

# **Evolución estelar: Nacimiento, vida y muerte de las estrellas**

*John R. Percy*

*International Astronomical Union  
Universidad de Toronto, Canada*



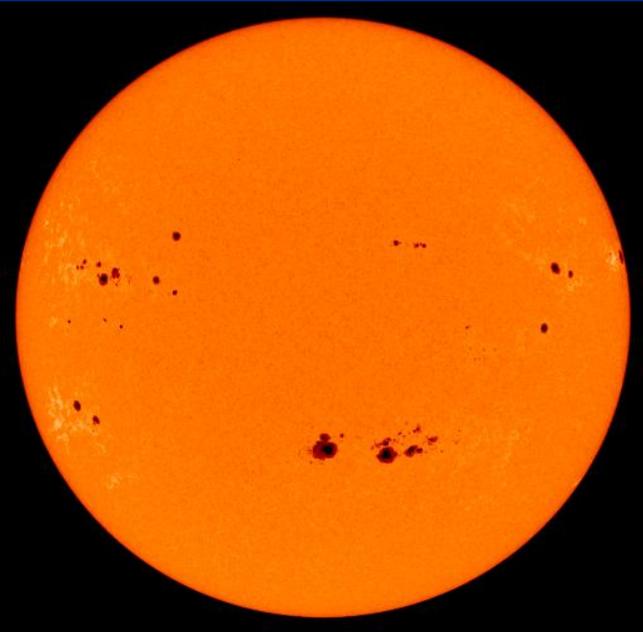
# Evolución de las estrellas



Nebulosa del Anillo, una estrella muriendo.  
Fuente: NASA

- Evolución estelar se refiere a los cambios que ocurren en las estrellas cuando consumen su *combustible*, desde su nacimiento y hasta su muerte.
- Entender la evolución de las estrellas ayuda a comprender:
  - \*la naturaleza y el destino del Sol.
  - \*el origen de nuestro Sistema Solar.
  - \*la relación entre el Sistema Solar y otros sistemas planetarios.
  - \*la posible existencia de vida en otro sitio del Universo.

# Propiedades del Sol: la estrella más cercana y cómo los astrónomos las determinan - importante!



El Sol.

Fuente: NASA SOHO Satellite

- Distancia:  $1,5 \times 10^{11}$  m, reflejando ondas de radar desde Mercurio y Venus
- Masa:  $2 \times 10^{30}$  kg, midiendo el movimiento de los planetas que orbitan alrededor del Sol
- Diámetro:  $1,4 \times 10^9$  m, a partir del diámetro aparente (angular) del Sol y su distancia
- Potencia:  $4 \times 10^{26}$  W, a partir de la distancia y la potencia medida desde la Tierra
- Composición química: 98% H y He, estudio su espectro.



# Propiedades de las estrellas – Soles distantes y cómo los astrónomos las determinan -- importante!



- **Distancia:** de la paralaje, o del brillo aparente, si la potencia es conocida
- **Potencia:** de la distancia y el brillo aparente
- **Temperatura de la superficie:** del color o al espectro
- **Radio:** la potencia y la temperatura de la superficie
- **Masa:** de las estrellas binarias
- **Composición química:** del espectro

Constelación de Orion.  
Fuente: Besser Museum

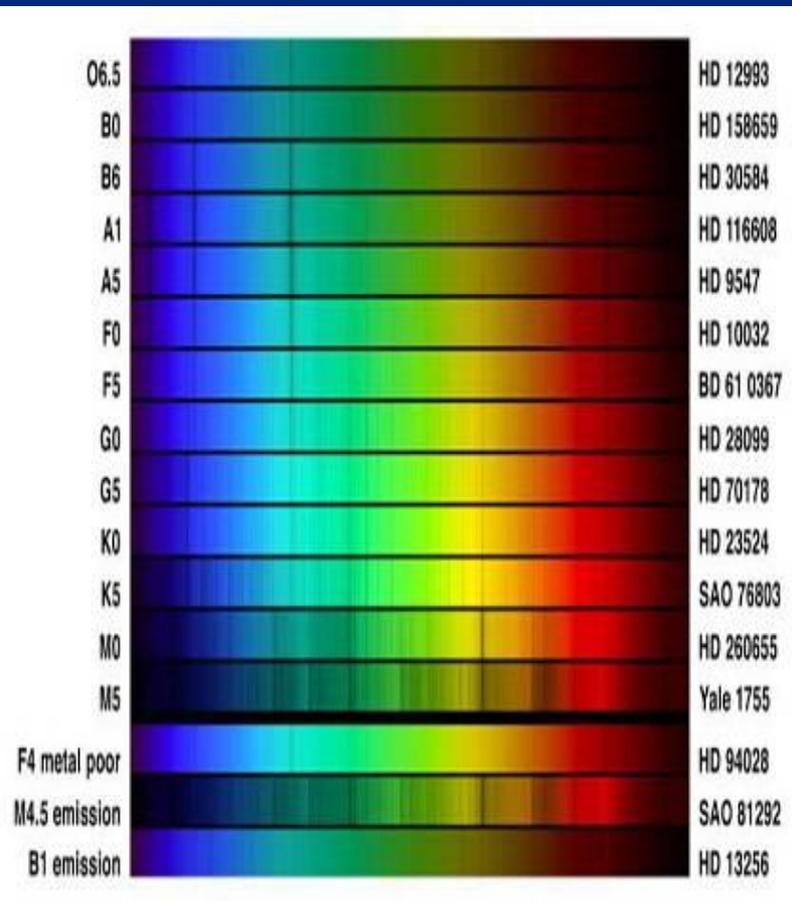


# Los espectros de las estrellas

## luz estelar, descompuesta en sus constituyentes

- Los astrónomos aprenden sobre objetos celestes gracias a la luz que emiten
- El espectro proporciona información sobre: **composición, temperatura, velocidades y otras cosas**

