

## LA ESTRUCTURA DEL SOL

Tabaré Gallardo, Dpto. Astronomía, IFFC

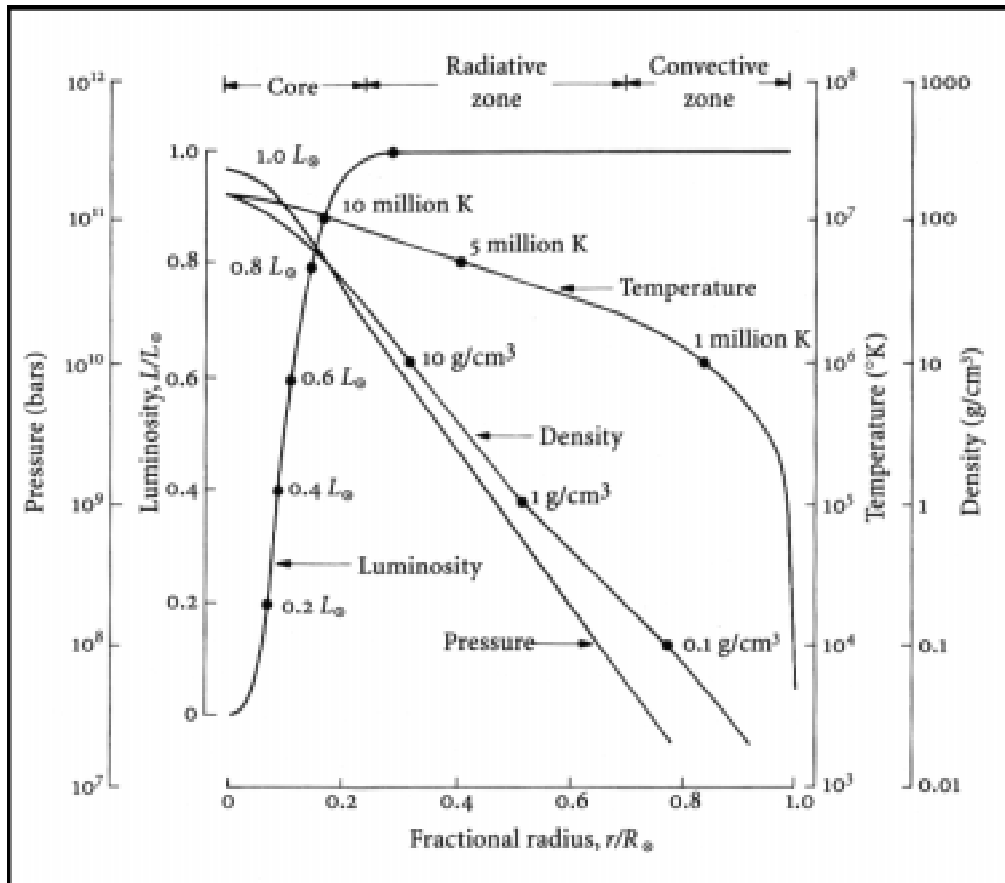
El Sol es una estrella de la secuencia principal, una de las 100.000 millones de estrellas que conforman nuestra galaxia. En la actualidad se encuentra próximo al brazo espiral Sagitario-Carina. La trayectoria orbital del Sol en la galaxia no es planar sino ondulante cruzando el plano de la galaxia cada 30 millones de años y completando una vuelta en torno del centro en 250 millones de años. El Sol es una esfera de gas casi perfecta (apenas achatado en los polos debido a su movimiento de rotación) que se mantiene unida por su propia gravedad.

Si bien el Sol presenta una rotación y campos magnéticos variables en principio podemos despreciarlos para obtener una descripción aproximada de su interior. Calcular un modelo para el Sol significa obtener la temperatura, densidad, presión y composición química en función de la distancia al centro. Para esto partimos de una serie de leyes físicas que sabemos se cumplen en la naturaleza y ciertas condiciones de borde como por ejemplo la temperatura superficial. Las ecuaciones se resuelven en forma numérica obteniendo gráficos que representan las variables antes mencionadas en función de la distancia al centro.

