aumentar la masa molecular promedio. Un aumento en la masa molecular promedio tiende a bajar la presión en la zona de generación de energía, lo cual provoca una contracción gravitatoria para aumentar la temperatura y reestablecer la presión necesaria para soportar la estrella.
- El aumento de la temperatura provoca dos efectos. Primero, aumenta el gradiente térmico, lo cual provoca un mayor flujo de energía de la estrella. Para contrarrestar este efecto y reestablecer el equilibrio, el radio de la estrella aumenta. Segundo, la mayor temperatura aumenta la tasa de producción de energía, lo cual provoca un aumento en la luminosidad.
- Con las etapas sucesivas de combustión nuclear la estrella desarrolla una estructura muy inhomogénea. En el núcleo, la estrella quemará el combustible más pesado. El núcleo será rodeado de una zona compuesta de los residuos de la fase de combustión anterior donde no habrá combustión nuclear. A su vez, esta zona inerte será envuelta por una capa donde todavía continua la fase anterior de combustión. Esta estructura de pares de capas inertes y de combustión nuclear continuará hasta llegar al envoltorio de la estrella donde nunca sucedió la combustión nuclear.
- La tendencia general de la evolución post-secuencia principal es el desarrollo de un núcleo cada vez más denso, una estructura inhomogénea, mayores luminosidades y, usualmente, mayor radio. La rapidez de la evolución post-secuencia principal se explica principalmente por la mayor luminosidad y el número cada vez menor de núcleos que pueden participar en etapas de combustión nuclear. Básicamente, es necesario generar más y más energía con cada vez menos combustible.
- Como ejemplo, consideramos la evolución de una estrella de 5 M_{\odot} ilustrada en la siguiente gráfica.
 - Durante la evolución de la secuencia principal, aumenta la luminosidad debido al cambio de la composición del núcleo.
 - Antes de que se agote el hidrógeno en el núcleo, hay contracción global de la estrella, lo cual permite la combustión de hidrógeno en una capa exterior al núcleo cuando se agote el hidrógeno en el núcleo.
 - Inicialmente, esta capa donde se quema hidrógeno es gruesa, pero se adelgaza con el tiempo, lo cual disminuye la luminosidad. Al mismo tiempo, el núcleo inerte contrae y la envoltorio de la estrella se expande para mantener el gradiente térmico.
 - Eventualmente, la expansión de la envoltorio cesará, pero continuará la contracción del núcleo, lo cual eventualmente provocará un suficiente aumento en la temperatura de la cáscara de combustión de hidrógeno para aumentar la luminosidad. Durante todo este tiempo, la capa de combustión de hidrógeno va aumentando la masa del núcleo (inerte) de helio.
 - En la cima de la rama de gigantes, se iniciará la combustión de helio. Antes de llegar a este punto, el material del núcleo era degenerado. Por lo tanto, la presión del núcleo no responde al calentamiento del material que acompaña la generación de energía, lo cual provoca un aumento muy rápido de la temperatura.

Eventualmente, la temperatura logra levantar la degeneración, en cual momento el material responde con una expansión violenta y una bajada rápida de la temperatura. Esta es la fase del destello de helio.