Izquierda: los 13 primeros espectros son de estrellas de diferentes temperaturas (las más altas las de arriba de todo); los 3 espectros de la parte inferior son de estrellas con propiedades anormales



Espectros estelares

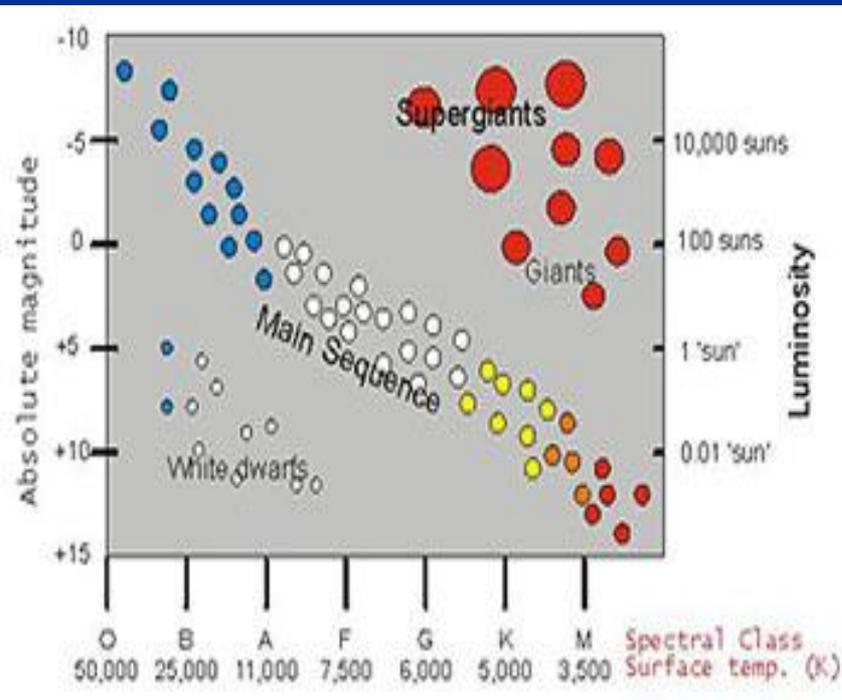
Fuente: US National Optical Astronomy Obs.



# El diagrama Hertzsprung-Russell

Hay orden en las propiedades de las estrellas!

- El diagrama HR dibuja la gráfica potencia (luminosidad) en función de la temperatura (tipo espectral) y la “magnitud absoluta” que es una medida logarítmica de la potencia



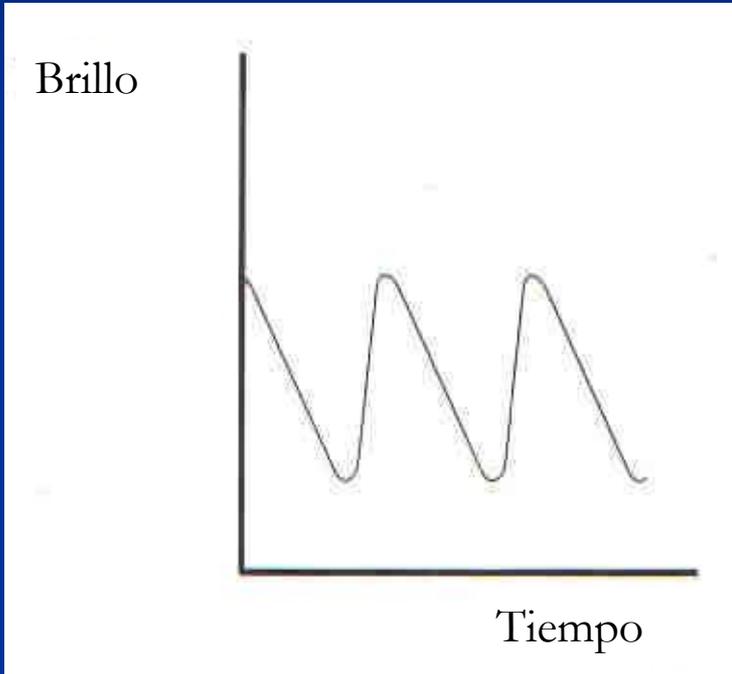
- La mayoría de las estrellas están en la secuencia principal: las estrellas masivas son estrellas calientes y tienen altas potencias (arriba-izquierda); las de masas pequeñas son frías y tienen potencias bajas (abajo a la derecha)
- Las estrellas gigantes se encuentran arriba a la derecha; y las estrellas enanas blancas abajo a la izquierda

Diagrama HR  
Fuente: NASA



# Estrellas variables

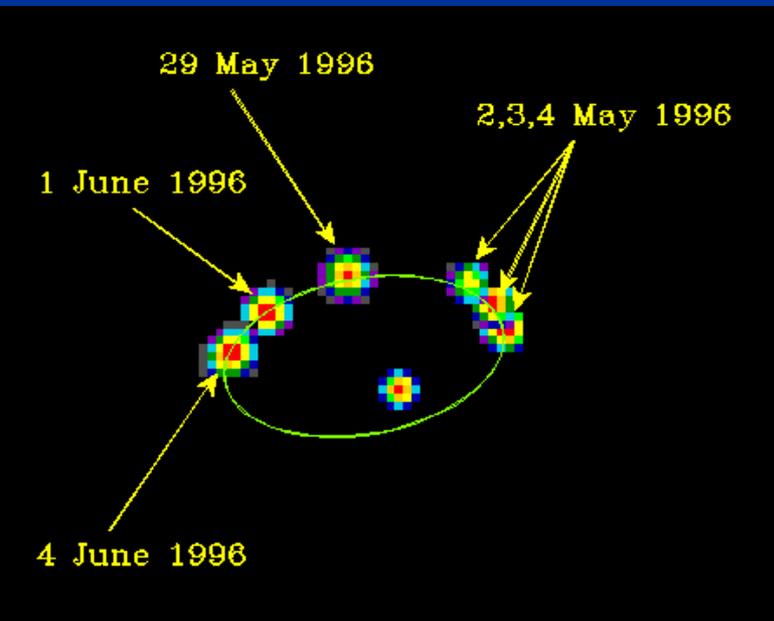
- Son estrellas que cambian su brillo
- La mayoría de las estrellas son variables; pueden variar porque vibran, fulguran, entran en erupción o explodian, o se eclipsan por una estrella compañera o planeta
- Las estrellas variables proporcionan información sobre la naturaleza y la evolución estelar.



