Doctor Curious 35：恒星演化简史

原创 库毓林 中国科学院理论物理研究所 2022-07-11 16:55 发表于北京

作者简介 /Profile/

库毓林，中国科学院理论物理所 17 级博士研究生，导师为周宇峰研究员，研究方向为暗物质间接探测唯象。

恒星并不是一成不变的，随着时间的演化，不断有能量以辐射的形式从恒星表面释放出来，这些能量主要有两个来源：引力势能和核能。在能量释放过程中，恒星结构将发生改变，其演化性质强烈依赖于恒星初始质量和化学组成。通过结合物理定律和实验观测结果，一定程度上可以确定恒星的演化规律。一般而言，恒星的演化可分为三个阶段：主要由恒星引力收缩提供能量的主序前（pre-main sequence）阶段、由恒星核心处的氢到氦的核聚变反应提供能量的主序（main sequence）阶段、以及待恒星核心处的氢消耗殆尽后，由氦、碳或更重元素的燃烧提供能量的主序后（post-main sequence）阶段。主序一词来源于观测到的恒星光度（luminosity）和有效温度在 Hertzsprung-Russell 图上的分布形式，其中大多数恒星位于一条从左上角贯穿到右下角的被称为主序带的带状区域内，这类恒星被称为主序星（main-sequence star），也叫矮星（dwarf）。位于主序带上方的恒星主要为巨星（giant），在相同的颜色或者说温度下，巨星的尺寸和光度通常比矮星更大。位于主序带下方的主要为白矮星（white dwarf），白矮星不是主序星，它是中小质量恒星的演化终点，靠电子简并压抵抗重力而稳定存在。本文将对一般恒星的演化过程进行简要介绍。