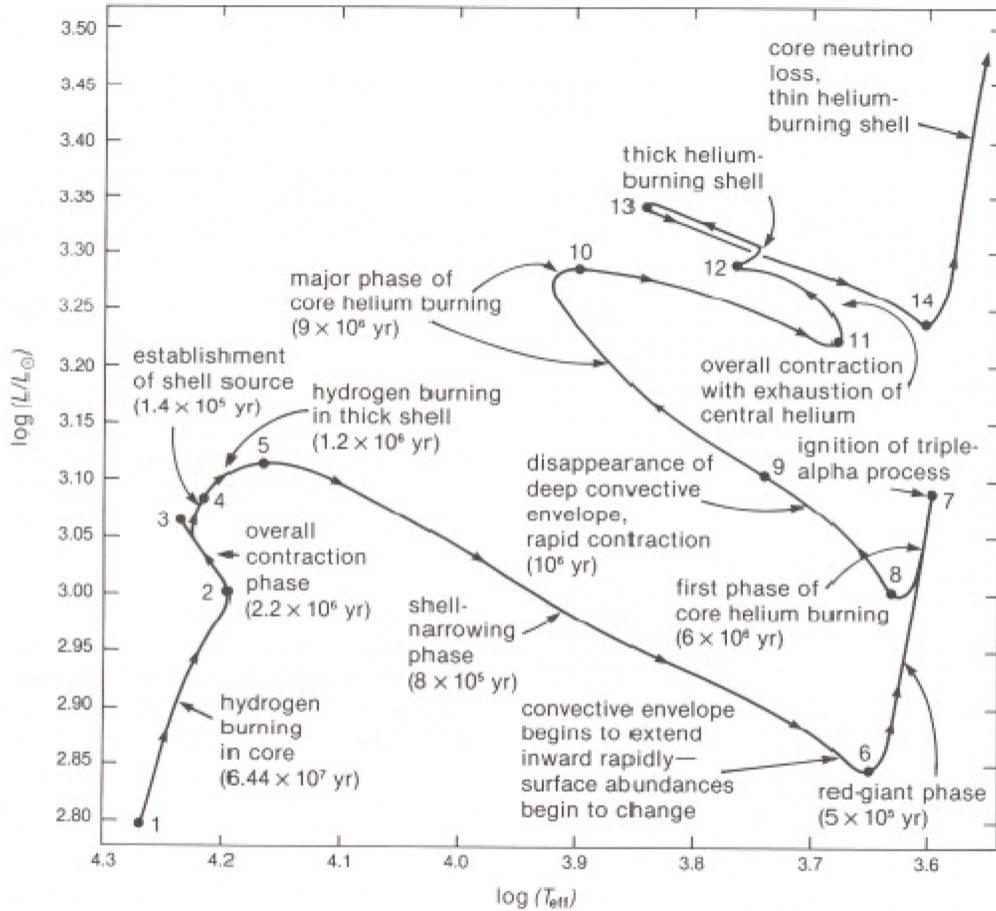


Figure 8.1. Evolutionary path of a Population I star of $5 M_{\odot}$ in the Hertzsprung-Russell diagram, showing processes characterizing each stage. Time in parentheses is the duration of the stage between the numbered points. Luminosity is in L_{\odot} and temperature in K. The elapsed time between points 10 and 11 is 10^6 years.

- La expansión del núcleo que acompaña al destello de helio provoca una contracción de la envoltura y la temperatura superficial de la estrella aumenta. Sigue la fase de combustión de helio en el núcleo.
- Cuando el helio está por agotarse en el núcleo, se repite la contracción que acompañó la misma fase de combustión de hidrógeno. Durante esta contracción, se inicia la combustión de hidrógeno en una capa afuera del núcleo. Eventualmente, los residuos de esta capa serán utilizados en una capa de combustión de helio.
- Una vez que se agote el helio en el núcleo, la estructura será algo complicada y constará del núcleo inerte rodeada de capas donde se quema alternadamente hidrógeno y helio. Para mantener las temperaturas necesarias para esta combustión, el núcleo irá contrayendo y la envoltura expandiendo. De nuevo, la estrella subirá la rama de gigantes.

- Eventualmente, se iniciará un proceso de pérdida de la envoltura, se supone debido a la formación de polvo, pero en realidad por procesos todavía poco entendidos.
- En términos de la masa inicial de la estrella, las fases evolutivas finales son
 - $M < 0.05M_{\odot}$: Nunca logrará iniciar la combustión de hidrógeno. Probablemente resultará un planeta como Júpiter.
 - $0.05M_{\odot} < M \leq M_{\odot}$: Nunca iniciará la combustión de helio. Terminará como una enana blanca compuesta de helio.
 - $M_{\odot} < M < 5 - 8 M_{\odot}$: Nunca iniciará la combustión de carbono. Terminará como una enana blanca compuesta de carbono y oxígeno
 - $M > 8 M_{\odot}$: Se procederá a la combustión de carbono, oxígeno y las etapas subsiguientes que eventualmente producirán un núcleo de ^{56}Fe . El resultado será una supernova o destello de rayos gamma, los cuales dejarán una estrella de neutrones o hoyo negro (¿o nada?) como remanente.

