

如何计算太阳的寿命

石国通

天体物理学的理论认为,恒星的演化过程可分为如下几个阶段:恒星的诞生(引力收缩阶段),主序星阶段,红巨星阶段和红巨星以后的演化阶段.现有恒星的90%以上都正处在主序星阶段,我们的太阳就是一颗主序星.

主序星是壮年时期的恒星,在它内部进行着氢聚变为氦的热核反应,反应释放的热能正好和恒星向外部空间的辐射相平衡,因此恒星的温度基本维持不变,此时恒星由于自吸引而收缩的作用和恒星内部的压力相平衡,所以恒星的体积也基本不变,这是恒星一生中最为稳定的时期,也是生命史上历时最长的时期.

太阳的寿命理应指它从诞生到死亡的时间长度,一则因为它在主序星阶段时间最长,更重要的是,当它从主序星过渡到红巨星时,它的直径会增大上百倍,表面温度虽会从目前的5700度下降到4000度左右,但辐射会因表面积的急剧增大而增大到2千倍以上,此时地球上的人和所有生命再无法存活下去.因此,我们不妨狭义地说太阳的寿命指它的主序星上停留的时间.

任何物体的热辐射都由温度决定,此即斯忒藩-玻耳兹曼定律: $E = A\sigma T^4$, 其中 σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常量, $\sigma = 5.672 \times 10^{-8} \text{瓦} \cdot \text{米}^{-2} \cdot \text{开}^{-4}$; T 为绝对温度, A 为物体的发射本领, $A \leq 1$. 对于绝对黑体(简称黑体) $A = 1$, 所谓黑体是指能全部吸收投射于其上的辐射,而无反射和透射,因此黑体的辐射高于同温度的其它物体.

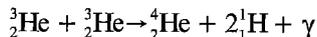
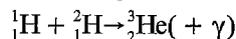
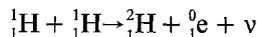
天体物理学认为恒星为黑体,当它的表面温

度为 T 时,它在单位时间,单位面积上辐射出的能量为: $E = \sigma T^4$. 进一步取恒星为半径等于 r 的球体,则它总的辐射功率为: $L = 4\pi r^2 \sigma T^4$. 天文学上称 L 为恒星的光度. 代入太阳的数据: $r = 6.96 \times 10^8$ 米, $T = 5770$ 开,可得到 $L_{\odot} = 3.83 \times 10^{26} \text{焦} \cdot \text{秒}^{-1}$. (注意,这里计算的辐射包括全部波长范围,从天文观测的角度讲,有时只考虑可见光范围内的辐射,称之为目视光度.)

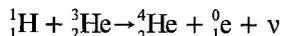
我们在地球上所接受的太阳辐射: $I = \frac{L}{4\pi R^2} = 1.35 \times 10^3 \text{瓦} \cdot \text{米}^{-2}$, 称为太阳的亮度,

式中 R 为日地距离,又称作1个天文单位, $R = 1.5 \times 10^{11}$ 米. 同样如果用目视光度代替光度,得到的是目视亮度,即引起人的视感觉的功率密度. 上述 $1.35 \times 10^3 \text{瓦} \cdot \text{米}^{-2}$ 这个数据是设计太阳能产品的重要参数,用来分析产品的热转换效率.

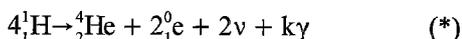
维持太阳(及其它主序星)辐射的是它内部的聚变反应,太阳内部有两类聚变反应. 第一类称作质子-质子反应(p-p反应),其过程如下:



或较少可能的反应:

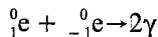


不论哪种反应,最终都导致如下净反应:



即4个质子合成1个氦核并释放2个正电子,2个电子中微子和数量不确定的光子. 下面我们就利用上述反应方程式计算反应能.

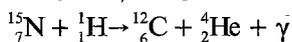
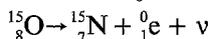
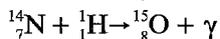
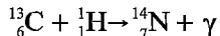
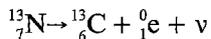
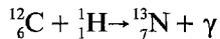
4个质子的静止质量 $4m_p = 4 \times 1.007825 = 4.0313u$, 1个氦核的静止质量 $m_{\text{He}} = 4.002603u$, 由于正电子总有机会和电子相遇而湮灭转化为光子,



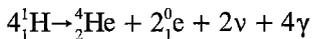
故不考虑正电子质量. 于是反应方程式(*)的

质量亏损: $\Delta m = 4m_p - m_{\text{He}} = 0.0287u$. 这里的 u 是原子质量单位, $1u = 1.66054 \times 10^{-27}$ 千克. 所亏损的质量以能量形式释放, 即反应能等于 $E = \Delta mc^2 = 4.28 \times 10^{-12}$ 焦 = 26.7 兆电子伏特.

