

# **Astronomía estelar**

2024

prof Radostin Kurtev

Clase 7  
Diagrama H-R

## Diagrama HERTZSPRUNG–RUSSELL

- A principios del siglo XX, cuando los astrónomos acumularon datos para una muestra cada vez más grande de estrellas, se dieron cuenta de la amplia gama de luminosidades estelares y magnitudes absolutas.
- Las estrellas O en un extremo de la secuencia de Harvard tienden a ser más brillantes y más calientes que las estrellas M en el otro extremo.
- Además, la relación empírica de masa-luminosidad, deducida del estudio de estrellas binarias, mostró que las estrellas O son más masivas que las estrellas M.
- Estas regularidades condujeron a una teoría de la evolución estelar que describió cómo las estrellas podrían refrescarse a medida que envejecen. Esta teoría (**ya no válida**) sostenía que las estrellas comienzan sus vidas como estrellas O azules jóvenes, calientes y brillantes. Se sugirió que a medida que envejecen, las estrellas se vuelven menos masivas a medida que agotan más y más de su "combustible" y que gradualmente se vuelven cada vez más frías y débiles hasta que se desvanecen como estrellas M viejas y oscuras.
- Aunque es incorrecto, un vestigio de esta idea permanece en los términos espectral temprano y tardío.

## Un rango enorme en radios estelares

- Si ésta idea de enfriamiento estelar fuera correcta, entonces debería haber sido una relación entre la magnitud absoluta de una estrella y su tipo espectral.
- El ingeniero y astrónomo aficionado Danes, **Ejnar Hertzsprung** (1873-1967), analizó estrellas cuyas magnitudes absolutas y tipos espectrales habían sido determinado precisamente.
- En 1905 publicó un documento que confirmaba la correlación esperada entre estas cantidades.
- Sin embargo, tenía dudas por su descubrimiento de que las estrellas de tipo G o posteriores tenían un rango grande de magnitudes, a pesar de tener la misma clasificación espectral.
- Hertzsprung denominó estrellas más brillantes - gigantes. Esta nomenclatura era natural, ya que la ley Stefan-Boltzmann muestra que

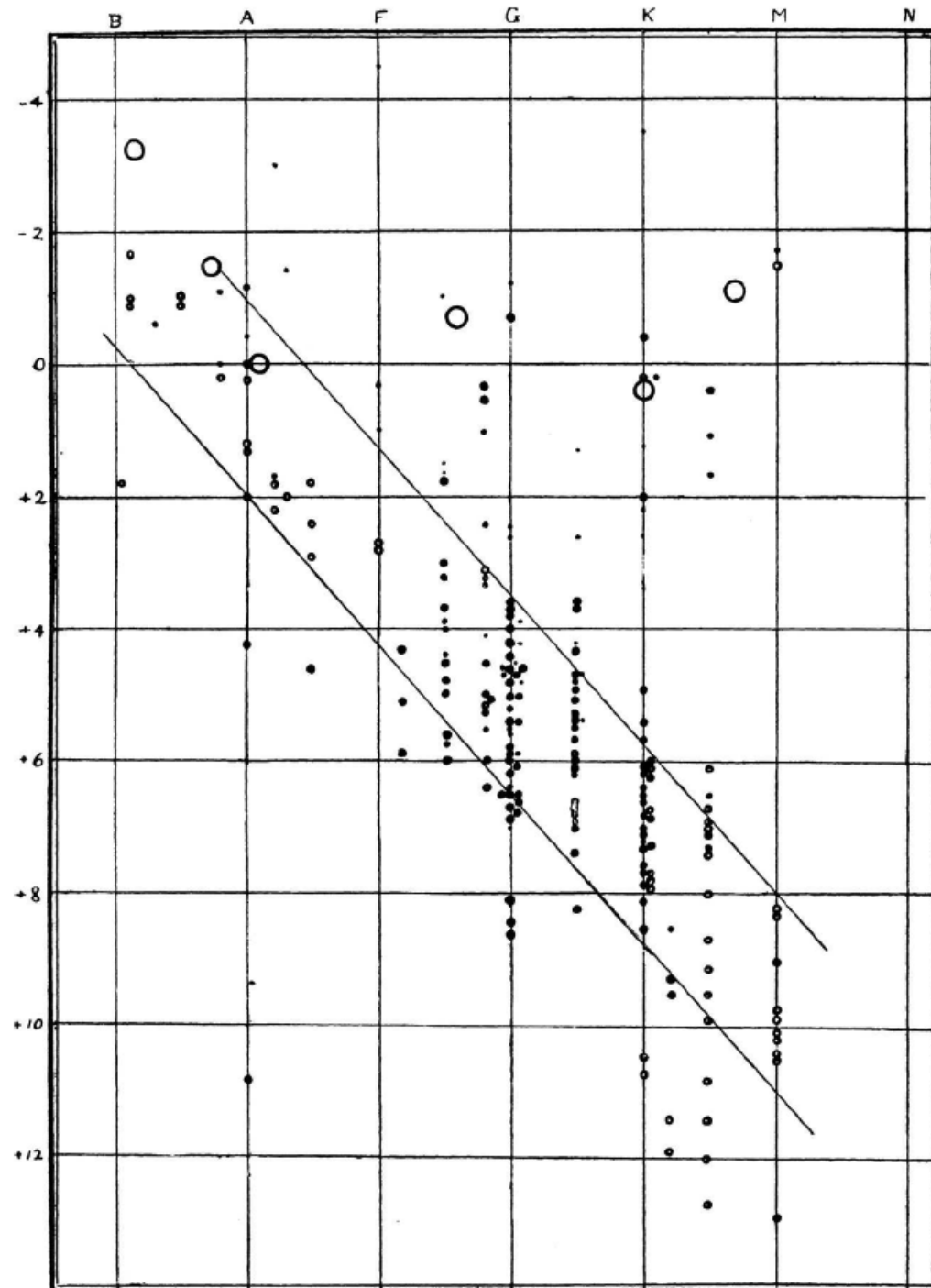
$$R = \frac{1}{T_e^2} \sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma}}.$$