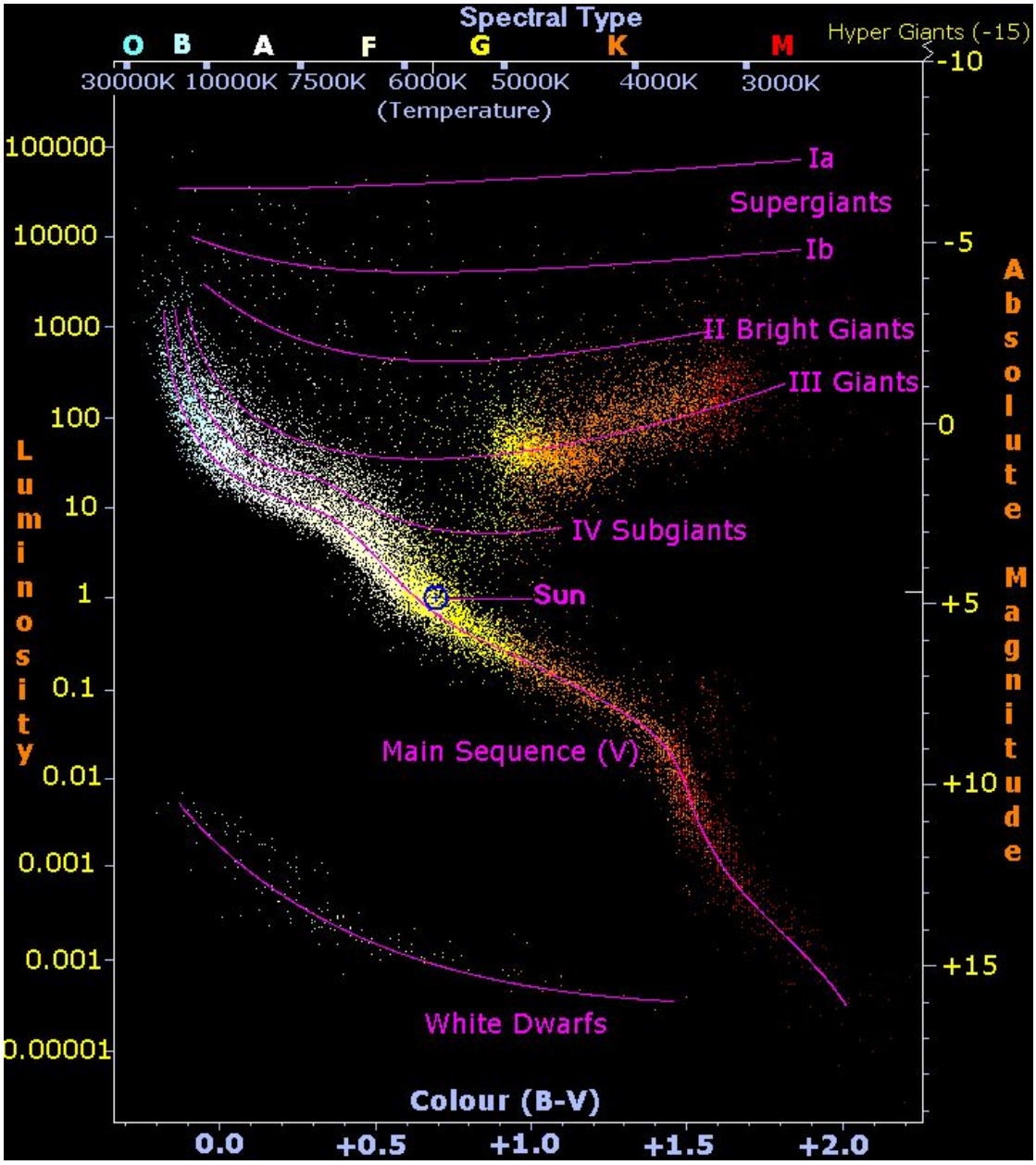

图 1： 表征恒星光度和有效温度的 Hertzsprung-Russell 图，图中包含 Hipparcos Catalogue 中的 22000 颗恒星以及 Gliese Catalogue 中的 1000 颗低光度恒星。

主序前阶段

恒星的形成始于巨分子云（giant molecular cloud）中的引力不稳定现象，通常由不同分子云或星系间的碰撞、大质量恒星的辐射压、临近的超新星（supernova）爆发、星际介质中膨胀的气泡所引发。当一个区域内的物质密度高到足以满足 Jeans 不稳定性标准时，它开始在自身的引力效应下收缩。随着收缩过程的进行，分子云的引力势能转化为热能，云内气体的密度和温度不断上升。当原恒星云（protostellar cloud）接近达到流体静力学平衡的稳定条件时，便会在其核心处形成原恒星（protostar）。原恒星不断吸积周围的星际尘埃和气体，一旦越过 Hertzsprung-Russell 图中的恒星诞生线后便成为了主序前星（pre-main-sequence star），能够在可见光波段被观测到，此时，恒星已经获得了其几乎所有的质量，但还没有开始氢的核聚变反应。随后恒星在引力的作用下继续收缩，其内部温度上升，直到在零龄主序列（zero-age main

sequence）上开始氢的燃烧。对于像太阳这样的恒星，其引力收缩的持续时间约为上千万年，对于质量最轻的红矮星（red dwarf），其引力收缩的持续时间可达上亿年之久，部分大质量恒星由于作为原恒星时收缩得太快，因而不存在主序前阶段。通过使用恒星光谱对表面引力进行测量，可以从经验上区分主序前星和主序星。与具有相同质量的主序星相比，主序前星的半径更大，因此具有较低的表面引力。尽管在光学上可见，但由于引力收缩的时间远低于氢核聚变的持续时间，与主序星相比，主序前星的数量相对比较稀少。

