

太阳物理与恒星物理的联系*

E. N. 帕克

(美国芝加哥大学物理系, 天文和天体物理系)

太阳是一个奇异的天体。它的内部深处是完全热化的, 但是由于在 2×10^7 年期间能量渗漏到其表面, 所以局部自由能增加, 产生了种种迷人而费解的非热现象。非热效应的主要机制是传输能量所必需的对流热机, 且在能量传输过程中产生了自由能。在科利奥里力的约束下, 热机将一部分能量(约 10^{-4})转换成出人意外的形式, 统称为太阳活动。它是这次国际科学会议的主题。太阳黑子是太阳活动的典型指示器, 它已为东方天文学家观测了两千多年。虽然太阳活动的研究开始于古代, 可是直到望远镜和现代物理学在几世纪前发展起来后, 探索太阳黑子的物理性质才有可能。西方天文学家直到伽利略使用望远镜才记录到太阳黑子这一奇怪的事实表明, 那时候世界上不同地区流行着不同的观点。人们可能还记得, 伽利略由于阐述了存在着太阳黑子的观点而遭到批判, 因为这是与众所周知的“占星事实”相矛盾的, 而当时东方的占星学者却已经把太阳黑子纳入他们自己的思想体系了。

在太阳黑子内部, 磁场强度为 3000 高斯, 温度降低了 1000 - 1600 'K。谱斑(具有增强的色球辐射)、日珥和耀斑伴随着太阳黑子, 同时在其上空有活动 X 射线日冕。这种活动是在太阳的水平向(东—西向)磁场从 10^5 公里深处经过太阳表面浮现^{[1], [2]}且延伸到上层较稀薄的大气而产生的。

呈现在超米粒胞间的磁篱笆之中的针状物遍及整个太阳。短暂活动区是从整个太阳比较浅的深度($\sim 1 - 2 \times 10^4$ 公里)发出的, 在它们爆发自低纬度区以产生正常活动区之前, 提供了太阳高纬度区移动磁场的证据^[3]。这种移动磁场可理解为太阳外层非均匀自转和涡旋对流的磁流体力学的结果^{[4], [5], [6]}, 尽管为产生各种不同的活动区, 从各种不同深处爆发的原因暂时还不太清楚。

太阳活动是特别吸引人的, 因为它代表一种流体力学和磁流体力学, 而这种力学在地面实验室里是不能复制的(因为实验室的规模太小), 且尚未被理论上的奇遇所预料到。因此, 详细的观测资料将为物理学家打开一个完全崭新的前景。

如果太阳活动是磁场和流体的经典力学以及被从下层所加热的等离子体的直接结果, 那么, 按照如此详细地出现在太阳上的活动来看, 对其他恒星的仔细观测也显示出尚未被了解的活动征兆, 这是不足为奇的。O. C. Wilson 是一位对恒星活动开展过系统研究的先驱者, 他根据恒星色球谱线多年来的变化, 指出活动水平的无规则和周期变化^[7]。射电观测、宇宙飞船的紫外和 X 射线观测, 已经把对恒星活动的研究推向频繁作出新发现的阶段。基本事实是: 实际上所有恒星都是活动的(无论它们有无对流层), 表明有 X 射线星冕、增强的紫外辐

1983年12月8日收到英文稿。

* 此文的英文稿将刊登在“昆明国际太阳物理学术讨论会文集”内。

射和色球谱线。业已证明,许多恒星的活动比太阳激烈得多。研究恒星活动最有吸引力的一个方面,就是在各种质量、年龄、多重性和自转速率的恒星中发现活动极值。太阳和其他恒星上的极大活动的事例,对我们现在所不知道的自然界都是杰出的贡献,它们在研究恒星活动中提出了疑问和提供了乐趣。象对太阳一样,理论尚不能导出活动性,更不要说确定活动的极限了,对此我们必须求助于观测。

遗憾的是,我们还不能分辨太阳以外的任何恒星的表面,结果是除了用在太阳上观测到的活动现象解释其他恒星的特征外,我们几乎没有选择的余地。这种外推无论如何也是个靠不住的方法。以下几节我们将指出由于这样简单的近似所带来的问题。