- Si dos estrellas tienen la misma temperatura (como se infiere de las estrellas que tienen el mismo tipo espectral), entonces la estrella más luminosa debe ser más grande.

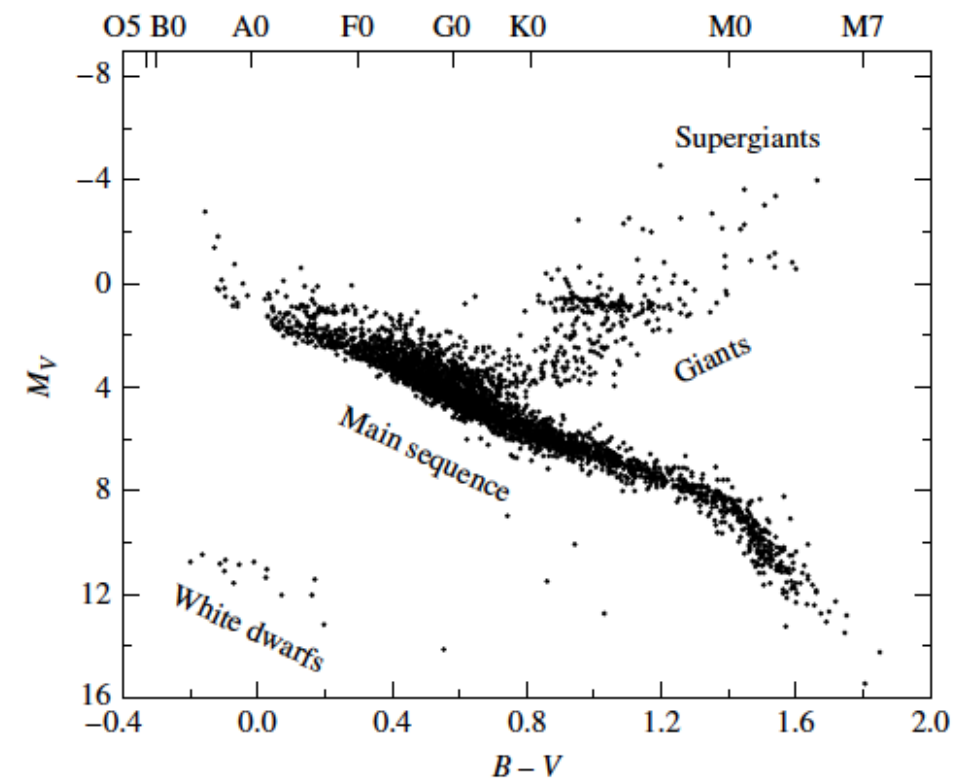
## Un rango enorme en radios estelares

- Mientras tanto, en la Universidad de Princeton, Henry Norris Russell (1877-1957) llegó independientemente a las mismas conclusiones que Hertzsprung.
- Russell usó el mismo término, **gigante**, para describir las estrellas luminosas de tipo espectral tardío y el término estrellas enanas para sus contrapartes débiles.
- En 1913, Russell publicó el diagrama que se muestra en la figura 12. Registra las propiedades observadas de una estrella: magnitud absoluta en el eje vertical (con brillo que aumenta hacia arriba) y tipo espectral que se ejecuta horizontalmente (de modo que la temperatura aumenta hacia la izquierda).
- Este primer "diagrama de Russell" muestra la mayoría de las características de su sucesor moderno, el diagrama Hertzsprung-Russell (H-R). Se trazaron más de 200 