Stellar theory <sup>a</sup>			
Conservation of mass	$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi\rho r^2$	(9.60)	<i>r</i> radial distance <i>M<sub>r</sub></i> mass interior to <i>r</i> <i>ρ</i> mass density
Hydrostatic equilibrium	$\frac{dp}{dr} = \frac{-G\rho M_r}{r^2}$	(9.61)	<i>p</i> pressure <i>G</i> constant of gravitation
Energy release	$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi\rho r^2\epsilon$	(9.62)	<i>L<sub>r</sub></i> luminosity interior to <i>r</i> <i>ε</i> power generated per unit mass
Radiative transport	$\frac{dT}{dr} = \frac{-3}{16\sigma} \frac{(\kappa)\rho}{T^3} \frac{L_r}{4\pi r^2}$	(9.63)	<i>T</i> temperature <i>σ</i> Stefan-Boltzmann constant <i>(κ)</i> mean opacity
Convective transport	$\frac{dT}{dr} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{T}{p} \frac{dp}{dr}$	(9.64)	<i>γ</i> ratio of heat capacities, <i>c<sub>p</sub></i> / <i>c<sub>v</sub></i>

<sup>a</sup>For stars in static equilibrium with adiabatic convection. Note that *p* is a function of *r*, *κ* and *ε* are functions of temperature and composition.

Los rayos gamma producidos en las reacciones nucleares en el núcleo del Sol se dispersan, absorben o son reemitidos por electrones libres, iones y átomos en su camino hacia la superficie. Un rayo gamma típico sufre 10<sup>26</sup> absorciones y reemisiones hasta salir a la superficie lo cual le lleva típicamente cientos de miles de años. La **opacidad** es una medida de la eficiencia con que la materia inhibe el pasaje de los fotones a través del interior solar. Su valor depende de los varios procesos que pueden actuar simultáneamente: transiciones electrónicas, ionización, dispersión por electrones, iones y átomos. La estructura del Sol depende sensiblemente de la opacidad, si esta cambia todos los parámetros del Sol deberán ajustarse de tal manera que toda la energía generada llegue a la superficie y no quede bloqueada en algún punto interior al Sol.



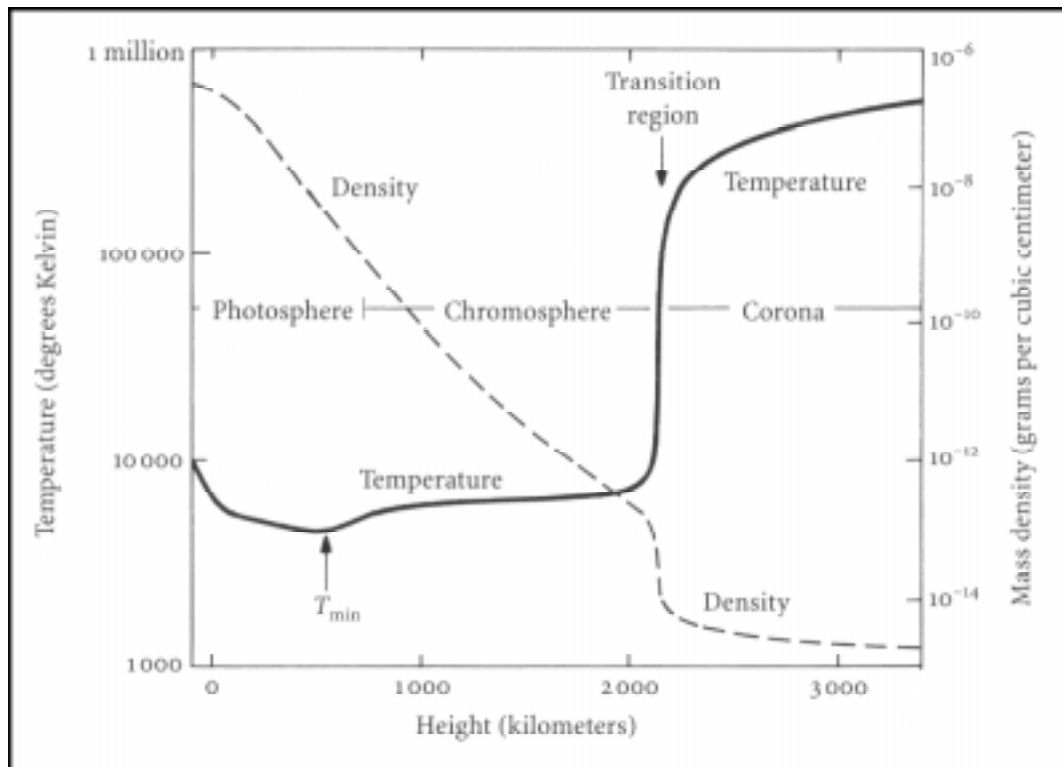
La energía que se genera en el interior del Sol debe ser transportada hacia el exterior. Existen tres mecanismos para esto: transporte **radiativo** es decir a través de fotones, transporte **convectivo** es decir por movimiento de gases y transporte por **conducción** es decir colisiones entre las partículas resultando una transferencia de energía entre partículas en contacto. Este último mecanismo no es relevante en el Sol. Como resultado el Sol presenta **zonas radiativas** y **zonas convectivas**.