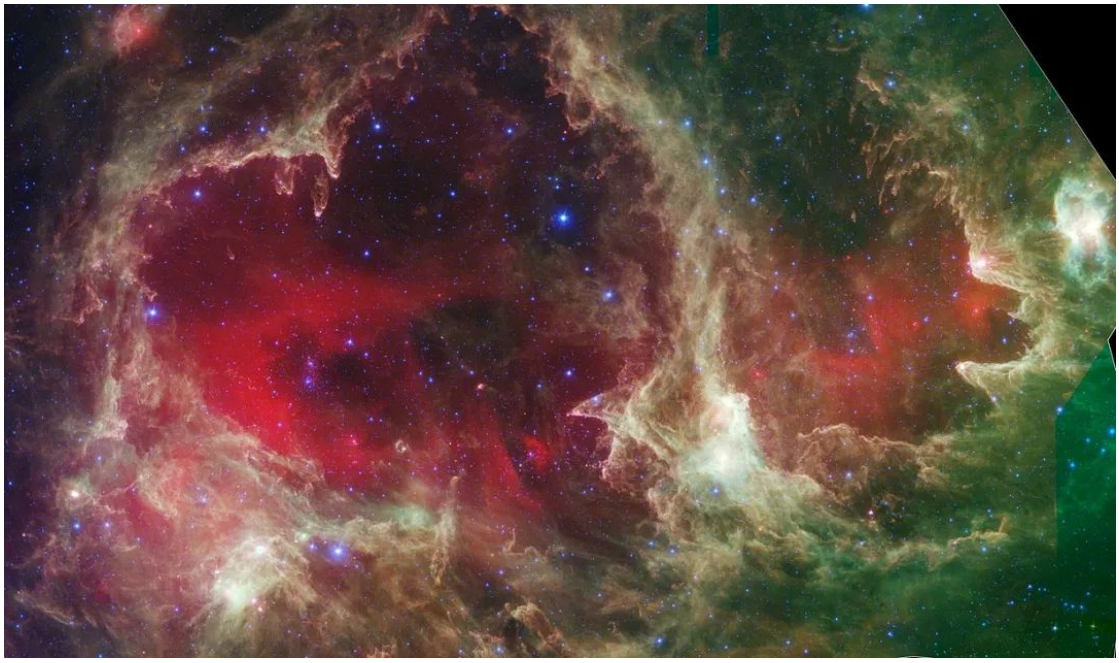

图 2： Spitzer 空间望远镜拍摄的 W5 区域恒星形成的红外线图像。

主序阶段

当主序前星收缩至一定程度时，其致密核心处的氢将在高温高压条件下聚变为氦，释放大量能量。一旦核心处的氢核聚变反应能够提供全部的恒星辐射能时，恒星演化便进入主序阶段，刚进入此阶段的恒星被称为零龄主序星。主序星核心区域的温度和密度处于维持恒星能量产生所需的水平，能量产生的减少会导致覆盖的质量压缩核心，从而导致更高的核心温度和压力，加快聚变速度。同样，能量产生的增加会导致恒星膨胀，从而降低核心的压力。因此，恒星在流体静力学平衡中形成了一个在其主序阶段稳定的自我调节系统。主序星在主序列中的位置主要由它的质量决定，但也取决于它的化学成分和年龄。

主序星氢核聚变的过程主要有两种，相应的能量产生速率取决于核心的温度。根据恒星的能量产生由何种过程所主导，天文学家们通常将主序带分为上下两段。约为 1.5 倍太阳质量以下的主序星，其核心处的氢核聚变过程主要通过质子-质子链（proton-proton chain）反应进行。超过这一质量的主序星位于主序带的上段，其具有足够高的核心温度，可以有效地利用 CNO 循环（CNO cycle）来进行反应，这一过程使用碳、氮和氧作为氢转变为氦的中间体 [1]。低于 0.08 倍太阳质量的原恒星不会点燃正常的氢核聚变反应，其被称为褐矮星，属于次恒星天体。

几乎所有的恒星在其有生之年的绝大部分时间里都处在主序阶段，期间恒星核心处氦的比例和核聚变速度将稳步增加，恒星的温度和光度也将缓慢增长。自 46 亿年前进入主序列以来，太阳的光度预计增加了约 40% [2]。恒星在主序阶段持续的时间主要取决于它所拥有的燃料量和它进行核聚变反应的速度。大质量恒星消耗燃料的速度非常快，且只能燃烧自身一部分质量的氢，因而寿命很短。低质量恒星消耗燃料的速度非常缓慢，且能够利用更高比例的氢进行核聚变反应，这使得低质量恒星可以在主序阶段停留很久，对于最极端的红矮星（0.08 倍太阳质量），其寿命可达约 12 万亿年 [3]。由于这些恒星的寿命大于宇宙当前的年龄（约138 亿年），预计 0.85 倍太阳质量以下的恒星都不会离开主序列 [4]。太阳预计会在主序列上停留约 100 亿年。