Curva de luz: un gráfico del brillo vs. tiempo.

# Estrellas binarias (dobles) y múltiples

- Son pares de estrellas que están juntas debido a la gravedad, y orbitan alrededor de ellas mismas.
  - Pueden ser visibles directamente (figura izquierda), o detectarlas gracias a sus espectros, o a un eclipse de una estrella con otra
  - Son la herramienta más importante para medir masas estelares
  - Las estrellas múltiples son tres o más estrellas que están unidas entre sí por gravedad



Movimiento orbital de Mizar, en Osa Mayor.  
Fuente: NPOI Group, USNO, NRL

# Cúmulos de estrellas

## “Los experimentos de la naturaleza”



Cúmulo abierto de Las Pléyades.  
Fuente: Mount Wilson Observatory

- Son grupos de estrellas que están cercanas entre sí debido a la gravedad, y se mueven todas juntas a través del espacio.
- Se formaron en el mismo momento (comparten la edad) y lugar, del mismo material, y están a la misma distancia; sólo difieren en la masa.
- Los cúmulos son ejemplos de estrellas con diferentes masas pero con la misma edad



# De qué está hecho el Sol y las estrellas



**Proporciones de los elementos del Cosmos: alpiste H (90%), arroz He (8%), frijoles C, N, y O y trazas de todo lo demás (2%).**

- Usando espectroscopía y otras técnicas, se pueden identificar las “materias primas” con las que están hechas las estrellas
- Hidrógeno y Helio son los más abundantes. Fueron creados en el nacimiento de los elementos del universo
- Los elementos más pesados son millones o miles de millones de veces menos abundantes. Se crearon por reacciones nucleares en las estrellas



|          |          |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |           |            |           |            |            |          |
|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|------------|----------|
| 1<br>H   |          |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |           |            |           | 2<br>He    |            |          |
| 3<br>Li  | 4<br>Be  |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            | 5<br>B    | 6<br>C     | 7<br>N    | 8<br>O     | 9<br>F     | 10<br>Ne |
| 11<br>Na | 12<br>Mg |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            | 13<br>Al  | 14<br>Si   | 15<br>P   | 16<br>S    | 17<br>Cl   | 18<br>Ar |
| 19<br>K  | 20<br>Ca | 21<br>Sc | 22<br>Ti | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni  | 29<br>Cu  | 30<br>Zn  | 31<br>Ga  | 32<br>Ge   | 33<br>As  | 34<br>Se   | 35<br>Br  | 36<br>Kr   |            |          |
| 37<br>Rb | 38<br>Sr | 39<br>Y  | 40<br>Zr | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd  | 47<br>Ag  | 48<br>Cd  | 49<br>In  | 50<br>Sn   | 51<br>Sb  | 52<br>Te   | 53<br>I   | 54<br>Xe   |            |          |
| 55<br>Cs | 56<br>Ba |          |          | 72<br>Hf  | 73<br>Ta  | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os  | 77<br>Ir  | 78<br>Pt  | 79<br>Au  | 80<br>Hg  | 81<br>Tl   | 82<br>Pb  | 83<br>Bi   | 84<br>Po  | 85<br>At   | 86<br>Rn   |          |
| 87<br>Fr | 88<br>Ra |          |          | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt | 110<br>Ds | 111<br>Rg | 112<br>Cn | 113<br>Uut | 114<br>Fl | 115<br>UUp | 116<br>Lv | 117<br>Uus | 118<br>Uuo |          |
|          |          | 57<br>La | 58<br>Ce | 59<br>Pr  | 60<br>Nd  | 61<br>Pm  | 62<br>Sm  | 63<br>Eu  | 64<br>Gd  | 65<br>Tb  | 66<br>Dy  | 67<br>Ho  | 68<br>Er   | 69<br>Tm  | 70<br>Yb   | 71<br>Lu  |            |            |          |
|          |          | 89<br>Ac | 90<br>Th | 91<br>Pa  | 92<br>U   | 93<br>Np  | 94<br>Pu  | 95<br>Am  | 96<br>Cm  | 97<br>Bk  | 98<br>Cf  | 99<br>Es  | 100<br>Fm  | 101<br>Md | 102<br>No  | 103<br>Lr |            |            |          |



Elementos creados en los primeros minutos despues del Big Bang



Elementos producidos por nucleosintesis dentro de las estrellas



Elementos producidos en las supernovas

# Las leyes de la estructura de las estrellas

- En el interior de las estrellas la presión aumenta por el peso de las capas superiores.
- Según las leyes de los gases, la temperatura y la densidad aumentará a medida que se incremente la presión.
- La energía fluirá desde la parte más caliente del interior hasta la parte más fría del exterior, por radiación (fotones), convección (burbujas) o conducción (iones y electrones).
- Si la energía fluye hacia afuera de la estrella, ésta se enfriará – a menos que se cree energía en su interior.
- *Las estrellas están gobernadas por estas leyes sin y universales de la física*



# Ejemplo: ¿Por qué no se colapsa o contrae el Sol?



- Infla un globo como el de la izquierda.
- El globo está “empujando” hacia adentro por la presión atmosférica. No se encoge pues la presión del gas está “empujando” hacia afuera.
- En el Sol la gravedad (que empuja hacia adentro, se compensa con la presión de la radiación.