首先,有几个观测事实超出了太阳活动的范围。例如,任何类型的恒星自转得越快,相应的活动就越频繁,而显示在这些活动中的能量,比自转速率的一次方还增加得更快。一些恒星具有非常高的 X 射线光度,以致于它们可以解释为完全被 X 射线冕环所覆盖,就象在太阳上形成的孤立的 X 射线活动区那样^{[8], [9]}。或者人们可以想象,这样大的 X 射线光度是由光学深度(在 X 射线)比太阳上 X 射线冕区大得多的局部强区产生的。

由于某些具有深对流层的快速自转星(BY Dra和RS CVn)的光球曾显示出大的冷区,因此,从空间遥远的一个固定点来观测它们的光度变化可达30%,在恒星自转的情况下甚至达50%^{[10], [11], [12]}。冷区明显地比一般光球要冷500—2000 K,在极端情况下它们至少覆盖一半的投影圆面。这将诱使人们联想到象增大的太阳黑子那样的冷区,其低的表面温度是对流热传输的磁抑制的结果。根据这一概念,人们推论有几千高斯的磁场覆盖着恒星一半的圆面,包含着 10^{25} 麦克斯韦或更多的总通量。在这类恒星中,有些恒星显示出光变曲线振幅的长期变化,表明在数十年期间冷区的纬度可能有变化,或者冷区有盛衰。这类恒星的大多数仅仅表明有缓慢和不规则的变化^{[11], [12], [13]}。在进行了几十年的仔细观测后,才能开始提供综合的图象,甚至到那时,人们也只能开始看到甚至更长期变化的证据。人们极想知道这类恒星的恒星风的性质可能是什么样子。

如果在某种程度上能通过观测测定磁场强度,那将会是有趣的;但是,这确实是非常困难的,因为在表面最暗的区域磁场最强。也许红外谱线能够克服这个问题。根据 X 射线星冕是磁场的垂足受到对流位移影响的结果这种假定, X 射线光度变化的定量研究,也许会对恒星周围磁场的结构获得更深入的了解。

一些暗弱 M 型矮星显示出惊人的耀斑活动,亮度瞬时增加到太阳大耀斑能量的 10^3 倍^[14]。相伴随的日冕瞬变必定提供一幅令人可畏的景象。

耀斑唯一已知的解释是磁能通过中性点重联而迅速耗散。只有磁场才能在恒星表面上贮藏所需的 10^{34} 尔格能量(对于大的太阳耀斑为 10^{32} 尔格)。大气的热能是太小了^[15],尚未想出能量从恒星表面之下快速耗散的理论方案。

除了上面谈的几个简单事实外,恒星活动也表现出几个奇异的特点。例如,如果伴随着复杂磁场的快速耗散的太阳最大耀斑能达到 10^{32} 尔格的能量,那么,在 M 型矮星上是什么条件能引起释放 10^{34} 尔格以上的能量呢?多年以前已经指出^[16],耀斑现象提出了两个基本问题。明显的问题是怎么能够足够快地耗散磁能(达到 10^{29} 尔格/秒)以产生所观测到的耀斑强度。如果我们能成功地回答这个问题,指出某些能以足够高的速率消除磁场应变的效应,那么,首先

怎么能够使磁场进入具有 10^{32} 尔格自由能的高度应变的位形呢？为什么这种机制耗散磁场应变(即自由能)不象耗散光球层对流运动引起的应变那样迅速呢？

中性点重联似乎具备所需的特性^{[17], [18], [19]}。对M型矮星上的耀斑,我们面临着整个过程所涉及的能量增大 10^5 倍(达到 10^{34} — 10^{35} 尔格)的问题。我们可以想象磁场要强30倍吗？不是500高斯,而是15000高斯。这样强的磁场仅仅能由恒星深层很剧烈的流体运动所控制。或者是整个过程在比太阳上尺度(具有500高斯磁场)大十倍的范围、在这么小的恒星上包含着 10^5 公里见方的区域进行;或者是某种这类组合?为什么事件发生在亚耀斑级(10^{28} 尔格)和耀斑级(10^{32} 尔格),而在太阳上不大出现呢?在爆发性耗散开始之前,M型矮星的磁场通过各种途径把应变累积到 10^{34} — 10^{35} 尔格能量。

