

·学科进展与展望·

高能电子对太阳耀斑辐射的作用

丁明德*

(南京大学天文系,南京 210093)

[摘要] 太阳耀斑是一种剧烈的太阳活动现象,耀斑的爆发伴随着高能电子的加速,加速后的高能电子对耀斑的辐射产生很大的影响。本文简要综述近年来在这一方面所取得的一些研究进展。

[关键词] 太阳耀斑,高能电子,辐射

太阳耀斑是太阳表面最剧烈的活动现象,耀斑爆发时会释放出巨大的能量,在各个波段产生增强的辐射,并伴随物质和高能粒子的输出,对日地空间和地球环境产生影响。因此,对太阳耀斑的研究一直是天文学中的一项重要课题。

太阳耀斑是一个复杂的现象,不同的耀斑在形态和演化特性中体现出的差异很大。但是,各类耀斑也有共性存在。例如,几乎所有的耀斑爆发时都伴随着高能粒子的加速现象。加速的粒子可以逃逸至空间,产生地磁效应。同时,高能粒子可以激发或增强耀斑在各个波段的辐射。例如,在射电波段,高能电子的同步回旋辐射或等离子体辐射起决定性作用;硬 X 射线辐射则主要来源于韧致辐射(即高能电子撞击原子核所产生的辐射);此外,高能质子同原子核反应可以产生 γ 射线辐射。高能粒子对其他波段(如软 X 射线、远紫外、可见光等)的辐射也有比较大的作用。本文主要综述近年来在太阳耀斑辐射的作用方面所取得的研究进展。

1 高能电子对谱线的作用

耀斑大气在色球层以下是部分电离的。当高能电子进入色球层以后,它同周围物质发生碰撞,产生能量交换。这个过程可以分为以下两种情况。第一是和周围的电子和离子碰撞,由于库仑力的作用,碰撞是弹性的,碰撞过程产生能量交换。这种碰撞的结果是高能电子对耀斑大气产生加热作用,使温度升高。第二是和中性原子或电离原子碰撞,碰撞一

般是非弹性的,碰撞的结果是将原子激发到高能态或将原子电离。这两种过程都可以导致耀斑辐射的增强,但是第二种过程更有效一些。

有关耀斑中高能电子的非热激发和电离效应对辐射的作用较早是在 20 世纪 70 年代提出来的^[1],随后一些作者在耀斑的理论模型和半经验模型研究中都考虑了这一因素^[2-4]。要定量研究非热作用的具体贡献,首先必须求出高能电子在大气某一高度处的能量沉积大小。有两种方法处理粒子束的能量转移过程。一种是求解 Fokker-Planck 方程^[5],这种方法比较精确,但运算复杂,不太容易运用于实际的模型计算;另一种是比较实用的“试验粒子”方法,即先计算一个高能电子同周围粒子的碰撞过程,然后再求出整个电子束的贡献^[6]。这种方法虽然有一定的近似性,但是表达方式简单,只要给定了初始时刻电子束的分布情况,就可以求出任何高度处的能量沉积大小。因此,以往大部分的研究都是采用后一种方法。

1.1 氢原子的巴耳末谱线

耀斑大气中受电子轰击影响最大的原子是氢原子,这是因为氢具有较低的激发电势和电离电势。在通常情况下,氢原子的能级平衡取决于辐射跃迁和(热)碰撞跃迁,前者占主导地位。由于在色球中辐射场稀化,辐射跃迁到高能级或电离态的概率较低,大多数原子位于低能态(相对于局部热动平衡状态而言)。当高能电子进入后,它们撞击氢原子,产生非热激发和电离效应。一般来说,非热碰撞跃迁

* 2002 年度国家杰出青年科学基金获得者。
本文于 2002 年 9 月 27 日收到。

的概率比热碰撞跃迁概率大几个量级,各能级的原子数重新分布,使得处于高能级和电离态的原子数目明显增多。这样,谱线的源函数值就升高,导致辐射出的谱线强度增大。

求出了电子束的能量沉积以后,就可以计算非热激发和电离过程的跃迁速率^[4],将它加入到能级平衡方程中,再和通常一样做非局部热动平衡计算,即联合求解辐射转移方程和能级平衡方程,得到原子在各能级的分布情况,最后求出谱线轮廓。由于非热过程的介入,整个色球层的电离度增加,Stark效应趋于明显,因此对一些谱线(如氢的巴耳末谱线)来说,谱线宽度会有显著提高。