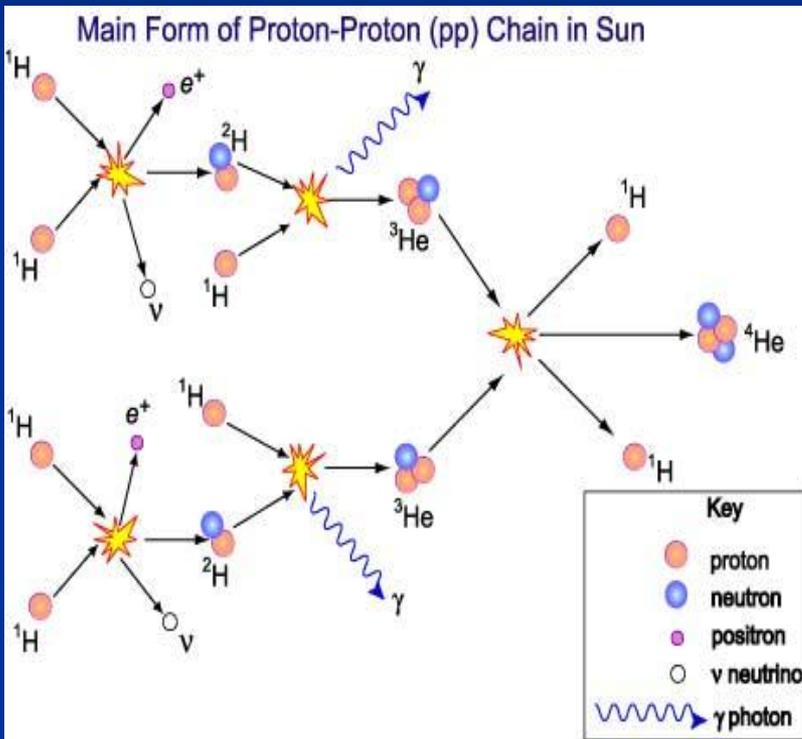
# La fuente de energía para el Sol y las estrellas

- ¿Combustión química de gas, petróleo o carbón?  
Proceso es tan ineficiente que aportaría energía al Sol sólo durante pocos miles de años
- ¿Lenta contracción gravitatoria?  
Podría aportar energía al Sol durante cien millones de años, pero el Sol tiene miles de millones de años de antigüedad.
- ¿Radiactividad (fisión nuclear)?  
Los isótopos radiactivos son casi inexistentes en el Sol y en las estrellas.
- ¿Fusión nuclear de elementos ligeros en otros más pesados?  
**Sí! Este es un proceso muy eficiente, y los elementos ligeros como el hidrógeno y el helio representan el 98% del Sol y de las estrellas**



# La cadena Proton-Proton

## el principal proceso de fusión en el Sol



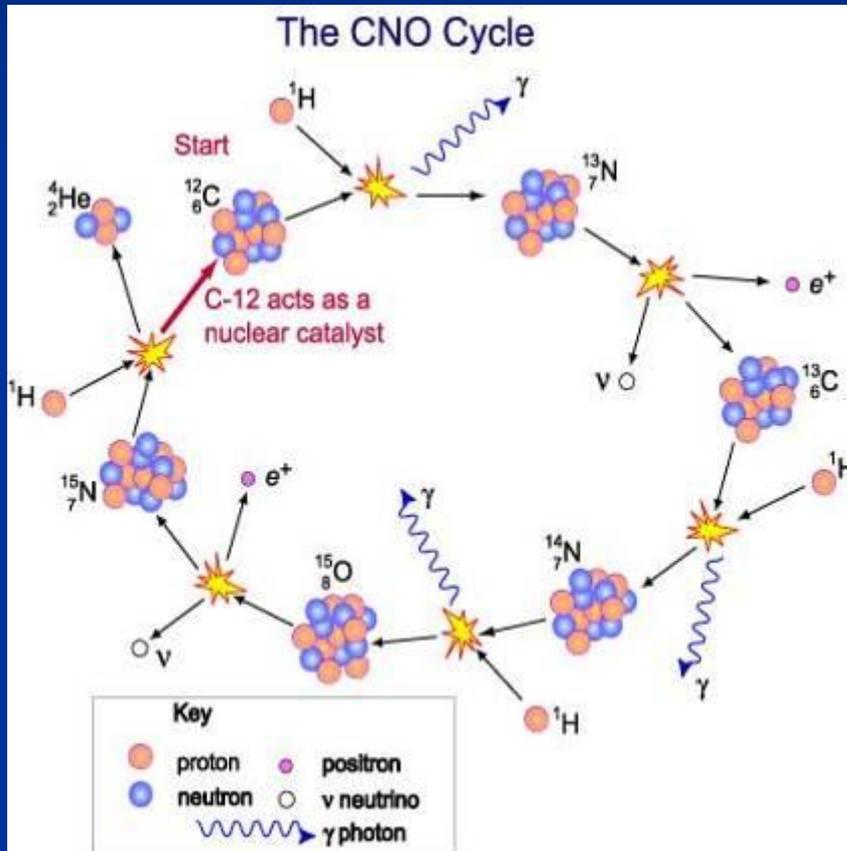
Ciclo protón-protón

Fuente: Australia National Telescope Facility

- A alta temperatura y densidad, en estrellas como el Sol los protones (en rojo) superan la repulsión electrostática entre ellos, y se compenentran para formar  $^2\text{H}$  (deuterio), y un neutrino ( $\nu$ ).
- Más tarde, otro protón se junta con el deuterio para formar  $^3\text{He}$ .
- Después, el núcleo de  $^3\text{He}$  suma otro protón para formar helio.
- Resultado: 4 protones se juntan para formar helio, energía – rayos gamma y energía cinética.