estrellas, la mayoría dentro de una franja que llega desde la esquina superior izquierda, sede de las estrellas O calientes y brillantes, en la esquina inferior derecha, donde residen las estrellas frías y débiles. Esta franja, llamada Secuencia principal, contiene entre 80% y 90% de todas las estrellas en el diagrama H-R.

En la esquina superior derecha se encuentran las estrellas gigantes. La enana blanca única, 40 Eridani B, se encuentra en la parte inferior izquierda.<sup>1</sup> Las bandas verticales de las estrellas en el diagrama de Russell son el resultado de la clasificación discreta de los tipos espectrales. Una versión más reciente de un diagrama observacional H-R se muestra en la Fig. 13 con la magnitud visual absoluta de cada estrella trazada frente a su índice de color y tipo espectral

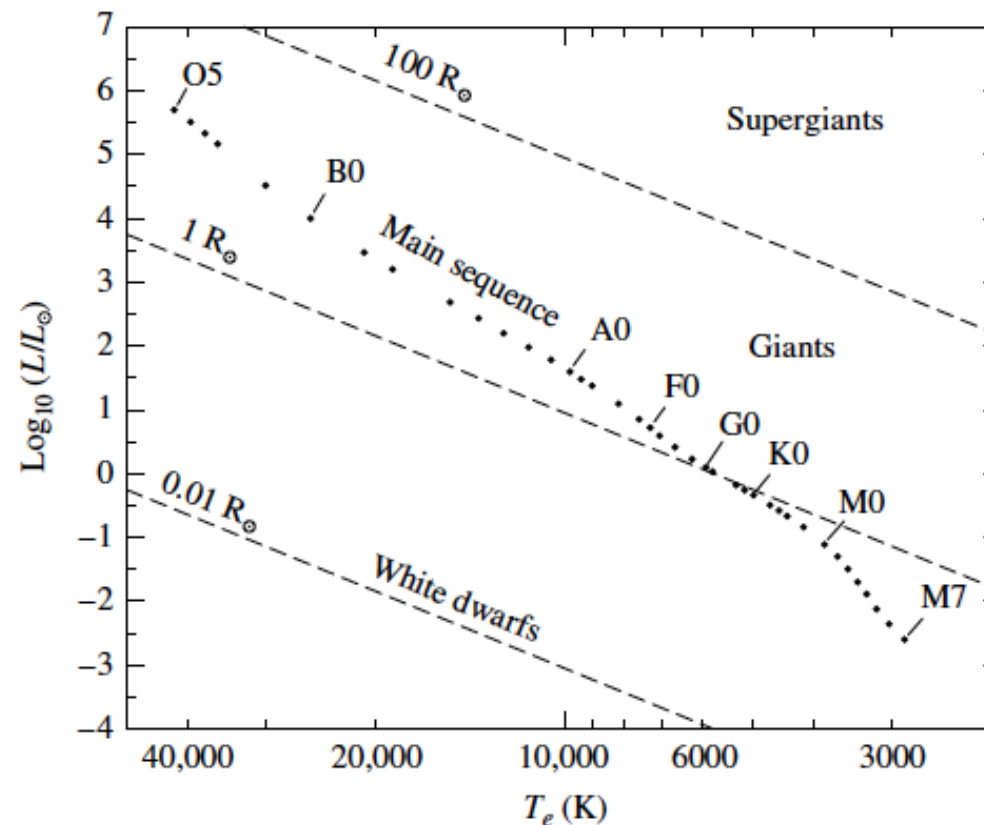


**FIGURE 12** Henry Norris Russell's first diagram, with spectral types listed along the top and absolute magnitudes on the left-hand side. (Figure from Russell, *Nature*, 93, 252, 1914.)