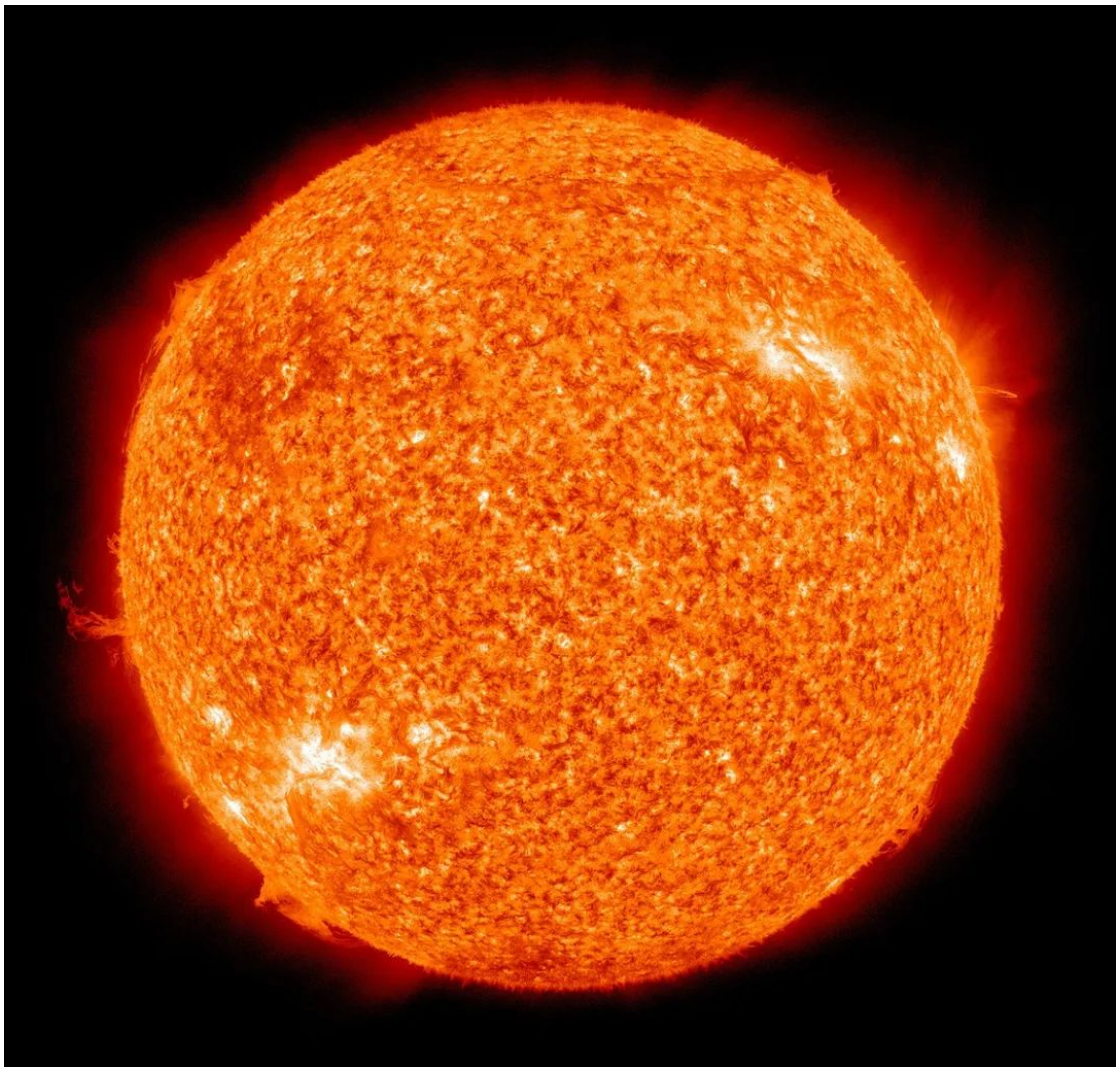

图 3：太阳，最接近地球的主序星。

主序后阶段

当主序星核心处的氢燃烧殆尽后，恒星的演化将进入主序后阶段。初始质量低于 0.5 倍太阳质量的主序星不足以热到使其核心处的氦参与核聚变反应，这样的恒星将燃烧完它所有的氢，最终成为一颗氦白矮星 [5]。由于它们在主序星阶段的寿命远长于我们的宇宙年龄，这类恒星的演化仅仅只存在于理论层面，并无观测实例。质量介于 0.5 至 8 倍太阳质量的主序星将演化成为比在主序列时更大但表面温度更低的红巨星（red