# El ciclo Carbono-Nitrógeno-Oxígeno



Ciclo CNO

Fuente: Australia National Telescope Facility

- En *estrellas masivas*, con núcleos muy calientes, los protones (rojos) se juntarán con el núcleo de  $^{12}\text{C}$  (carbono) (arriba a la izquierda).
- Empieza una secuencia circular de reacciones en las cuales cuatro protones se funden para formar un núcleo de Helio (arriba a la izquierda).
- Un núcleo de  $^{12}\text{C}$  se recupera, por lo tanto el  $^{12}\text{C}$  ni se crea ni se destruye; actúa como un catalizador nuclear.



# Haciendo “modelos” estelares

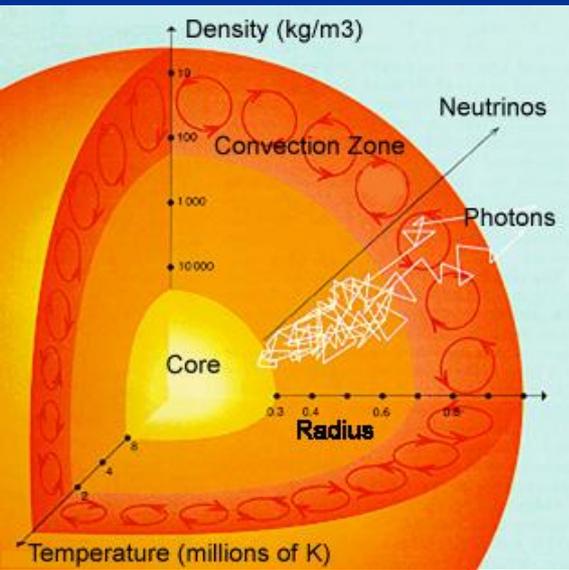
- Las leyes de la estructura de las estrellas son expresadas en ecuaciones, y se resuelven mediante **modelos informáticos**.
- El ordenador calcula la temperatura, la densidad, la presión, y la potencia en cada punto del Sol o de la estrella.
- Así se sabe que en el centro del Sol la densidad es 150 veces la del agua y la temperatura es de 15.000.000 K!



# En el interior del Sol

Basado en un “modelo” del Sol hecho con ordenador

- En el caliente núcleo, las reacciones nucleares producen energía fusionando H y transformándolo en He.
- En la zona radiactiva, por encima del núcleo, la energía fluye hacia afuera mediante el mecanismo de radiación.
- En la zona convectiva, entre la zona radiactiva y la superficie, la energía fluye hacia afuera por convección.
- La fotosfera, en la superficie, es la capa donde la estrella se hace transparente.



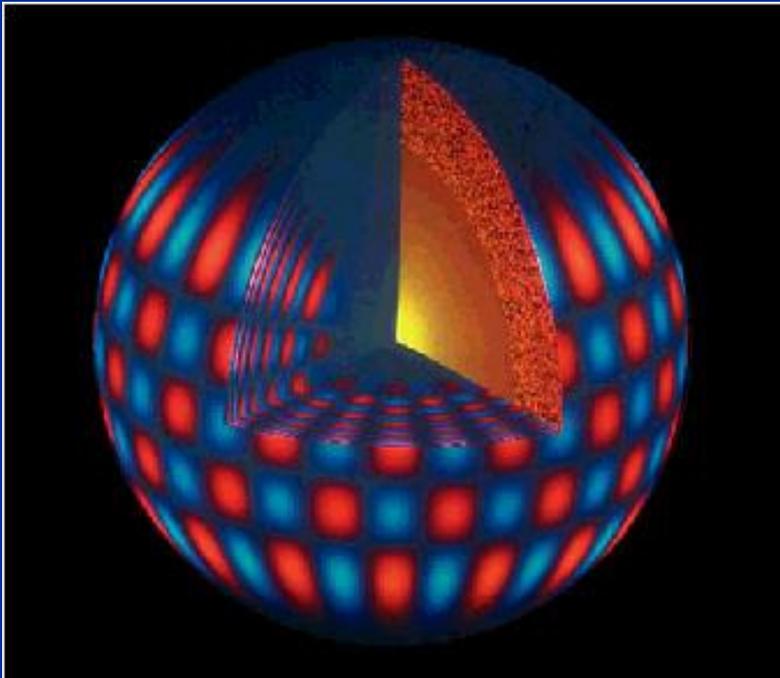
Modelo solar

Fuente: Institute of Theoretical Physics, University of Oslo



# Probando el Modelo: Heliosismología

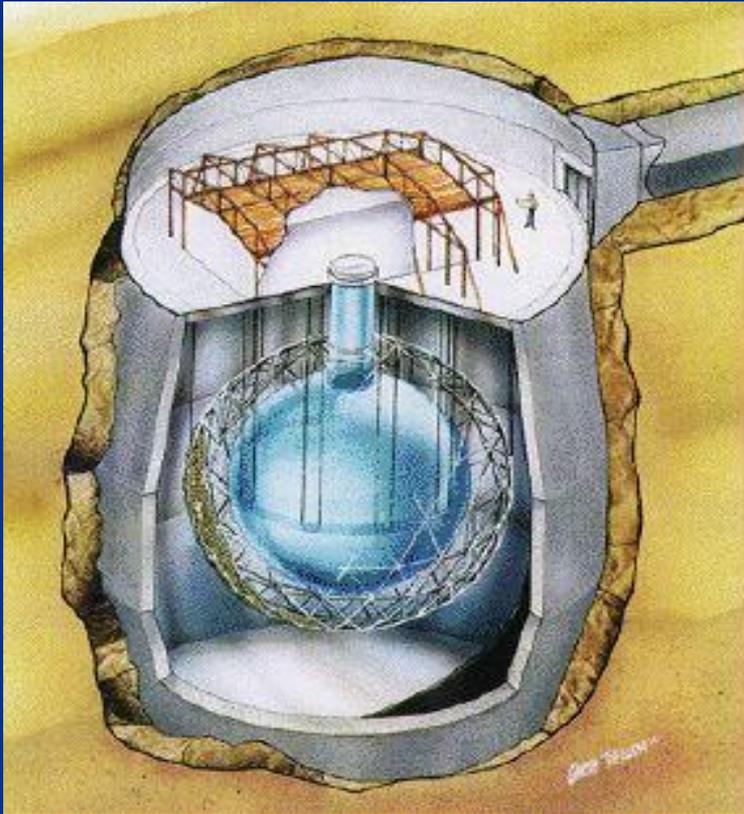
- El Sol vibra suavemente en miles de modos (patrones). (Uno se muestra en la figura de la izquierda)
- Pueden ser observados; este dato se utiliza para deducir la estructura interna del sol, y con ello revisar los modelos. El proceso se denomina heliosismología.
- Vibraciones similares pueden ser observadas en otras estrellas: astrosismología.