El **núcleo** del sol es un reactor de fusión estabilizado gravitacionalmente. La materia se encuentra casi completamente ionizada debido a las altas temperaturas. Es una esfera con un radio igual a la quinta parte que el solar. En el núcleo en cada segundo 5 millones de toneladas de masa son transformadas en energía.

La **zona radiativa** llega hasta la mitad del radio solar, la energía se transporta por la difusión de los fotones en un medio altamente ionizado.

Por encima de la zona radiativa la temperatura desciende lo suficiente como para que existan átomos parcialmente ionizados y neutros lo cual amplía las posibilidades de la materia de absorber fotones

aumentando notoriamente la opacidad del medio. La alta opacidad hace difícil la continuación de la radiación de los fotones hacia el exterior y esto provoca una caída rápida de la temperatura con la distancia al centro lo cual a su vez provoca que se instale a partir de allí un **regimen convectivo**. Las capas exteriores del sol se encuentran en equilibrio convectivo y es allí donde se generan los fenómenos propios de la actividad solar. La **atmósfera solar** que sigue a la zona convectiva se divide en 3 capas: **fotosfera**, **cromosfera** y **corona**.



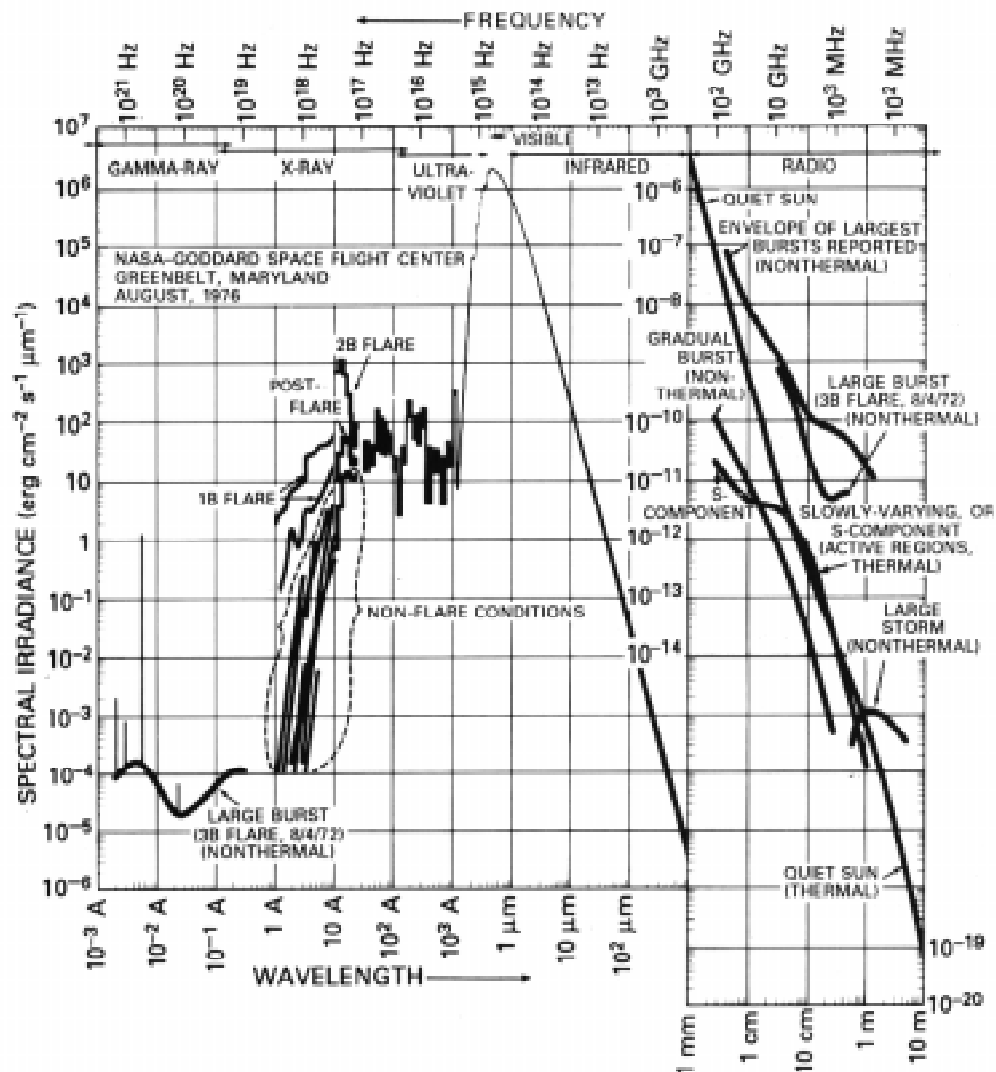
La **fotosfera** tiene un espesor de 500 kms y su límite exterior es el límite del globo solar visible. Casi todos los fotones que recibimos salen de la fotosfera. El gas que la compone se encuentra en equilibrio térmico con la radiación que la atraviesa por lo cual pueden ser aplicables las leyes de radiación de cuerpo negro.

