

星体为什么会发射X射线?

Eugene N. Parker

太阳是我们最先观测到的发射X射线的星体。由于地球大气对X射线的强烈吸收,所以直到1948年火箭带着仪器离开大气层后才测量到太阳的X射线。1960年4月得到了第一张太阳的X射线照片^[1]。几年后,轨道高能天文观测台1号及荷兰天文卫星发现,天空布满了明亮的X射线星,有的甚至比太阳的X射线强好几个量级。随着技术的发展,1978年发射的轨道HEAO-2爱因斯坦观测站发现,几乎每一颗星,不论是年老的还是年轻的,大的或是小的,热的还是冷的,都能发射X射线^[2-4],只有冷巨星、超巨星和白矮星例外。可见星体发射X射线并不是一种异常现象,而是正常现象。

深入的观测表明:星体的最强的X射线发射是由短暂的耀斑活动引起的,但星体也有稳定的、连续的X射线发射,这大多是热韧致辐射。这种热辐射表明,这些星体外层的稀薄大气温度很高,电子温度为 10^6K ,甚至更高。为什么一个星体表面的热黑体辐射只相当于 10^4K ,而其外层大气的温度却高出几百倍呢?

星冕通过发射X射线损失能量。要维持这种发射,就必须由内部向外层大气输送能量,因此我们可以把X射线亮度作为这种能量输送的度量。一颗表面温度低于 6000K 的星,其X射线亮度的观测值在 $10^{19}-10^{23}\text{J/s}$ 之间,而耀斑在瞬间内释放的能量可以比它大一百倍。更热的星,发射的X射线也更强。O超巨星的表面温度约 20000K ,其X射线亮度可达 10^{27}J/s 。星体输入到环绕它的晕(或者叫冕)中的能量虽然很大,却仅是恒星总辐射能量的一小部分。小的冷(3000K)M星,X射线亮度与总亮度之比为 $10^{-5}-10^{-3}$,较热、较亮的星其比值为 $10^{-7}-10^{-5}$ 。

要进行更深入的研究,仅靠从遥远的星体射来的一束微弱的光是不够的,所以还是让我们仔细了解一下离我们最近的X射线星——太阳吧。如果我们考察太阳X射线发射区清晰而奇妙的结构以及日冕内基本的物理过程,弄清了日面上为什么会发出X射线亮斑,我们就可以把X射线发射作为诊断其他星体的一种有力工具。太阳X射线照片(图1)告诉我们,X射线日冕与穿过太阳表面的磁场有密切关系^[6]。实质上是磁场约束着气体。观测结果说明日冕气体的密度和温度一直在增加,直到激发X射线流。但也有例外,较热的O星及B星也发射X射线,它们并不具有磁场。

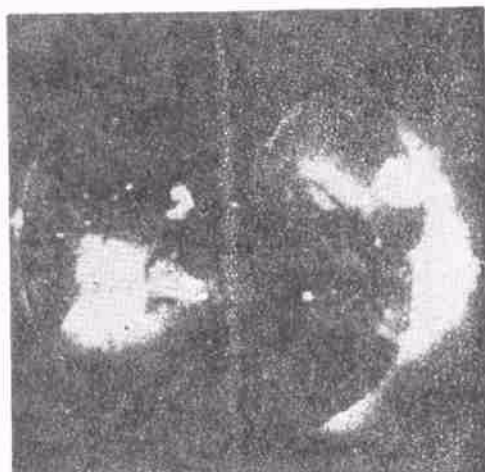


图1 太阳X射线照片

亮的X射线冕与活动区日冕环的磁场密切联系着,活动区之间的暗区为冕洞,小的X射线亮点是这里可见的最小的X射线冕(NASA天空实验室照片)

在三十年代,天文学家就知道日冕有 10^6K 的高温,而太阳表面温度却低于 6000K 。是什么机制把能量从冷表面输送到热冕中去的呢?也就是说日冕是如何被加热的呢?这是了解星体X射线发射的中心问题。

从二十多年来的观测得知, 太阳 X 射线照片上的亮区, 即 X 射线冕区, 其气体密度为 10^{10} atoms/cm³, 温度约 $2-3 \times 10^6$ K, 内部磁场为 10^{-2} T, 气体压力只有磁压的百分之一, 气体被约束在准无力磁场中. X 射线在双极磁场中形成, 亮度约 1 W/cm^2 , 与活动区的尺度无关. 图 1 中处于二个强双极磁场之间的暗区 (或叫冕洞), 温度几乎与亮区一样高, 为 $1.5-2 \times 10^6$ K, 但密度只有 10^8 atoms/cm³, 磁场也低得多, 一般约为 10^{-3} T. 磁力线向空间伸展. 日冕气体膨胀产生的压力把气体推向无限远 (见图 2). 冕洞是太阳风的源泉, 能量为 0.1 W/cm^2 .