在某些M型矮星上所观测到的发生大耀斑的频数(几小时一次)表明,这些恒星周围的空间连续被爆震波所扫过。恒星风的性质是什么?环星磁场的位形如何?这样的一种流出必定会扫清很大体积的星际空间,大概比太阳周围 10^2 天文单位的日球层要大得多。从其他方面来看,我们注意到自转更快、活动更频繁的恒星,仅仅表现出活动水平的无规则变化。象太阳那样的周期变化,似乎是只限于那些稳定的慢速自转恒星。而且,在活动频繁、无规则性的快速自转恒星和活动稀少、具有周期性的慢速自转恒星之间,它们的活动强度似乎存在着一个间隙^[11]。好象有两种恒星发电机工作模式,一个更有效的工作模式在某一自转阈值之上突然发挥作用,这就引起更强的磁场以及相应地更剧烈的活动。

存在值得注意的事实:太阳的磁场被分割成小尺度的间隔很大的强磁小纤维,其场强约为1—2千高斯,在宁静区占据太阳表面的 10^{-3} ,在活动区占据太阳表面的 5×10^{-2} ,而在太阳黑子区则密集在一起^{[20], [21], [22]}。我们不知道强磁小纤维是表面效应呢还是遍及对流层的磁场都处于这种状态?同时,人们极想知道在什么程度上其他恒星的磁场也处于相似的状态?由于压缩成强磁小纤维,对给定的总磁通量的磁能要增加 10^3 倍,初看起来这似乎是难以做到的事情。太阳黑子大概就是在隔开的小纤维被可见表面下的流体力学流挤压而形成密集和高度压缩的3000高斯磁场时形成的^{[23], [24]}。人们可以想象到,BY Dra和RS CVn星的巨大恒星黑子(冷区),是为我们所熟悉但仍然是极其奥妙的太阳黑子现象的延伸。为什么不是这种情况呢?包括全部有限的观测资料就是最简单的前提。也许恒星表面的巨大冷区仅仅是相邻恒星黑子间带有亮桥的较小恒星黑子的集聚。或它是不是一个庞大的连续的冷区?我猜想是后者,因为密集的偶极区会产生过多的耀斑。那么,哪一类威尔逊降落与冷黑子相伴随呢?哪一种形态的日冕位于其上?冷黑子真的是静态结构吗?或者在一边有磁小纤维涌出,在另外一些地方其他的磁小纤维正在离开,恰如某些演化中的太阳黑子一样?

如果非均匀自转对流的完整的演绎动力学理论和磁流体理论可以采用,人们可能会想到仔细回答这些问题。这样的理论会得出太阳黑子是太阳动力学特性的副产品,而且会自然得出RS CVn和BY Dra星的庞大的冷区。但是,整个一组动力学方程的解,无论是分析解还是数字解,都是不可能的;在可预见的未来一段时间内也是不可能的。严格说来这个问题是雷诺数为 10^5 的三维问题,除了在大型模拟计算机(这是它本身的性质)中是不能计算的。因此,理论家可能做的最好的工作,是根据自然界性质的观测资料探讨计算隐秘的问题。现在我们正从事于发现和探测个别的流体力学效应,它们可能对太阳黑子、小纤维的磁场状态等等有贡

献。一旦这些个别的效应得到了了解(如果我们活的时间足够长),把这种理解同数字模拟的协助结合起来,就有可能得到太阳活动和其他恒星上许多活动的较好认识,但是 这是在了解真情之前的可取途径。到目前为止,这种进取心只获得有限的成功,而在太阳上看到的大多数现象,仍然没有定量的描述和实质性的理解。因此,已经发现,当由于简单拱形场的垂足的运动超过某一临界值、从而使场发生切变时,它就在没有任何平衡的情况下向外迅速运动,在太阳上显然就产生了爆发日冕瞬变^{[25], [26]}。针状物可能是一系列向上传播的波的结果^[27],虽然这种波的起因尚不清楚,而且弄清这个问题还有许多工作要做。

经过许多科学家多年的工作后,看来 X射线日冕的强加热,至少有部分是磁场动力学普遍不平衡的后果,这种磁场由于受到外部强迫应变而引起中性点重联^{[28], [29]}。太阳耀斑似乎完全是中性点重联的结果^[30]。通过表面上升从而产生所有这类活动的磁场,看来符合包含内部对流和自转^{[4], [5], [6]}的球形壳层磁流体发电机方程的解。磁场的小纤维状态似乎是减少磁场和气体总能量的一种型式,它给出了通过此区域的观测到的净磁通量和热流量^[31]。纤维磁场的强浮力或许能被通量抛射发电机效应所克服,以致于磁场停留足够长的时间并由同样的对流涡旋重新产生^[32]。如果这些看法对太阳是正确的话,并能定量地加以计算,那么对其他恒星的活动,我们可以继续根据 X射线光度、色球谱线轮廓、自转速率、对流速度等等定量的观测,提出一个谨慎的似乎合理的解释。