giant）。此类恒星会依次进入红巨星分支（red-giant branch，惰性氦核和燃烧氢壳）、水平分支（horizontal branch，燃烧氦核）和渐近巨星分支（asymptotic giant branch，惰性碳氧核和燃烧氢氦壳）等阶段，然后排出其大部分的外层物质形成一个行星状星云（planetary nebula），最终其核心将成为一颗碳氧白矮星 [6]。太阳在约 50 亿年后将成为一颗红巨星，届时太阳将变得异常巨大，直径是现在的数百倍，足以吞噬掉目前太阳系里包括地球以内的内侧行星。初始质量更大的主序星会演化成为红超巨星（red supergiant）。其中，8 至 10 倍太阳质量的主序星规模已大到足以将核心处的碳聚变为氖和镁，最终将形成一颗氧氖镁白矮星 [7]。如果一颗恒星的质量足够巨大，那么在其核心处会热到不断合成更重的元素，直至产生铁，此后核心便无法再从核聚变中获取能量，由于此时电子简并压并不足以抗衡引力，恒星核心将经历突然和毁灭性的坍塌，通过一个尚未完全理解的过程释放引力势能，产生一次剧烈的爆炸，形成超新星。超新星爆发极其明亮，能够照亮其所在的整个星系，持续时间可达数周甚至数年之久。在此期间，一颗超新星所释放的辐射能可以与太阳在其一生中辐射能量的总和相当。超新星爆发时会将其大部分甚至几乎所有的物质以极高的速度向外抛散，在周围的星际介质中产生激波，最终形成丝状气体云和气壳，被称为超新星遗迹（supernova remnant）。这些注入星际介质的元素最终丰富了分子云，并参与到下一代恒星的形成。这导致每一代的恒星组成都略有不同，从几乎纯氢和氦的混合到富含更多金属的成分，超新星是分配这些较重元素的主要机制。超新星爆发后的残余核心将形成中子星（neutron star）或黑洞（black hole）。