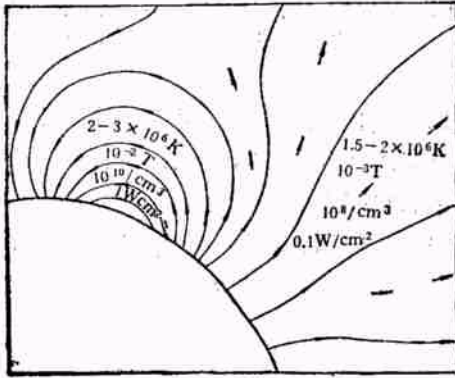


图 2

太阳表面上的闭合磁场和开放磁场, 分别与 X 射线冕环及冕洞相对应, 磁力线之间的箭头表示气体运动方向

我们知道, 太阳浅表层处于强烈的对流状态, 因为内部的加热使它变得不稳定. 这种对流元称为米粒 (图 3). 米粒的水平尺度为 10^3 km, 寿命 5—10 min. 中间上升流的温度比周围下沉流处高 500 K. 向外的水平速度为 1—2 km/s. 米粒内雷诺数为 10^{11} — 10^{12} . 所以, 这种对流是激烈的湍流. 更小的湍流细节因受地面望远镜分辨率的限制看不清楚. 太阳稀薄日冕中的磁场紧紧地粘连在它下面的、相对来说比较稠密的对流区上, 并被湍流气体推上落下. 15—20 年前, 恒星物理学家已发现穿过太阳表面的磁场是纤维状的^[7].

Alfvén 等人提出对流相当于一种热发动机, 它发射阿尔文波及声波到日冕中去. 在稀

物理

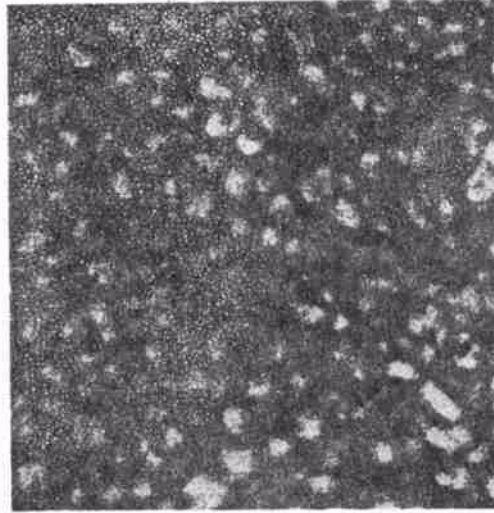


图 3 米粒——白光照片上太阳的对流元(米粒尺度一般为 10^3 km)

薄日冕中因粘滞性、热传导性及阻抗, 波的能量被耗散掉. 这样, 日冕温度的升高就不受热力学规律的限制了. 后来的理论研究指出, 除了阿尔文波之外, 声波、内重力波及各种磁流波在穿过光球层及色球层时都受到折射和耗散, 不能穿透到日冕中去. 阿尔文波作为磁场的横向扰动可以穿入日冕. 在 X 射线冕内或在冕洞内, 阿尔文速度约为 2000 km/s . 可是阿尔文波在冕区内能量耗散太慢, 不足以补充日冕的能量损失. 有一种说法是阿尔文波在传播过程中, 因速度的变化产生相混合^[8], 使波峰变得折皱了. 强折皱使波的能量耗散. 这些说法还需要进一步的观测结果来加以检验. 假如我们能得到单个磁纤维运动的傅里叶谱及阿尔文波在磁场中的速度变化的情况, 我们对这些基本过程就能清楚一些.

也有人认为, 由于双极磁场磁力线两端都与太阳表面相连, 波的能量沿磁力线向上传播也向下传播, 因而没有净向上的能量输送. 还有人提出磁力线与进入磁场的波可能会产生共振, 但解释过程中也遇到一些困难. 一般认为阿尔文波在 X 射线冕的双极磁场中是存在的, 但没有证据表明它是主要的加热源.