第二类核聚变反应为碳-碳循环反应:



在上述反应链中, 碳、氮等元素并无消耗, 只是起着催化作用, 整个循环终了, (诸式相加), 其净效果依然是:



当然反应能也还是 26.7 兆电子伏特.

至于恒星在主星序上停留的时间应由其燃烧的氢的数量决定. 氢核的聚变反应只发生在恒星中心, 反应产物是暂时稳定不再产能的氦, 并形成同温的氦核, 氦核周围是正在进行反应并产能的氢的壳层. 随着氢的燃烧, 氢壳逐渐向外推移, 氦核也逐渐扩大, 直到氦核质量达到恒星总质量的 10%—15% 时, 中心同温氦核再也无法抵抗星体的自吸引, 氦核会发生猛烈坍缩, 坍缩时所释放的引力能, 一部分使氦核自身加温, 另一部分转移到外部使恒星外壳急剧膨胀, 体积骤增, 表面温度则会因膨胀而有所下降, 但恒星的光度(总的辐射功率)却会大幅度增加, 此时的恒星已开始演化为红巨星.

现在的问题是太阳大气中的氢的含量(丰度)是多少. 根据太阳宇宙线及太阳大气外层的发射线测量结果, 氢和氦的原子数之比是 16:1, 因此它们的质量比是 4:1, 又从光谱分析可知重元素与氢的相对丰度是 0.019, 于是可计算出太阳中氢的质量百分比(丰度)是 $\eta = \frac{1}{1 + 0.25 + 0.019} =$

78.8%. 太阳的总质量是 1.989×10^{30} 千克, 氢燃烧 10% 的质量数是 1.567×10^{29} 千克, 折合成原子数是 $N_{\text{H}} = \frac{1.567 \times 10^{29}}{1.008 \times 1.6605 \times 10^{-27}} = 0.936 \times 10^{56}$

个, 而每 4 个氢聚变为 1 个氦释放 26.7 兆电子伏特能量, 则释放的总能量应是 $W = 6.25 \times 10^{62}$ 电子伏特 = 1.04×10^{44} 焦. 进一步由太阳的光度可知此能量维持辐射的时间, $t = \frac{W}{L} = 2.715 \times 10^{17}$

秒 = 86×10^8 年, 即 86 亿年.

天体物理学家认为宇宙年龄在 130 亿年左右, 太阳的年龄为 50 亿年, 地质学家认为地球的年龄为 45.5 亿年, 古生物学家认为地球生命诞生至今为 30 亿年, 所有这些数据都是自恰的. 由于太阳向外辐射的能流密度和日地间的恰当距离, 决定了地球表面的平均温度是 25°C , 正好适宜生命的诞生和进化, 而离太阳更近或更远的行星没有生命诞生的条件, 因此地球人实在是一种幸运. 从太阳的寿命可知地球人发展的时间历程尚有 ~ 40 亿年, 然而, 我想, 真正决定人类发展前途和命运的恐怕不是太阳, 而是地球所能提供的资源条件和环境条件, 以及人类自身的数量, 并且这三个方面人类都有权决定.

对于其它的主序恒星, 由于维持辐射的能量转化过程及规律和我们的太阳相同, 上述方法同样可用来估计它们在主星序中的停留时间. 设 η_1 为诸恒星中氢的质量百分比 ($\sim 70\%$), η_2 为主序星阶段氢燃烧的百分比 ($10\% \sim 15\%$), η_3 为氢燃烧时质量的亏损率(从前面的计算可知 $\eta_3 = 0.7\%$), 于是恒星将在主星序上停留

$$t = \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3 M C^2}{L}$$

其中 M 为恒星质量, L 为相应的光度. 对于太阳而言, $t = \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3 M C^2}{L}$, 从而 t 可以表示为:

$$T = 86 \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \left(\frac{L_\odot}{L} \right) \text{ (亿年)}$$

式中 M 和 L 的数据可从对恒星观测得到的赫罗图上查得. 总的规律是随着质量增加, 光度成数量级增大, 大质量恒星的寿命短, 例如质量为 25 倍太阳质量的恒星, 其光度为太阳光度的近 8 万倍, 表面温度达到 3.5 万开, 而它主星序上只能停留近 300 万年, 即使这样的恒星也伴随有恰当距离和温度适宜的行星, 但却不可能有进化出生命的时间.