Concepción artística de la vibración solar.  
Fuente: US National Optical Astronomy  
Observatory



# Probando el modelo: Neutrinos solares



Observatorio de neutrinos, Sudbury  
Fuente: Sudbury Neutrino Observatory

- Las reacciones de la fusión nuclear producen partículas elementales llamadas neutrinos.
- Apenas tienen masa, y casi nunca interactúan con la materia.
- Se los ha detectado y medido gracias a los observatorios especiales, como el Observatorio de Neutrinos de Sudbury (izquierda). Los resultados concuerdan con las predicciones de los modelos.



# La duración de la vida de las estrellas

- La duración de la vida de una estrella depende de cuánto combustible nuclear tenga (masa), y cómo de rápido lo consume (potencia).
  - Las estrellas menos masivas que el Sol son las más comunes. Tienen menos combustible, pero potencias mucho menores, por lo tanto tienen vidas más largas.
  - Las estrellas más masivas que el Sol son muy poco comunes. Tienen más combustible, pero potencias mucho más altas, por lo tanto vidas más cortas.



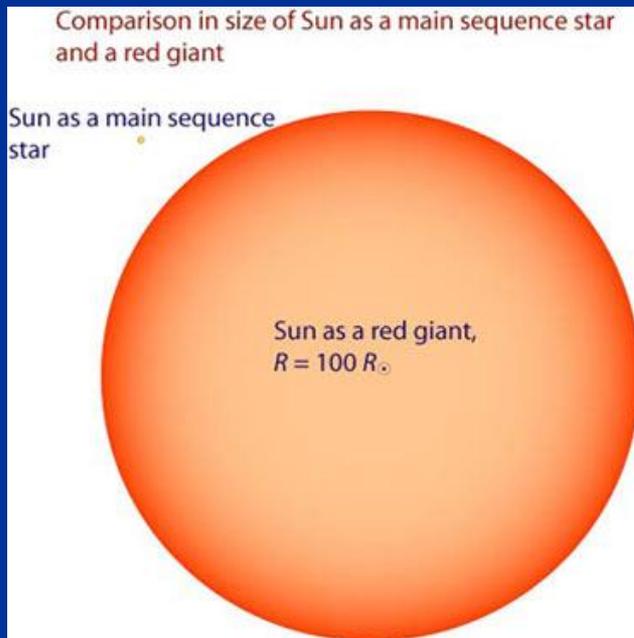
# Cómo aprenden los astrónomos sobre la evolución de las estrellas

- Observando las estrellas en varias etapas de sus vidas, y poniéndolas en una secuencia de evolución lógica.
- Haciendo modelos, usando las leyes de la física, y la contabilidad de los cambios en la composición de las estrellas que se producen a causa de la fusión nuclear.
- Mediante el estudio de cúmulos de estrellas - grupos de estrellas con masas diferentes, pero con la misma edad.
- Observando las fases rápidas y extrañas de la evolución estelar como las supernovas.
- Estudiando estrellas pulsantes variables, midiendo los cambios lentos en el período de pulsación debidos a la evolución.



# La evolución de una estrella como el Sol

- Una estrella como el Sol, no cambia durante el 90% de su vida, mientras utiliza su combustible: H. Es una estrella de secuencia principal.



- Cuando su combustible se agota, se expande transformándose en una estrella gigante roja.
- El núcleo se calienta lo suficiente para que rápidamente se pueda producir energía mediante la fusión de helio en carbono.
- Cuando su combustible de He se agote, de nuevo se hincha en una estrella roja gigante mayor, cien veces más grande que el Sol.

Comparacion tamaños:Sol-gigante roja  
Fuente:  
Australia National Telescope Facility



# La muerte de una estrellas como el Sol



Nebulosa Planetaria Helix.  
Fuente: NASA

- Cuando la estrella se convierte en una gigante roja, comienza a pulsar (vibración). Se le llama una estrella Mira.
- La pulsación provoca la separación de las capas externas de la estrella, produciendo una hermosa nebulosa planetaria.
- El núcleo de la estrella es una enana densa, blanca y pequeña, sin combustible.

# Enanas blancas

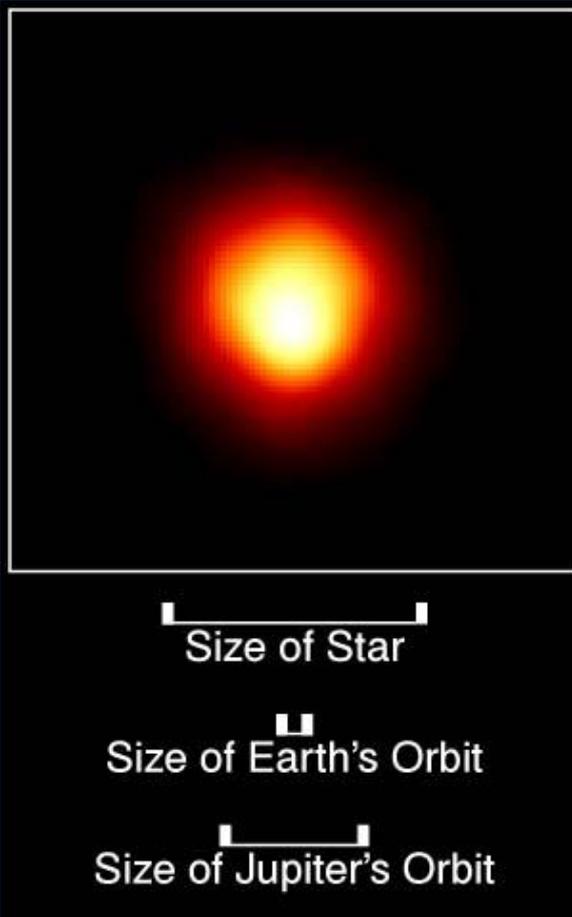
- Una enana blanca es el núcleo muerto de una estrella como el Sol.
- Tiene una masa similar a la del Sol, un volumen similar al de la Tierra, y una densidad un millón de veces mayor que la del agua.
- La fuerza centrípeta de la gravedad es equilibrada por la presión externa cuántica de los electrones dentro de ella.
- Muchas estrellas cercanas, p.e. Sirio (izquierda), tienen como compañeras enanas blancas.