La **cromosfera** es una región de transición que se extiende 2000 kms por encima de la fotosfera. Es más caliente que la fotosfera (10000 K) debido al efecto de ondas hidromagnéticas y de compresión vinculadas a los espículos y granulos. La emisión de energía es fundamentalmente en la línea H alfa.

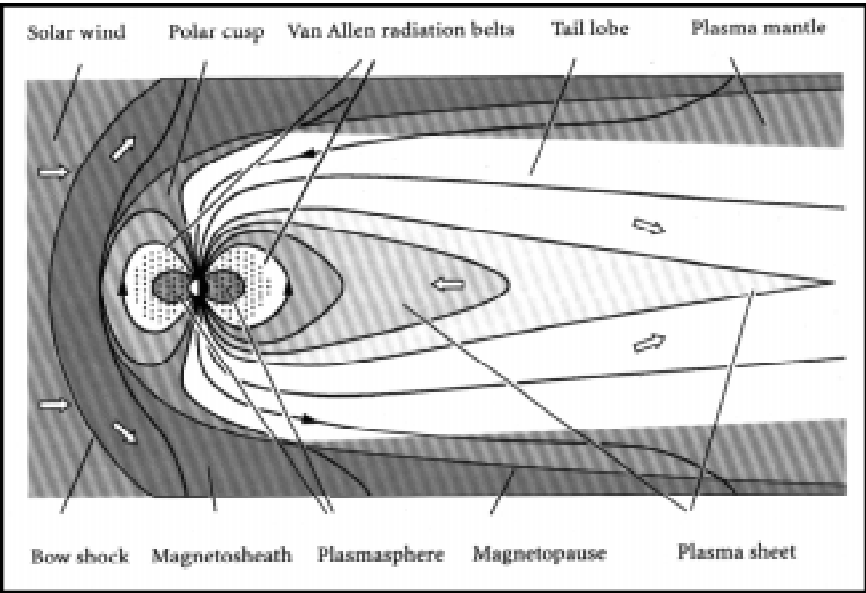
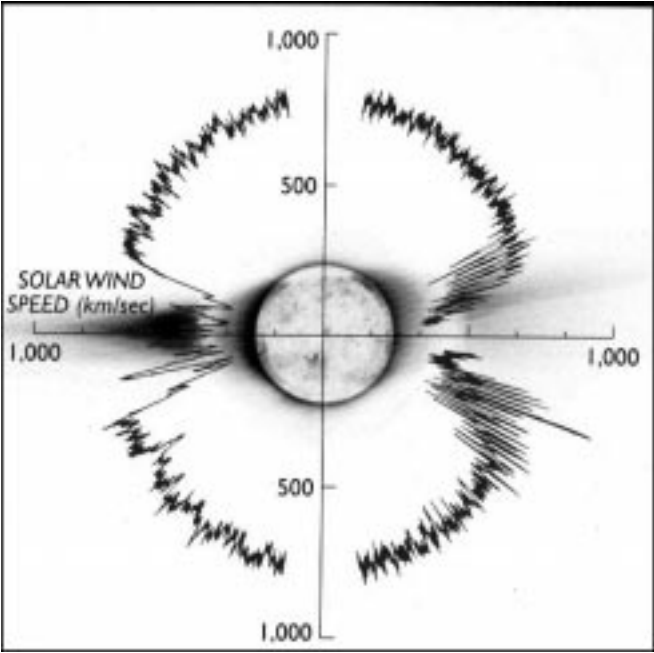
La **corona** consiste de plasma muy caliente (2 millones de grados, no está en equilibrio térmico con la radiación que corresponde a 5800 K) fluyendo gradualmente hacia el medio interplanetario en forma de **viento solar**. La energía de la corona proviene de la disipación de energía mecánica desde la zona convectiva y de la disipación de la energía magnética por reconexión de líneas de campo. La radiación de rayos X solar observada es originada en la corona.