另一种关于日冕加热的理论是: 由于双极磁场的磁力线两头都系于湍流对流状的光球之

中,磁力线足点不可避免地会被搅乱,使得磁力线缠绕和交织在一起变得杂乱无章(图4)。磁力线的交织使得磁场的能量增加。设想一条长为 L 的磁力线,由于磁力线足点以速度 v 作随机运动,在周围的磁力线中间左右穿行,使这条磁力线倾斜^[9](图5)。它与周围平均场之间的倾角 $\theta = \tan^{-1}vt/L$,磁力线应力为 $(B^2/4\pi)\tan\theta$,相应的功率为 $W = (B^2/4\pi)v^2t/L$ 。对于一般 $L = 10^4 - 10^5 \text{ km}$ 的活动区,过了 5×10^3 至 $5 \times 10^4 \text{ s}$ 之后,能量输入率可达 1 W/cm^2 ,即可达到X射线冕区所需要的能量输入率。当输入能量足够大时就会爆发明亮的X射线。实际情形当然要复杂得多。定量的计算是很困难的。

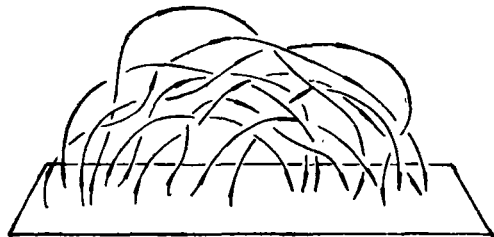


图4 磁力线的缠绕和交织(由于在光球上的磁力线足点作随机运动而形成)

各种日冕加热或星体X射线发射的理论的验证都要求观测确定太阳光球层中磁纤维运动的傅里叶谱,它的周期和幅度、磁纤维的游动情况等,既要测量它的时间变化,也要测量它的空间变化。因此,需要高分辨率的太阳观测站。美国NASA正在进行一个HRSO计划,准备研究个别磁纤维的运动,太阳内部的大气结构以及各种恒星物理方面的小尺度效应。地面望远镜也在不断采用新技术,在能见度极佳的时刻可以一瞥太阳真面目。太阳X射线定量理论的

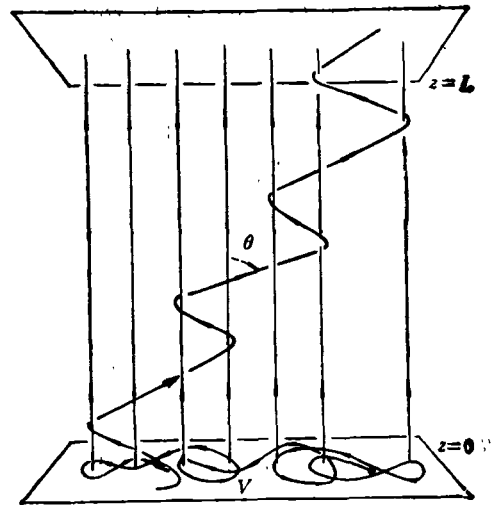


图5 单根磁力线与周围磁场的缠绕(由于磁力线一端固定,另一端作随机运动而引起)

发展也将使我们能进一步研究其他星体的磁场状况及湍流情况。同时,我们也盼望今后能在更遥远的空间进行探测。

(戴月琴根据 *Phys. Today* 1987年第7期
第36—42页编译)

- [1] H. Friedman, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1(1963), 59.
- [2] R. Giacconi et al., *Astrophys. J.*, 230(1979), 540
- [3] G. S. Vaiana et al., *Astrophys. J.*, 245(1981), 163
- [4] J. L. Linsky, in *Solar Phenomena in stars and Stellar Systems*, R. M. Bonnet, A. K. Dupree, eds., Reidel, Boston (1981), 99.
- [5] R. Rosner et al., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 23 (1985), 413.
- [6] P. A. Sturrock, T. E. Holzer, D. M. Mihalas, R. K. Ulrich, eds., *Physics of the Sun*, Reidel, Boston, (1986).
- [7] K. L. Harvey et al., *Solar Phys.*, 40(1975), 87.
- [8] J. Hayvaerts, E. R. Priest, *Astron. Astrophys.*, 117 (1983), 220.
- [9] E. N. Parker, *Astrophys. J.*, 264(1983), 642.