可是,在采取从太阳简单外推时,我们必须十分小心,因为有理由认为,太阳上的活动现象和其他恒星上更极端的事例之间,有着性质上的差别。例如,再让我们考虑一下冷区覆盖着一半表面的恒星。这一区域的直径大约是恒星半径 R_* 的 $\sqrt{2}$ 倍。如上所述,1千高斯以上的磁场可以抑制热能的对流传输,在表面上产生冷黑子。几何形状表明磁场几乎总是延伸到恒星中心。由此我们得出结论:造成磁场聚集成一块大区域的磁流体对流,必定是席卷整个星球的,并以冷磁区附近为中心,且自始至终延伸到恒星中心。我们猜想,恒星是由一块巨大的对流元胞组成的,在冷区出现下降气流。但是,如果这是正确的话,那么也许单单下降气流就足以产生宽阔的冷黑子,由此提出了这样一个问题:磁场是否是现象的基本部分?我们肯定会记得,出现巨大冷黑子的恒星是快速自转恒星,具有较大的科利奥里力,至于整个星球的对流应该如何激起,那可能会有不同的看法。显然,只有通盘处理遍及整个恒星体积的动力学方程,才能恰如其分地回答这个问题。的确,这是困难的事情。

现在考虑什么样的磁流发电机效应将要在这种转动对流恒星中发生。BY Dra和RS CVn星的自转周期大约为几天。因此,通量抛射效应可以起作用,事实上,熟知的 α 效应可能是比较弱的。结果是在性质上与太阳发电机不同的发电机模型。例如,通量抛射效应可以作为局部放大器工作,同时产生了基本上不是在整个恒星上出现的磁场。另一方面,极其不均匀的自转可以建立起某种全星球的结构分布,尽管存在局部的放大作用。理论上发电机的可能性尚未导出,产生发电机效应的力学运动也未解决。这里无论是分析性的还是数字性的工作,都尚有开展探索性工作的余地。引起作为间隙(gap)成因的更有效的发电机效应的,可能是超过一定自转速率的通量抛射效应^{[33], [34]}。或者由于磁场较大的对流形变速率,那可能不是更有效的发电机效应,而是更有效的日冕加热。无论如何,人们预计到发电机与快速自转一起以不同的方式起作用,引起观测到的磁性活动的无规则变化,这与给出11年和22年磁周的准

周期磁场的产生不同。应当记住, 如果我们要借助引入大量电机使太阳发电机以高次模式运转, 以致于一次就有许多电机波出现, 周期只有0.5年而不是11年, 那么, 基本的周期性就会被掩盖。而且, 现存的以往几千年中太阳活动的记录, 经过中世纪极大值和斯波勒及孟德极小值^[18](它们显得比较不规则), 将被压缩成45年。

太阳磁场的小纤维性质和遍及太阳对流层及其他恒星的小纤维状态的问题是一个主要的理论课题, 在可见的将来可能仍处于现在随便被忽视的状态。在每一小纤维中“观测到”的向下气流业已消失, 因此, 将磁场压缩成如此高强度的物理机制, 象过去一样不清楚。已经指出^[35], 对于被太阳表面强磁场隔离的物质, 存在两种平衡状态, 以较冷的坍塌态说明很强的磁场。如果基本机制是这样, 那么极高的磁场强度仅仅是表面效应, 从太阳表面向下延伸不超过 10^8 公里左右。磁场再向下可能处于小纤维状态, 但是没有机制说明小纤维比对流的均匀分布更强。