Secuencias evolutivas

- El estudio de la evolución estelar es más complicado que el estudio de la estructura por dos razones fundamentales:
 - Primero, algunas fases implican cambios estructurales sobre escalas de tiempo dinámicas, lo cual necesita soluciones a las ecuaciones hidrodinámicas completas y no solamente las ecuaciones de estructura estática.
 - Segundo, la estructura y su ritmo de cambio en un momento dependen de la estructura del momento anterior.
- El segundo efecto implica que el estudio de la evolución estelar requiere secuencias de modelos partiendo de un estado estático o un estado con un ritmo de cambio conocido.
- Recordemos que las ecuaciones de estructura estelar son

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{m(r)G\rho}{r^2} - \rho \frac{d^2r}{dt^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial m}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho(r) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{3\kappa\rho(r)}{16\pi a c r^2 T^3} L(r) \quad (3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho(r) \left(\varepsilon(r) - T \frac{ds}{dt} \right) \quad (4)$$

A diferencia de las ecuaciones estáticas, las ecuaciones (1)-(4) dependen explícitamente del tiempo. A condición que el sistema no está cambiando sobre una escala de tiempo de caída libre, se puede ignorar el segundo término en la ecuación (1). Se puede ignorar el segundo término en la ecuación (4) solamente en el caso de evolución estática.

La evolución de una proto-estrella

- Las estrellas se forman a partir de condensaciones en nubes de gas y polvo. Sus densidades y temperaturas iniciales son entonces bajas. En estas condiciones, su única fuente de energía es la contracción gravitatoria.

- Entonces, la luminosidad será

$$L = \frac{dE}{dt} \propto \frac{d}{dt} \frac{M^2 G}{R} = - \frac{M^2 G}{R^2} \frac{dR}{dt} \quad (5)$$

done E es la energía potencial gravitatoria de la proto-estrella mientras que M y R son su masa y radio, respectivamente. Dado que la luminosidad es positiva, el radio tiene que disminuir con el tiempo

- La fuerza que se opondrá a la gravedad es la presión. Sin embargo, se trata de un colapso de la proto-estrella, así que es una configuración dinámica por lo cual la gravedad y la presión no estarán en equilibrio, sino que la presión será menor a la fuerza gravitatoria. Si suponemos un gas ideal, la presión promedio dentro de la proto-estrella será

$$P = \frac{\rho k T}{\mu m_H} = \frac{3}{4\pi} \frac{k T}{\mu m_H} \frac{M}{R^3}$$

y

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3k}{4\pi m_H} \left(-\frac{T}{\mu} R^{-4} \frac{dR}{dt} + \frac{R^{-3}}{\mu} \frac{dT}{dt} - \frac{T}{\mu^2} R^{-3} \frac{d\mu}{dt} \right) \quad (6)$$

donde μ es la masa molecular promedia, T la temperatura promedia, k el constante de Boltzmann y m_H la masa del hidrógeno. Vemos que la presión necesariamente sube con el tiempo, porque los tres términos de la ecuación (6) son positivos.

- Durante la primera fase de colapso de la proto-estrella, el material es difuso y frío. No solamente no es ionizado, sino que el hidrógeno será en forma molecular. Por lo tanto, toda la energía absorbida por el material de la proto-estrella se utilizará para primero disociar el hidrógeno molecular y luego para ionizar al hidrógeno y helio (despreciamos los demás elementos). En estas condiciones, la temperatura no cambiará significadamente y podemos suponer que no contribuye el segundo término de la ecuación (6).
- El cambio en la masa molecular promedia también contribuirá al aumento de la presión, pero tiene un efecto limitado. Recordando que

$$\mu^{-1} = \sum_i \bar{n}_i \frac{m_H}{m_i},$$

la secuencia hidrógeno molecular \rightarrow hidrógeno atómico \rightarrow hidrógeno ionizado implica una secuencia de masa molecular promedia

$$\mu(\text{H}_2) = 2 \rightarrow \mu(\text{H}) = 1 \rightarrow \mu(\text{H}^+) = 0.5$$

que varía por (solamente) un factor de 4.