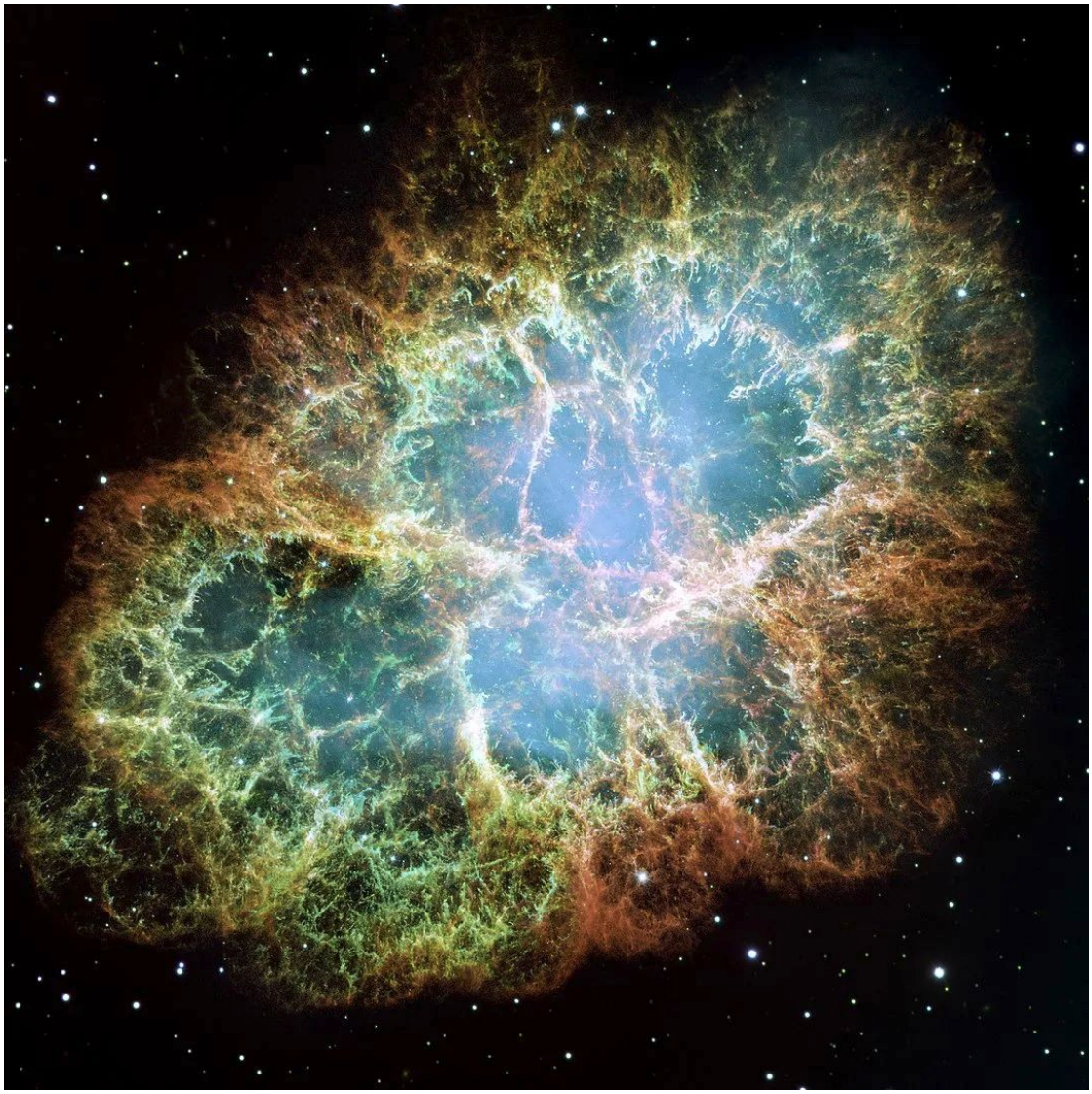

图 4：蟹状星云是超新星爆发后的残骸，1050 年左右首次被发现。

演化终点

当一颗恒星耗尽了其全部的核燃料后，它的残骸可以是以下三种形态之一，具体取决于其质量。

- 如果恒星残骸的质量低于 Chandrasekhar 极限（约 1.4 倍太阳质量），电子简并压足以抗衡引力，最终恒星将成为一颗白矮星。白矮星的温度很高，会通过辐射的形式损失热能，当白矮星足够冷却，不再发出光和热，便会成为黑矮星，由于白矮星达到这种状态所需的时间要长于当前宇宙年龄，因此到目前为止，宇宙中预计并不存在黑矮星。
- 质量高于 Chandrasekhar 极限但低于 Oppenheimer 极限（约 2 到 3 个太阳质量）的恒星残骸内部压力会造成电子捕获，使得大多数质子转变为中子，恒星的核心将成为只有中子的致密球体。中子也遵循泡利不相容原理，能够产生中子简并压，比电子简并压更为强大，可以抗衡进一步的引力压缩，这种天体被称为中子星。
- 若恒星残骸质量高于 Oppenheimer 极限，则中子简并压也不足以抵挡恒星的进一步塌缩，此时，恒星将成为黑洞。黑洞是广义相对论所预言的天体，其引力场强大到连光都无法逃脱，目前天文学上的观测和理论也都支持宇宙中黑洞的存在。