**FIGURE 13** An observer's H-R diagram. The data are from the Hipparcos catalog. More than 3700 stars are included here with parallax measurements determined to better than 20%. (Data courtesy of the European Space Agency.)

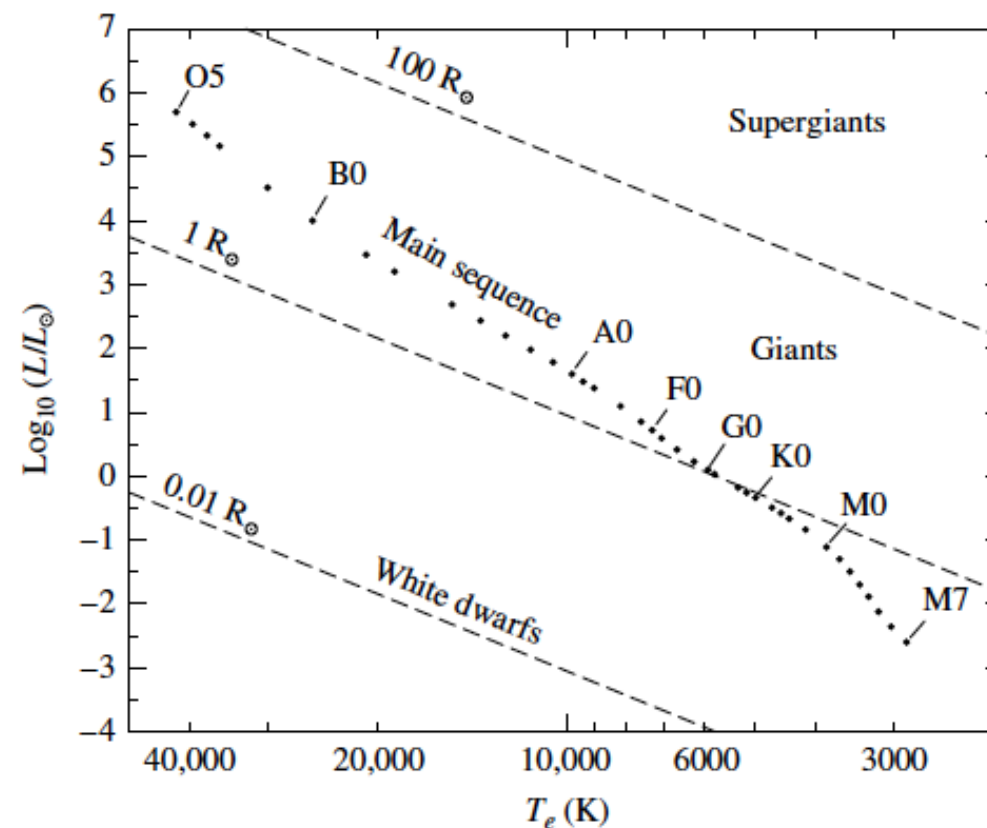
Basado en las propiedades promedio de las estrellas de la secuencia principal, este diagrama tiene una orientación **teórica**: la luminosidad y la temperatura efectiva se trazan para cada estrella, en lugar de las cantidades determinadas por observación de magnitud absoluta e índice de color o tipo espectral.



**FIGURE 14** The theorist's Hertzsprung–Russell diagram. The dashed lines indicate lines of constant radius.

- El Sol (G2) se encuentra en la secuencia principal, al igual que Vega (A0).
- Ambos ejes están en escala logarítmica para acomodar la gran amplitud de luminosidades estelares, que van desde aproximadamente  $5 \times 10^{-4} L_{\odot}$  hasta casi  $10^6 L_{\odot}$ .<sup>2</sup> En realidad, la secuencia principal no es una línea, sino que tiene un ancho finito debido a los cambios en la temperatura y luminosidad de una estrella que ocurren mientras está en la secuencia principal y a pequeñas diferencias en las composiciones de las estrellas.