耀斑观测和研究中用得最多的谱线是 H α 线,对它的研究也比较透彻。理论计算结果表明,在高速电子作用的时候,H α 线变宽变强^[4]。对于耀斑发生时可能出现的三种环境(即非热电子加热,热传导加热,高日冕压力),H α 谱线存在两个清晰的诊断标准:(1)只有高流量的非热电子存在时才能产生具有非高斯形状(Stark 加宽)的线翼发射;(2)只有高日冕压力存在时才能产生没有线心反转的轮廓。一般来说,在耀斑脉冲相早期,如果是高能电子加热占优势,并且日冕压力仍旧比较小的时候,谱线的特征一般是具有很宽的线翼发射和明显的线心反转。出现这种现象的原因是高能电子向下传播时能量沉积有一定的选择性,即大部分能量沉积在一个特定的层次(其位置取决于电子本身能量大小),因此有可能在色球上层(H α 线心形成区域)加热不明显,源函数低于稍下的区域,这样就出现了线心的反转。随着加热过程的进行,持续的色球蒸发使日冕压力不断上升,谱线的线心反转也逐步减小甚至消失。这种不同的谱线特征为从观测上鉴别非热电子产生的区域和时间提供了诊断基础。

1.2 氢原子的赖曼谱线

赖曼谱线,特别是 Ly α 和 Ly β ,源于氢原子基态和低激发态之间的跃迁,受到非热电子的作用比巴耳末谱线更大,并且谱线的变化有其特殊的性质。一般来说,谱线的线翼强度增长很多,可能达到 1 或 2 个量级,但谱线的线心变化不大^[7]。产生这个结果的原因是线心形成于过渡区中,那里的电离度原本就很高,非热过程的影响相对而言就比较小。但线翼形成在色球层,受到的影响就很大。

1.3 电离钙(Ca II)谱线

在高速电子作用下,电离钙原子的谱线也会出现一定程度的增强。但相对于氢原子而言,高能电

子对电离钙原子的碰撞截面较小,因此谱线增强的效果不如氢原子谱线明显^[4]。高能电子对不同谱线的作用在晚型(如 M 型)恒星发生的耀斑中体现得更加明显^[8],因为这些恒星的大气温度比太阳更低,非热过程的作用相对来说更加重要。

1.4 中性镍(Ni I)6768 埃谱线

Ni I 6768 埃谱线被 SOHO/MDI 空间卫星用来测量磁场和速度场。在活动区中,谱线的强度和形状会出现较大的变化,这直接影响到测量结果的大小甚至符号。近来,有观测资料表明,耀斑爆发时在黑子本影或半影区域出现磁场极性的反转现象;这样的反转很难用真实的物理原因来解释,比较大的可能性是测量的误差,即谱线轮廓从吸收线变为发射线,导致测量结果的符号改变。进一步的理论研究表明^[9],在一个特定的环境下可以产生 Ni I 的发射线轮廓,即在较冷的大气(如黑子大气)中存在高能电子的轰击。有趣的是,这两个条件同观测事实完全一致。这说明观测到的磁极性反转确实是一种源于测量误差的假象。

与氢原子不同的是,高能电子对镍原子的直接的激发作用可以忽略。Ni I 6768 埃谱线对应的低能级是亚稳态,处于这一能级的原子主要是通过从更低能级的碰撞激发或从高能级的降激发产生。在谱线内部,辐射跃迁的概率比碰撞跃迁概率大得多;因此,谱线的源函数主要取决于背景辐射场。由于高能电子的作用,在色球层的一些区域中,连续谱背景(位于可见光波段)的辐射强度得到加强,间接地促进了 Ni I 谱线源函数的增长。在没有高能电子时,源函数从里到外基本上是单调减少的,但是高能电子的作用使得源函数曲线在色球层出现一个峰值。此外,由于大气中电子数密度的增加,连续谱背景的吸收系数增加,使得谱线的形成高度向上移动。以上两个方面的联合作用使得 Ni I 谱线从吸收线变为发射线。这种现象主要出现在一个冷的环境中,这是因为在这样的环境中高能电子的作用特别明显。