La enana blanca compañera de Sirio (abajo). Fuente: NASA



# La evolución de una estrella masiva



- Las estrellas masivas son poco comunes, consumen su combustible muy rápidamente, en pocos millones de años.
- A medida que gastan su combustible, se hinchan y pasan a ser estrellas rojas supergigantes.
- Sus núcleos son muy calientes, lo suficiente para fundir elementos tan pesados como el hierro.
- Betelgeuse (izquierda), en Orión, es una supergigante roja brillante. Es más grande que la órbita de la Tierra.

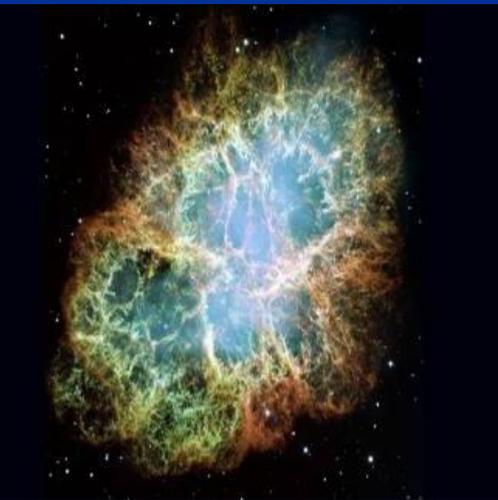
Betelgeuse.

Fuente: NASA/ESA/HST



# La muerte de una estrella masiva

- Cuando el núcleo de una estrella masiva desintegra el hierro, no tiene más combustible nuclear y ya no puede conservar la temperatura.
  - La gravedad aplasta el núcleo en una estrella de neutrones, liberando enormes cantidades de energía gravitacional, y llevando a la estrella a una explosión de supernova (izquierda).
  - Las supernovas producen los elementos químicos más pesados que el hierro (como el oro y la plata), expulsan estos elementos al espacio, donde se convierten en parte de nuevas estrellas, planetas y vida.



La nebulosa Cangrejo, el remanente de una explosión de supernova Observada en 1054 AD.  
Fuente: NASA



# Estrellas de neutrones



Pulsar, estrella de neutrones en el corazón de la Nebulosa del Cangrejo. La energía de rotación que emite energiza la nebulosa.

Fuente: NASA/ESA/HST

- Los núcleos estelares con masas de entre aproximadamente 1,5 y 3 veces la masa del Sol colapsan para convertirse en estrellas de neutrones en el final de la vida.
- Tienen diámetros de unos 10 km y densidades trillones de veces más grandes que la del agua.
- Están hechas de neutrones y partículas exóticas.
- Las jóvenes estrellas de neutrones giran rápidamente y emiten pulsos regulares de radiación de radio, las llama púlsares.



# Agujeros negros

- Un agujero negro es un objeto astronómico cuya gravedad es tan fuerte que nada puede escapar de él, ni siquiera la luz.
- Los núcleos de las poco comunes estrellas masivas (más de 30 veces la masa del Sol) se vuelven agujeros negros cuando se les agota el combustible.
- Los agujeros negros pueden ser detectados y “pesados” si una estrella visible está orbitando alrededor de ellos (izquierdo



Concepción artística de Cygnus X-1, una estrella visible (izquierda) con un agujero negro (derecha) en un disco de acreción.  
Fuente: NASA.



# Estrellas variables cataclísmicas



- Muchos cadáveres estelares-enanas blancas, estrellas de neutrones o agujeros negros-tienen una estrella visible normal orbitando a su alrededor.
- Si el gas de la estrella normal cae hacia el cadáver estelar, se forma un disco de acreción que lo rodea (izquierda).
- Cuando el gas cae sobre el cadáver estelar, puede estallar, entrar en erupción, o explotar, esta es una estrella variable cataclísmica.

Una estrella variable cataclísmica con una estrella normal (izquierda) y una enana blanca (derecha) en un disco de acreción. Fuente: NASA



# El nacimiento de las estrellas

- Las estrellas se forman en nebulosas, nubes de gas y polvo.
- El gas y polvo interestelar constituye alrededor del 10% de la materia en nuestra galaxia.
- Las estrellas más jóvenes se encuentran generalmente en o cerca de la nebulosa de la que nacieron.
- El más cercano y claro ejemplo de una “guardería estelar” es la Nebulosa de Orión (izquierda), a unos 1500 años luz de distancia.



La nebulosa de Orión.  
Fuente: NASA



# Gas interestelar



La nebulosa de Orión. El gas es energizado por luz ultravioleta de las estrellas en la nebulosa. Fuente: NASA

- El gas interestelar (átomos o moléculas) puede ser activado por la luz ultravioleta de una estrella caliente cercana, produciendo una nebulosa de emisión (izquierda).
- El gas frío, entre las estrellas, produce ondas de radio que pueden ser detectados por los telescopios de radio.
- El 98% del gas interestelar es hidrógeno y helio.