- Las **estrellas gigantes** ocupan la región por encima de la secuencia principal inferior, con las supergigantes, como Betelgeuse, en la esquina superior derecha extrema. Las enanas blancas (que, a pesar de su nombre, a menudo no son blancas en absoluto) se encuentran muy por debajo de la secuencia principal.
- El **radio** de una estrella se puede determinar fácilmente desde su posición en el diagrama H-R. La ley Stefan-Boltzmann muestra que si dos estrellas tienen la misma temperatura superficial, pero una estrella es 100 veces más luminosa que la otra, entonces el radio de la estrella mas luminosa es  $\sqrt{100} = 10$  veces más grande.



**FIGURE 14** The theorist's Hertzsprung–Russell diagram. The dashed lines indicate lines of constant radius.

- En un diagrama H-R trazado logarítmicamente, las ubicaciones de las estrellas que tienen los mismos radios caen a lo largo de líneas diagonales que corren aproximadamente paralelas a la secuencia principal (las líneas de radio constante también se muestran en la figura 14).
- Las estrellas de la secuencia principal muestran algunas variaciones en sus tamaños, que van desde aproximadamente  $20 R_{\odot}$  en el extremo límite superior izquierdo de la secuencia principal hasta  $0.1 R_{\odot}$  en el extremo inferior derecho.
- Las estrellas gigantes caen entre aproximadamente  $10 R_{\odot}$  y  $100 R_{\odot}$ . Por ejemplo, Aldebaran ( $\alpha$  Tauri), el "ojo" reluciente de la constelación de Tauro (el Toro) es una estrella gigante naranja que es 45 veces más grande que el Sol.
- Las estrellas supergigantes son aún más grandes. Betelgeuse, una estrella variable pulsante, se contrae y se expande aproximadamente entre 700 y 1000 veces el radio del Sol con un período de aproximadamente 2070 días. Si Betelgeuse estuviera ubicado en la posición del Sol, su superficie a veces se extendería más allá de la órbita de Júpiter. La estrella  $\mu$  Cephei en la constelación de Cepheus (un rey de Etiopía) es aún más grande y se tragaría a Saturno.



- La existencia de una relación tan simple entre luminosidad y temperatura para estrellas de secuencia principal es una pista valiosa de que la posición de una estrella en la secuencia principal está gobernada por un solo factor.
- Este factor es la **masa** de la estrella. Se observa que las estrellas O más masivas enumeradas en esa tabla tienen masas de  $60 M_{\odot}$ , y el extremo inferior de la secuencia principal está delimitado por estrellas M que tienen al menos  $0,08 M_{\odot}$ .
- Se combinan los radios y las masas conocidas de las estrellas de la Secuencia principal y podemos calcular la densidad promedio de las estrellas.
- El resultado, quizás es sorprendente: en esa Secuencia principal las estrellas tienen aproximadamente la misma densidad que la densidad del agua.
- Avanzando en la secuencia principal, encontramos que las estrellas más grandes, masivas y de tipo temprano tienen una densidad promedio menor.

---

**Example 2.1.** The Sun, a G2 main-sequence star, has a mass of  $M_{\odot} = 1.9891 \times 10^{30}$  kg and a radius of  $R_{\odot} = 6.95508 \times 10^8$  m. Its average density is thus

$$\bar{\rho}_{\odot} = \frac{M_{\odot}}{\frac{4}{3}\pi R_{\odot}^3} = 1410 \text{ kg m}^{-3}.$$

Sirius, the brightest-appearing star in the sky, is classified as an A1 main sequence star with a mass of  $2.2 M_{\odot}$  and a radius of  $1.6 R_{\odot}$ . The average density of Sirius is

$$\bar{\rho} = \frac{2.2 M_{\odot}}{\frac{4}{3}\pi (1.6 R_{\odot})^3} = 760 \text{ kg m}^{-3} = 0.54 \bar{\rho}_{\odot},$$