要说明对流区的总能量(即热能、引力能和磁能)由于具有小纤维形状的磁场而减少, 是个简单的事情。因此, 磁场不妨碍热能的对流传输。这就是说, 磁场的小纤维态允许磁场从对流中解脱开来。理论估计表明^[31], 当小纤维在整个对流层被压缩成数千高斯的场强时, 就出现最小总能量。这在一定程度上是同表面观测到的磁场状态相符合的。但是在对引起压缩的物理机制缺乏较好了解的情况下, 我们还不能确定此结果适用于整个对流层。在太阳表面最小能量原理的成功, 提出如下的问题: 太阳黑子的形成是否会进一步减少总能量, 其他恒星上的巨大冷黑子的形成, 是否对应于相关的能量减小。即使回答是肯定的, 仍需找出出现上述状况的物理过程。

在这一点上应当指出, 磁场的小纤维状态, 对于恒星对流层中平均场发电机的工作很少甚至没有任何影响^{[86], [87]}。小纤维以连续场中同样的方式沿着流体蔓延, 对小纤维磁场仔细地定量研究, 没有发现在通常平均场强处理中的任何效应^{[38], [39]}。

整个太阳和其他恒星表面的偶极磁区爆发的物理性质, 几乎没有引起人们的注意。位于太阳固定经度的比较稳定的活动复合体, 代表了按时间顺序出现偶极磁区的渠道^[40]。活动复合体之间未断开的宽阔的经度区间表明, 总的水平通量实际上很少通过表面失去^[41]。X射线日冕存在于活动复合体的位置, 该处强磁场连续浮现并且返回到太阳后消失。Gaizauskas, Harvey, Harvey和Zwaan^[40]最近对活动复合体的观测研究, 提出了某些有趣的问题。例如, 他们发现每个出现的活动区带有约 10^{23} 麦克斯韦的通量, 它们在几星期后当下一个活动区在同一位置(活动复合体)显露出来后就消失了, 而不是在太阳表面上伸展开来。它们的观测资料表明, 在6个月期间出现在一个活动复合体中的总磁通量是 10^{24} 麦克斯韦, 如果我们假定每次磁场的爆发都包含有新的通量的话。Zwaan^[42]指出, 10^{24} 麦克斯韦对于宽为 $\pm 4^\circ$ 的窄纬度带是非常大的磁通量, 在对流层 10^5 公里深处, 平均磁场至少为 10^4 高斯, 以致于提出更保守的看法: 每次爆发的通量可在以后的爆发中一次次地再显现出来。人们可以想象, 弛豫振荡被潜藏在深度约 10^5 公里下的水平磁场的热能所驱动, 因此, 成对的大通量束 $[1-2 \times 10^{23}$ 麦克斯韦]交替在表面上出现。也许每一通量束在表面上停留几星期后, 被磁力线的张力拉回到表面层之下^[42](见文献[40]、[43]中的观测讨论)。

短暂活动区仍然是奇怪的事, 它给出周期变化的某些证据, 但具有不同的相位^[8]且起源

于较浅的深度(约 $1-2 \times 10^4$ 公里^{[1], [2]})。其他恒星也显示出短暂活动区吗?

现在考虑这些概念将如何被应用到快速自转星(或者一颗年青恒星或者一颗被潮汐力俘获成双星的伴星)上,其 X 射线辐射如此之强,以致于整个恒星被 X 射线冕环所复盖。与太阳相类似,最简单的看法是活动复合体在整个表面紧密地靠着。在活动区之间将没有宽阔的不间断的宁静区间。因此,我们会料到相邻区域间磁场广泛的重联和通量的快速损失(与太阳的情形相反)。在这些情况下,可能会连续出现耀斑活动,似乎是合理的。这些耀斑可能提供了大部分发射出的 X 射线流量。的确,如果 X 射线辐射主要来自耀斑,恒星完全被冕环所复盖将成为不必要的。仔细研究恒星 X 射线光度的短期变化,可能显示出一系列大量耀斑的噪声特性。遗憾的是,不存在短期起伏将不是相反情形的确定证据。因为人们可以想象存在着数量极大的亚耀斑,从而极大地减少了统计起伏。事实上,如果我们继续研究这种理论的可能性,显然存在一系列的情况,从单个爆发的大耀斑,经过许多亚耀斑,直到通过一系列许多磁中性片的连续重联,就象可以加热太阳的 X 射线冕区那样。我们一定期望观测能对这些问题提供一些线索。