## The solar spectrum

The solar spectral irradiance from radio waves to gamma-rays.  
(Courtesy H. Malitson and the National Space Science Data Center.)

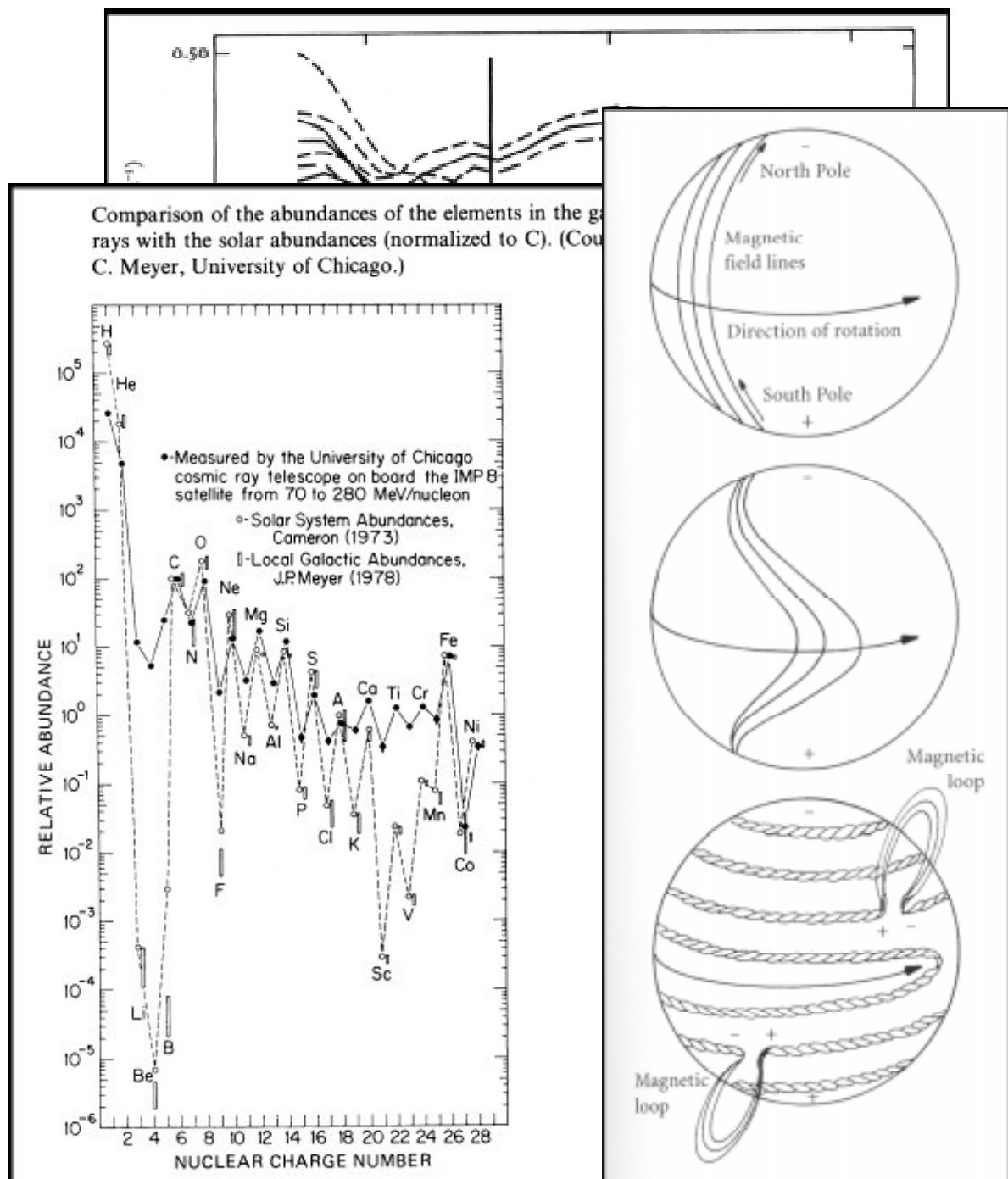


VIENTO SOLAR Y SU EFECTO EN LA TIERRA



## ROTACION Y PULSACIONES

El Sol no rota como un cuerpo rígido sino que su movimiento rotacional depende de su distancia al centro y de su latitud solar. Esta rotación diferencial es la responsable del continuo retorcimiento de las líneas de los intensos campos magnéticos locales lo que lleva a la destrucción de los mismos (periodos de mínima actividad) y a su reconstrucción con la polaridad invertida al cabo de 11 años (máxima actividad). Se ha encontrado que el Sol vibra o resuena con varios periodos del orden de minutos. El origen parece ser movimientos internos en la región convectiva.



## GENERACION DE ENERGIA

Stellar fusion processes <sup>a</sup>		
<p>PP I chain</p> $p^+ + p^+ \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e$ ${}^2_1\text{H} + p^+ \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$ ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2p^+$	<p>PP II chain</p> $p^+ + p^+ \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e$ ${}^2_1\text{H} + p^+ \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$ ${}^3_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + \gamma$ ${}^7_4\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \nu_e$ ${}^7_3\text{Li} + p^+ \rightarrow 2{}^4_2\text{He}$	<p>PP III chain</p> $p^+ + p^+ \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e$ ${}^2_1\text{H} + p^+ \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$ ${}^3_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + \gamma$ ${}^7_4\text{Be} + p^+ \rightarrow {}^8_5\text{B} + \gamma$ ${}^8_5\text{B} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + e^+ + \nu_e$ ${}^8_4\text{Be} \rightarrow 2{}^4_2\text{He}$
<p>CNO cycle</p> ${}^{12}_6\text{C} + p^+ \rightarrow {}^{13}_7\text{N} + \gamma$ ${}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + e^+ + \nu_e$ ${}^{12}_6\text{C} + p^+ \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + \gamma$ ${}^{14}_7\text{N} + p^+ \rightarrow {}^{15}_8\text{O} + \gamma$ ${}^{15}_8\text{O} \rightarrow {}^{15}_7\text{N} + e^+ + \nu_e$ ${}^{15}_7\text{N} + p^+ \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$	<p>triple-<math>\alpha</math> process</p> ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightleftharpoons {}^8_4\text{Be} + \gamma$ ${}^8_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightleftharpoons {}^{12}_6\text{C}^*$ ${}^{12}_6\text{C}^* \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \gamma$	<p><math>\gamma</math> photon</p> <p><math>p^+</math> proton</p> <p><math>e^+</math> positron</p> <p><math>e^-</math> electron</p> <p><math>\nu_e</math> electron neutrino</p>

<sup>a</sup>All species are taken as fully ionised.