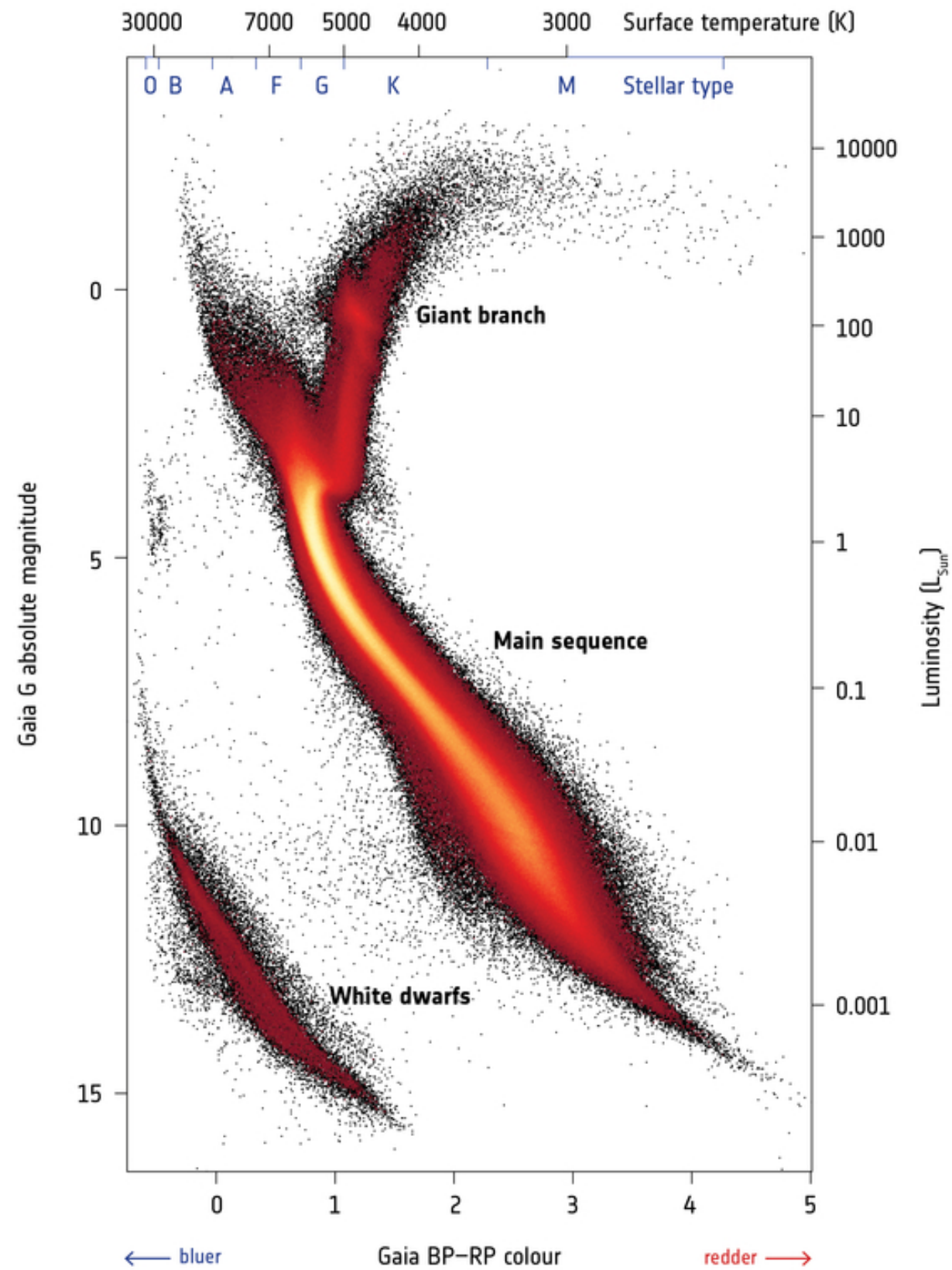
which is about 76 percent of the density of water. However, this is enormously dense compared to a giant or supergiant star. The mass of Betelgeuse is estimated to lie between 10 and  $15 M_{\odot}$ ; we will adopt  $10 M_{\odot}$  here. For illustration, if we take the maximum radius of this pulsating star to be about  $1000 R_{\odot}$ , then the average density of Betelgeuse (at maximum size) is roughly

$$\bar{\rho} = \frac{10 M_{\odot}}{\frac{4}{3}\pi (1000 R_{\odot})^3} = 10^{-8} \bar{\rho}_{\odot}!$$

Thus Betelgeuse is a tenuous, ghostly object—a hundred thousand times less dense than the air we breathe. It is difficult even to define what is meant by the “surface” of such a wraith-like star.