- Básicamente, debido a los procesos de disociación de hidrógeno molecular y de ionización de hidrógeno y helio, el material de la proto-estrella tiene una alta capacidad de calor, lo cual implica que la temperatura cambiará poco con la adición de energía. Por lo tanto, la temperatura no tiene necesidad de cambiar y es razonable suponer que es casi constante inicialmente.
- Inicialmente, entonces, el cambio en la presión se deberá principalmente al cambio de la densidad debido a la disminución del volumen (cambio de radio).
- Si despreciamos los términos debido a la temperatura y la masa molecular promedia porque tendrán poco efecto durante la evolución inicial, podemos reacomodar la ecuación (6) para obtener

$$\frac{dR}{dt} > \mu R^4 \frac{dP}{dt} \quad (7)$$

donde la desigualdad se debe a que la presión y la gravedad no están en equilibrio. En cualquier caso, es evidente que

$$\frac{dR}{dt} \gg \frac{dP}{dt}$$

cuando el radio es grande y que la tasa de cambio del radio disminuirá rápidamente conforme disminuye el radio.

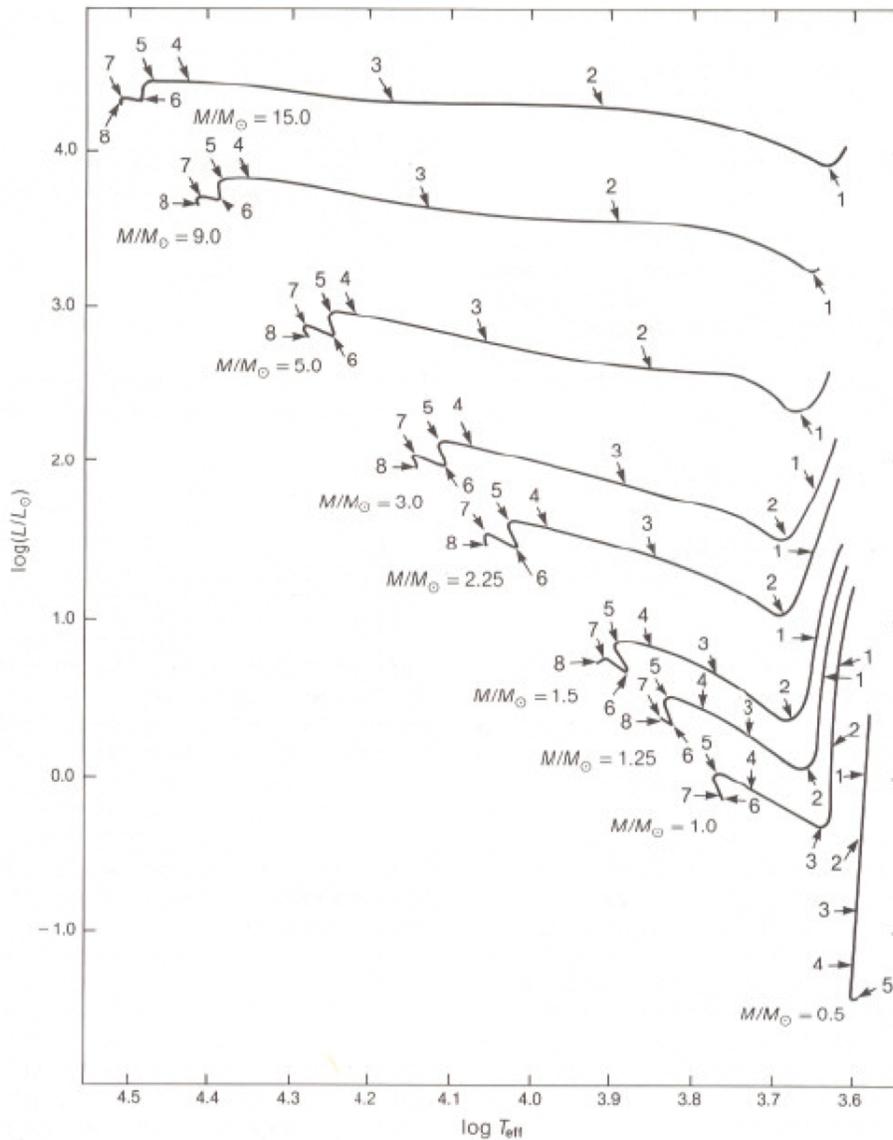


Figure 8.2. Evolutionary tracks for stars before the main sequence. The time intervals required for stars to reach the numbered points are given in Table 8.2. The locus of the terminal points of the paths defines the zero age main sequence.