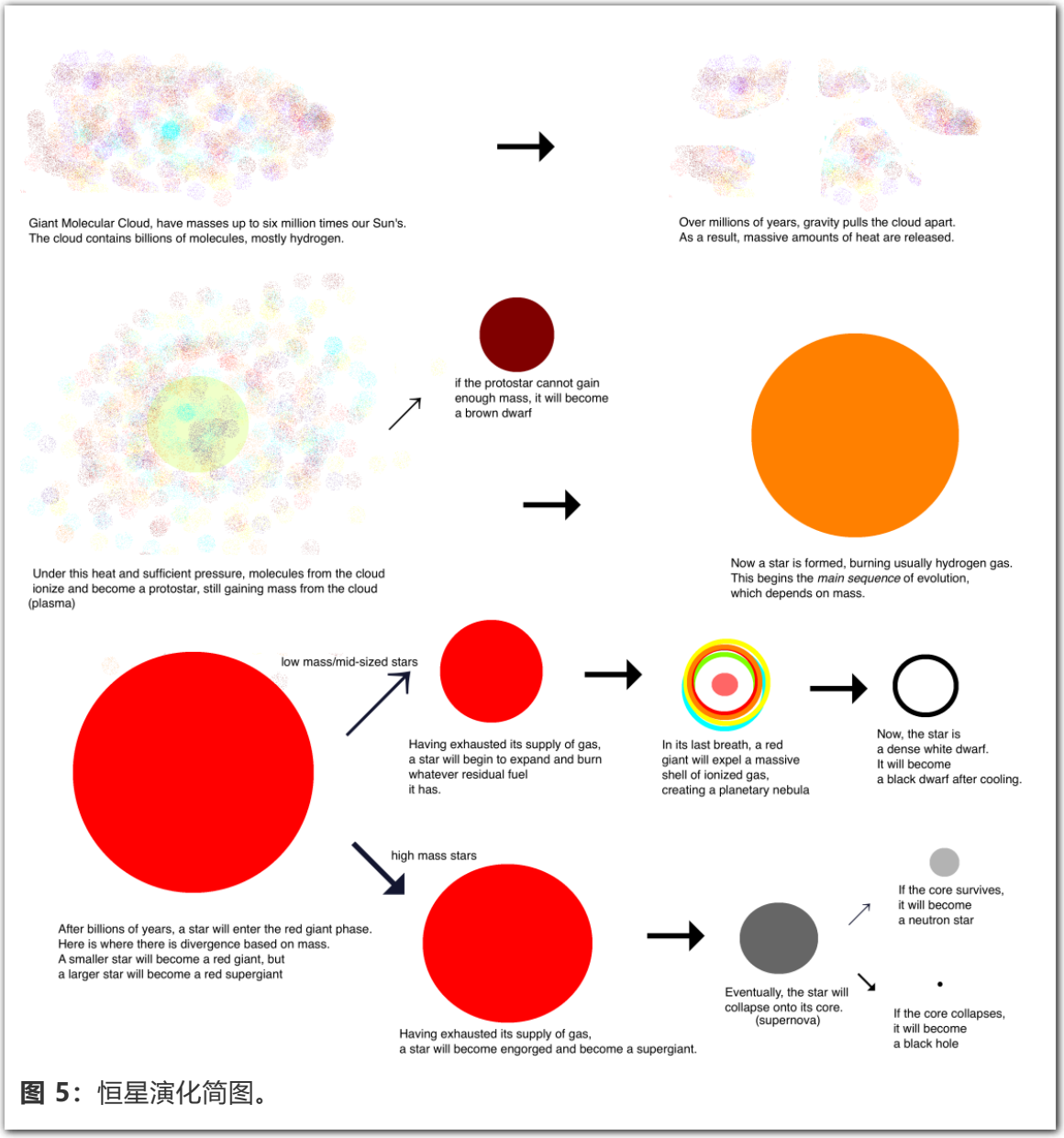

图 5：恒星演化简图。

参考文献

[1] Clayton, Donald D. Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis. University of Chicago Press. 1983.

[2] Sackmann, I. J.; Boothroyd, A. I.; Kraemer, K. E. Our Sun. III. Present and Future. Astrophysical Journal. 1993, 418: 457.

[3] Adams, Fred C.; Laughlin, Gregory; Graves, Genevieve J. M. Red Dwarfs and the End of the Main Sequence. Gravitational Collapse: From Massive Stars to Planets. Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica: 46–49. [2008-06-24].

[4] Swinburne Astronomy Online Encyclopedia of Astronomy. Swinburne University of Technology. [2015-05-27].

[5] Laughlin, G.; Bodenheimer, P.; Adams, Fred C. The End of the Main Sequence. The Astrophysical Journal. 1997, 482 (1): 420–432.

[6] Dhillon, Vik. The evolution of low-mass stars. lecture notes, Physics 213. University of Sheffield. [3 May 2007].

[7] Woosley, S. E.; Heger, A.; Weaver, T. A. The evolution and explosion of massive stars. Reviews of Modern Physics. 2002, 74 (4): 1015–1071.

微信号 | ITP-CAS
开放 交融 求真 创新
· 中科院理论物理研究所 ·

上一篇
Doctor Curious 34：生物体中的液液相分离现象

下一篇
Doctor Curious 36：奇特强子会为强相互作用带来新意吗?