# Polvo interestelar

- El polvo interestelar cerca de estrellas brillantes puede ser detectado en la región del visible.
- El polvo puede bloquear la luz de las estrellas y el gas detrás de ellas (izquierda). Las estrellas se forman en estas nubes.
- Sólo el 1% de la materia entre las estrellas es polvo. Las partículas de polvo son unos pocos cientos de nanómetros de tamaño, y son en su mayoría silicatos o grafito.

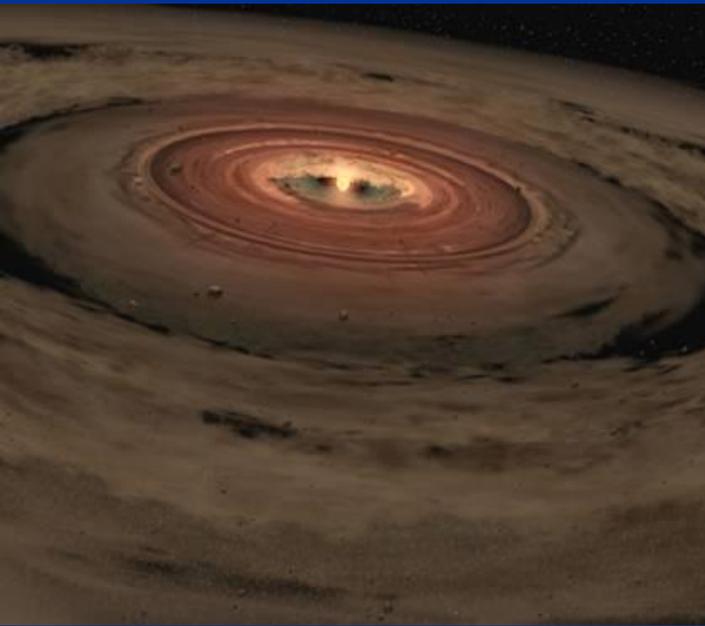


M16, Nebulosa del Aguila  
Fuente: NASA/ESA/HST



# Formación de estrellas

- Las estrellas se forman a partir de partes de nebulosas llamadas núcleos, que son densas o comprimidas.
- La gravedad hace contraer a los núcleos.
- La conservación del momento angular hace aumentar el giro de los núcleos, que se aplanan hasta transformarse en discos.
- Las estrellas se forman en los centros de los discos. Los planetas se forman en las partes exteriores más frías, del disco.



Concepción artística de una sistema Planetario en el proceso de formación.  
Fuente: NASA



# Discos protoplanetarios: Proplyds

Los sistemas planetarios en el proceso de formación



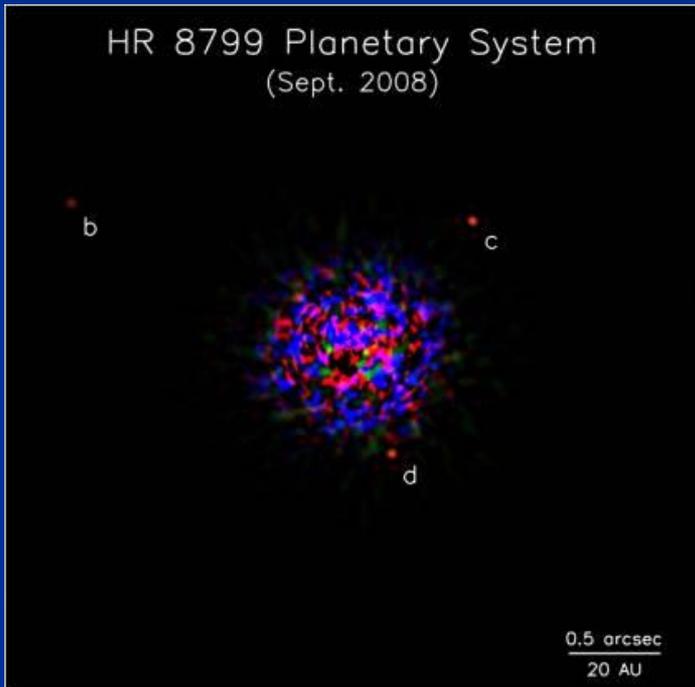
Proplyds en la Nebulosa de Orión  
Fuente: NASA/ESA/HST

- Los discos protoplanetarios han sido observados en la Nebulosa de Orión (izquierda).
- La estrella apenas puede ser visible en el centro del disco.
- Los discos de polvo bloquean la luz que está detrás.
- Estas y otras observaciones proporcionan una evidencia directa de la formación de sistemas planetarios.



# Exoplanetas = Planetas extrasolares

## Planetas alrededor de otras estrellas



Sistema exoplanetario HR 8799  
Fuente: C. Marois et al., NRC Canada

- Los exoplanetas normalmente son descubiertos y estudiados por su efecto gravitatorio sobre su estrella, o por el ligero oscurecimiento de esta si pasan por delante de ella (tránsito).
- Muy pocos han sido captados directamente (izquierda).
- A diferencia de los planetas de nuestro Sistema Solar, muchos exoplanetas son enormes y muy cercanos a su estrella. Esto exige que los astrónomos modifiquen sus teorías de cómo se forman los sistemas planetarios.



# Consideraciones finales

- “La gravedad impulsa la formación, la vida y la muerte de las estrellas” [Professor R.L. Bishop]
- El nacimiento de una estrella explica el origen de nuestro Sistema Solar, y otros sistemas planetarios.
- La vida de las estrellas explica la fuente de energía que hace posible la vida en la Tierra.
- La vida y la muerte de las estrellas producen elementos químicos, más pesados que el hidrógeno, de los cuales están hechas las estrellas, los planetas y la vida.
- En la muerte de una estrella, la gravedad produce algunos de los objetos más extraños del Universo: enanas blancas, estrellas de neutrones y agujeros negros.



¡Muchas Gracias  
por su atención!