---

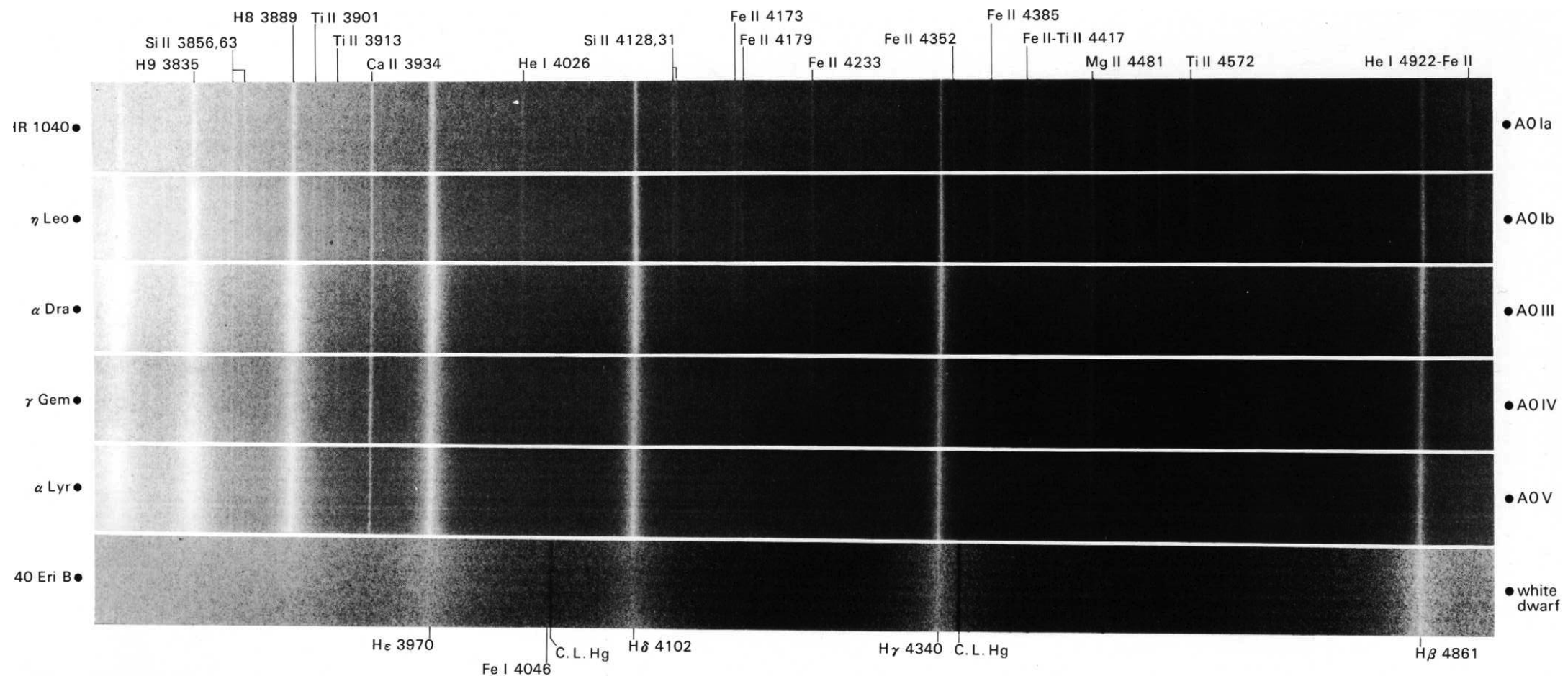
## → GAIA'S HERTZSPRUNG-RUSSELL DIAGRAM



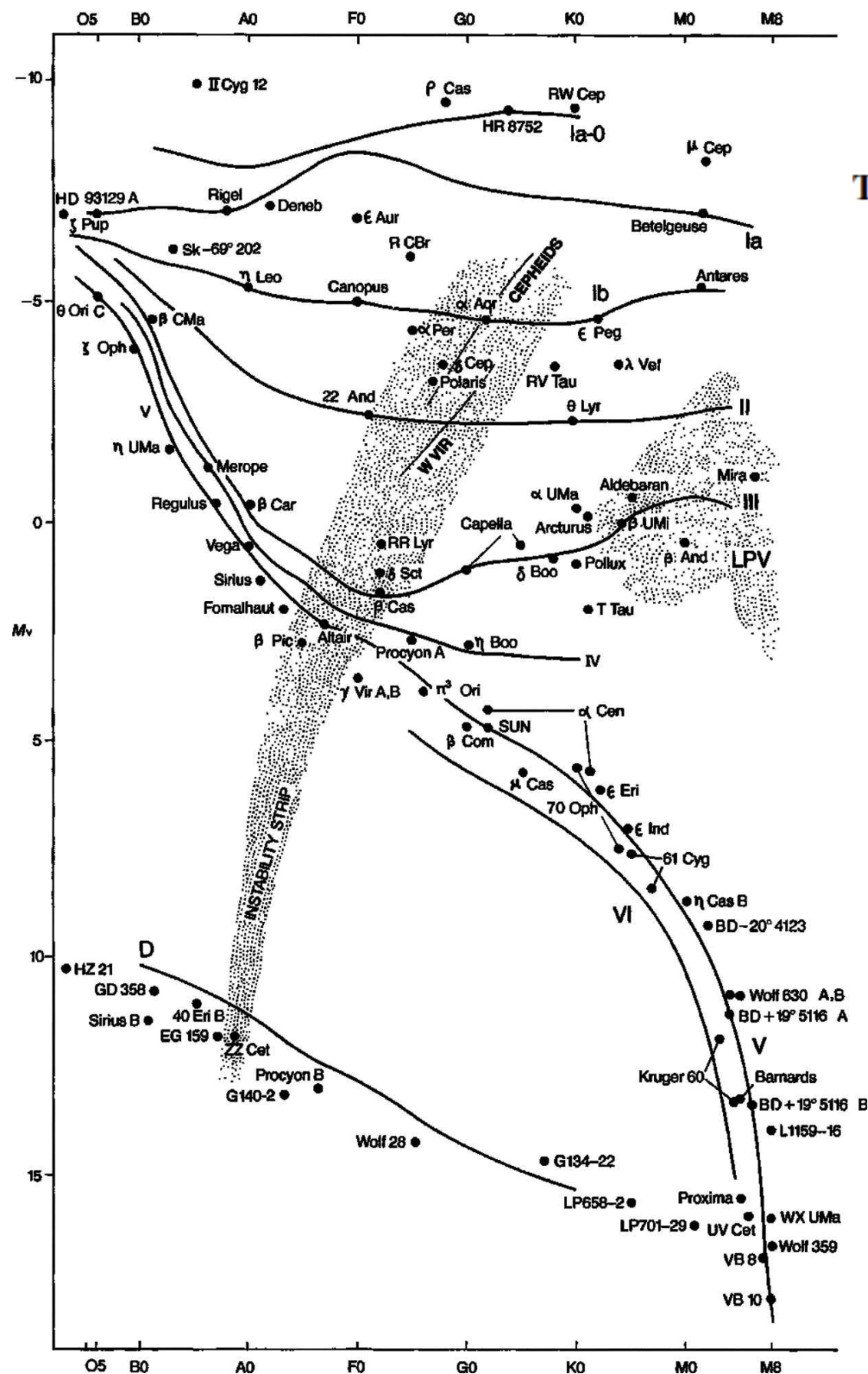


## Clases de luminosidad de Morgan-Keenan

Hertzsprung se preguntó si podría haber alguna diferencia en los espectros de las estrellas gigantes y de la secuencia principal del mismo tipo espectral (o la misma temperatura efectiva). Encontró tal variación en los espectros entre las estrellas catalogadas por Antonia Maury. En su esquema de clasificación, ella había notado variaciones en el ancho de línea a las que se refería como una característica c. Las diferencias sutiles en las fuerzas relativas de las líneas espectrales para estrellas de temperaturas efectivas similares y diferentes luminosidades se representan en la figura 15.



**FIGURE 15** A comparison of the strengths of the hydrogen Balmer lines in types A0 Ia, A0 Ib, A0 III, A0 IV, A0 V, and a white dwarf, showing the narrower lines found in supergiants. These spectra are displayed as negatives, so absorption lines appear bright. (Figure from Yamashita, Nariai, and Norimoto, *An Atlas of Representative Stellar Spectra*, University of Tokyo Press, Tokyo, 1978.)



**TABLE 3** Morgan–Keenan Luminosity Classes.

Class	Type of Star
Ia-O	Extreme, luminous supergiants
Ia	Luminous supergiants
Ib	Less luminous supergiants
II	Bright giants
III	Normal giants
IV	Subgiants
V	Main-sequence (dwarf) stars
VI, sd	Subdwarfs
D	White dwarfs

**FIGURE 16** Luminosity classes on the H–R diagram. (Figure from Kaler, *Stars and Stellar Spectra*, © Cambridge University Press 1989. Reprinted with the permission of Cambridge University Press.)