最后提一下,日冕加热问题仍然处于悬而未决的局面^[29]。现已取得许多进展,证认出冕洞、宁静区和活动区加热的不同特征,且建立起各式各样的加强静磁场、阿尔文波等耗散的理论结果等等。十分努力地全面考察所有问题,看看哪些结果可能被波能流观测极限以及被对它们耗散的理论解释所排除,这样的时期已经到来了。Beckers 和 Schneeberger^[44]对太阳黑子上空日冕中阿尔文波的流量,提出 10^7 尔格/厘米²·秒的上限。活动日冕要求约 10^7 尔格/厘米²·秒的流量加热它^[45],如果波流量处于观测极限,如果当阿尔文波传播到偶极磁场区的顶端或多或少完全地耗散,即在大约 10^5 公里的距离内完全被耗散的话,人们就可以理解活动日冕被阿尔文波所加热。遗憾的是,我们还不知道任何足够有效的耗散机制,而且已经指出^[28],日冕加热的强度(尔格/厘米²·秒)大约与小的短暂活动区(X 射线亮点)和正常活动区相同,而它们的尺度可相差 10 倍。因此,加热主要取决于传播的阿尔文波的衰减是难以置信的。看来必须寻找加热日冕活动区的其他方法。我们期望类似的考虑也适用于其他恒星。

致谢:(略)

参 考 文 献

- [1] Golub, L., Rosner, R., Vaiana, G. S. and Weiss, N. O., Solar magnetic fields: The generation of emerging flux, *Astrophys. J.*, 243 (1981), 309-316.
- [2] Parker, E. N., The depth of origin of solar active regions, *Astrophys. J.*, 279 (1984), in press.
- [3] Martin, S. F. and Harvey, K. L., Ephemeral active regions during solar minimum, *Solar Phys.*, 64 (1979), 93-108.
- [4] Moffatt, H. K., *Magnetic Field Generation in Electrically Conducting Fluids*, 94-107, Cambridge University Press, (1978).
- [5] Parker, E. N., *Cosmical Magnetic Fields, Their Origin and Their Activity*, 739-794, Oxford University Press, (1979).
- [6] Krause, F. and Rädler, K. H., *Mean-Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory*, 247-253, Pergamon Press, (1980).
- [7] Wilson, O. C., Chromospheric variations in main sequence stars, *Astrophys. J.*, 226 (1978), 379-396.
- [8] Linsky, J. L., Evidence for chromospheres and coronae in stars: Recent observations, some unanswe-