- Lo más rápidamente que puede cambiar el radio es el límite impuesto por caída libre,

$$\frac{d^2R}{dt^2} = -\frac{GM}{R^2}.$$

No obstante, se obtendría este cambio solamente si la presión es cero, mientras que en

realidad el desequilibrio es pequeño y generalmente disminuye conforme aumenta la presión, lo cual indica que la luminosidad disminuirá con el tiempo.

- Entonces, durante la primera fase evolutiva de la proto-estrella, su temperatura será constante mientras su luminosidad disminuye, inicialmente muy rápidamente y luego más despacio (ecuación 6). Esta caída en luminosidad a temperatura constante se conoce como el trayecto de Hayashi. En el diagrama HR, esta evolución corresponde a una caída vertical del lado derecho del diagrama (a baja temperatura). La gráfica que sigue presenta los trayectos pre-secuencia principal para estrellas de varias masas.
- Eventualmente, la absorción de energía ionizará completamente todo el material y se iniciará la segunda fase evolutiva de la proto-estrella. Una vez ionizado todo el material, la contracción continua de la proto-estrella sí provocará un aumento en su temperatura, porque la masa molecular promedio ya es constante mientras que la presión sigue aumentando (sigue el colapso gravitatorio).
- También, una vez que el material esté totalmente ionizado, su opacidad y su capacidad de calor son mucho menores. De la ecuación de transferencia de radiación y el gradiente adiabático

$$L(r) = -\frac{16\pi ac}{3\kappa\rho(r)} r^2 T^3 \frac{dT}{dr} \quad \text{con} \quad \left. \frac{dT}{dr} \right|_{ad} = -\frac{m(r)G}{r^2} \frac{1}{c_p},$$

vemos que ambos aumentan, lo cual permite un colapso más rápido.

- Como consecuencia de estos dos efectos, en la segunda fase del colapso de la proto-estrella la luminosidad aumenta ligeramente y la temperatura cambia sustancialmente. En el diagrama HR, la proto-estrella evoluciona hacia la izquierda, como se ve en la gráfica que sigue.
- La evolución pre-secuencia principal termina cuando el interior de la proto-estrella alcanza una temperatura y densidad suficiente para iniciar la combustión de hidrógeno. La energía generada por este proceso proveerá la presión necesaria para detener a la gravedad.

- La gráfica siguiente presenta la evolución de varios parámetros durante la fase pre-secuencia principal para una estrella con la masa del Sol.

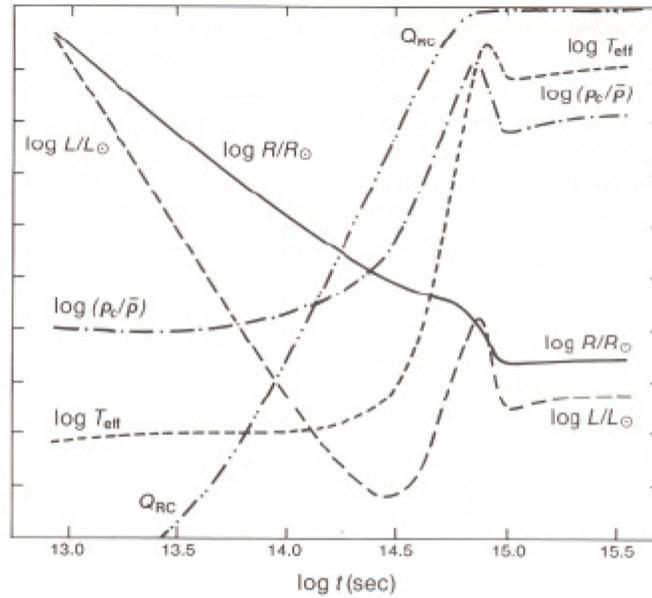


Figure 8.3. Time-variation of stellar parameters for a $1 M_{\odot}$ star as it evolves down the Hayashi track; the time is in seconds. The curve Q_{RC} gives the mass fraction in the radiative core, with the ordinate scaled such that $0 \leq Q_{RC} \leq 1.0$. For other curves, $3.58 \leq \log T_{eff} < 3.78$; $0 \leq \log (\rho_c/\bar{\rho}) \leq 2.0$; $-0.4 \leq \log (L/L_{\odot}) \leq +0.6$; and $-0.4 \leq \log (R/R_{\odot}) \leq +0.6$.