- red theoretical questions, and a speculative scenario, in *Solar Phenomena in Stars and Stellar Systems*, 99-122, ed. by R. M. Bonnett and A. K. Dupree, D. Reidel Publishing Co., (1981).
- [9] Dupree, A. K., Chromospheres and coronae in binary systems, in *Solar Phenomena in Stars and Stellar Systems*, 407-430, ed. by R. M. Bonnet and A. K. Dupree, D. Reidel Publishing Co., (1981).
- [10] Hall, D. S., The RS Canum Venaticorum binary systems, in *Solar Phenomena in Stars and Stellar Systems*, 431-448, ed. by R. M. Bonnet and A. K. Dupree, D. Reidel publishing Co., (1981).
- [11] Zwaan, C., Stellar magnetic structure and activity, in *Solar Phenomena in Stars and Stellar Systems*, 463-486, ed. by R. M. Bonnet and A. K. Dupree, D. Reidel Publishing Co., (1981).
- [12] Hartmann, L., Stellar spots-physical implications, in *Solar Phenomena in Stars and Stellar Systems*, 487-498, ed. by R. M. Bonnet and A. K. Dupree, D. Reidel Publishing Co., (1981).
- [13] Skumanich, A. and Eddy, J. A., Aspects of long term variability in sun and stars, in *Solar Phenomena in Stars and Stellar Systems*, 349-398, ed. by R. M. Bonnet and A. K. Dupree, D. Reidel Publishing Co., (1981).
- [14] Gibson, D. M., Stellar analogs of solar microwave phenomena, in *Solar Phenomena in Stars and Stellar Systems*, 545-550, ed. by R. M. Bonnet and A. K. Dupree, D. Reidel Publishing Co., (1981).
- [15] Parker, E. N., Acceleration of cosmic rays in solar flares, *Phys. Rev.*, **107** (1957), 830-836.
- [16] Sturrock, P. A. and Coppi, B., A new model of solar flares, *Astrophys. J.*, **143** (1966), 3-22.
- [17] Vasyliunas, V. M., Theoretical models of magnetic line merging, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13** (1975), 303-336.
- [18] Priest, E. R., *Solar Flare Magnetohydrodynamics*, Gordon and Breach Science Publishers. (1981).
- [19] Priest, E. R., *Solar Magnetohydrodynamics*, 344-381, D. Reidel Publishing Co., (1983).
- [20] Beckers, J. M. and Schröter, E. H., The intensity, velocity and magnetic structure of a sunspot region I: Observational technique, properties of magnetic knots, *Solar Phys.*, **4** (1968), 142-167.
- [21] Stenflo, J. O., Magnetic-field structure of the photospheric network, *Solar Phys.*, **32** (1973) 41-64.
- [22] Chapman, G. A., On the nature of the small-scale solar magnetic field, *Astrophys. J.* **191** (1974), 255-259.
- [23] Meyer, F., Schmidt, H. U., Weiss, N. O. and Wilson, P. R., The growth and decay of sunspots, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **169** (1974), 35-57.
- [24] Parker, E. N., Sunspots and the physics of magnetic flux tubes, *Astrophys. J.*, **230** (1979), 905-913.
- [25] Low, B. C., Eruptive solar magnetic fields, *Astrophys. J.*, **251** (1981), 352-363.
- [26] Low, B. C., Munro, R. H. and Fisher, R. R., The initiation of a coronal transient, *Astrophys. J.*, **254** (1982), 335-342.
- [27] Hollweg, J. V., On the origin of solar spicules, *Astrophys. J.*, **257** (1982), 345-353.
- [28] Rosner, R., Tucker, W. H. and Vaiana, G. S., Dynamics of the solar corona, *Astrophys. J.*, **220**(1978), 643-665.
- [29] Parker, E. N., The rapid dissipation of stellar magnetic fields and the production of X-ray coronas, in these Proceedings (1984).
- [30] Priest, E. R., The magnetohydrodynamics of solar flares, in these Proceedings (1984).
- [31] Parker, E. N., Stellar fibril magnetic systems. I. Reduced energy state, *Astrophys. J.*, in press (1984).
- [32] Parker, E. N., The role of flux ejection in stellar dynamos, *Astrophys. J.*, **276** (1984), in press.
- [33] Parker, E. N., The flux ejection dynamo effect, *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, **20** (1982), 165-189.
- [34] Parker, E. N., The flux ejection dynamo with small diffusivity, *Astrophys. Space Sci.*, **85** (1982), 167-201.
- [35] Spruit, H. C., Convective collapse of flux tubes, *Solar Phys.*, **61** (1979), 363-378.
- [36] Stix, M., Theory of the solar cycle, *Solar Phys.*, **74** (1981), 79-101.
- [37] Parker, E. N., The dynamics of fibril magnetic fields. I. Effect of flux tubes on convection, *Astrophys. J.*, **256** (1982), 292-301.
- [38] Parker, E. N., The dynamics of fibril magnetic fields. II. The mean field equations, *Astrophys. J.*,

- 256 (1982), 302-315.
- [39] Parker, E. N., The dynamics of fibril magnetic fields. IV. Trapping in closed convective rolls, *Astrophys. J.*, 256 (1982), 746-760.
- [40] Gaizauskas, V., Harvey, K. L., Harvey, J. W. and Zwaan, C., Large scale patterns formed by solar active regions during ascending phase of cycle 21, *Astrophys. J.*, 265 (1983), 1056-1065.
- [41] Parker, E. N., Magnetic buoyancy and the escape of magnetic fields from stars, *Astrophys. J.*, (1984) in press.
- [42] Zwaan, C., private communication (1983).
- [43] Wallenhorst, S. G. and Topka, K. P., On the disappearance of a small sunspot group, *Solar Phys.* 81 (1982), 33-46.
- [44] Beckers, J. M. and Schneeberger, T. J., *Astrophys. J.*, 215 (1977), 356-363.
- [45] Withbroe, G. L. and Noyes, R. W., Mass and energy flow in the solar chromosphere and corona, *Annual Rev. Astron. Astrophys.*, 15 (1977), 363-387.

(刘金铭译 章振大校)

Solar Physics as Related to Stellar Physics

E. N. Parker

(Department of Physics, Department of Astronomy and
Astrophysics, University of Chicago, USA)