2 高能电子对连续谱的作用

2.1 可见光和近红外连续谱

在一般情况下,耀斑爆发时可见光波段的连续谱没有明显的变化。在一些特殊的事件(即白光耀斑)中,连续谱会有不同程度的提高。白光耀斑是一种相对较强的耀斑,但是它的产生同环境密切相关。一般来说,白光耀斑容易产生在较冷的(如黑子半影)或靠近日面边缘的活动区中^[10]。这是因为在冷

的环境中,比较容易产生较大的反差;在日面边缘,色球的贡献增大,而色球往往比较容易加热。从光谱形态来看,白光耀斑可分为两类:第一类的连续谱有巴耳末跳跃,主要起源于色球层中氢原子的自由-束缚跃迁;第二类没有巴耳末跳跃,主要起源于光球层负氢离子的辐射。

详细的观测表明,第一类白光耀斑连续谱的光变曲线同硬 X 射线的曲线对应很好,说明耀斑的加热是由高能电子产生的。如同对谱线的作用一样,高能电子对连续谱的作用也可从两个方面来看。首先,高能电子对色球产生直接的加热作用;其次,高能电子对氢原子有非热激发和电离效应。两者都可以导致氢的复合过程增加,从而使连续辐射增强。但一般来说,巴耳末连续区的辐射会有较大程度的增长,但是帕邢连续区和布喇格连续区增长很少,甚至会有一定程度的下降。因此,在连续谱中就会出现巴耳末跳跃现象。

第二类白光耀斑的连续辐射同硬 X 射线辐射没有对应关系,它的加热机制至今仍不太清楚。对于低层大气(温度极小区以下)来说,一般的高能电子难于渗透到这样的深度。因此,有可能这一类白光耀斑起源于低层大气本身^[11]。低层大气尽管密度高,电离度低,磁场重联还是有可能发生的^[12]。

另一种可能的机制是辐射加热,即所谓的 back-warming 机制。在高能电子的作用下,这种机制的作用可能更加明显。高能电子使得色球层的连续辐射增强,增强的辐射场传输到光球层,被负氢离子吸收,产生加热作用。对具有一定强度的电子束来说,加热的效果可以用半经验模型定量地估算出来。这种加热效应被证明可以解释一些白光耀斑的产生^[13]。

此外,在极少数事例中,还观测到耀斑初期连续谱有短暂的下降现象^[14]。一般认为,这样的下降是由电子轰击引起的。因为在耀斑早期,大气还处于较冷的状态,电子轰击使得色球层在连续区的光学深度增加,削弱了来自光球层的辐射,导致可见光连续谱下降。但是,随着辐射加热的进行,低层大气的温度慢慢上升,连续谱的相对增长率也就从负恢复为零,或变为正值,成为白光耀斑。由于出现负增长率的时间很短(几秒),幅度较少(小于 2%),一般很难观测到。目前只有少数几个事例有迹象表明耀斑早期出现这种连续谱的负增长。

2.2 远紫外连续谱

耀斑的远紫外辐射研究得比较少,主要是以往

这方面的观测很少。但近来随着空间观测卫星的不断发射,这一方面的重要性会慢慢显露出来。远紫外辐射主要是氢的赖曼连续谱,它是电离氢复合到基态产生的辐射,形成于色球高层,因此受到非热电子的影响很大。详细的计算表明^[15],非热电子不但使得赖曼连续谱的绝对强度增加,而且使得光谱的斜率下降,即色温度降低。其原因是高能电子的非热激发效应使得处于基态的原子数目降低,这样基态的偏离因子也减小。由于色温度近似正比于偏离因子,因此色温度随着降低。赖曼连续谱的这种特性为诊断耀斑中的非热过程提供了另一种方法。

3 谱线辐射快速变化的起源

耀斑的硬 X 射线辐射和微波射电辐射都已探测到存在快速变化现象,变化的周期为几十毫秒或几百毫秒。由于这两者都和高能电子有关,因此产生的原因被归结为电子产生和注入的变化。光学波段辐射的快速变化较难探测,主要是由于空间分辨率和噪声的限制。近来,美国大熊湖天文台在视宁度很好的情况下快速记录了一个耀斑在 H α 蓝翼的辐射,通过对比分析,确认了一个核块中存在亚秒级的快速变化现象^[16]。

对于光学波段的辐射来说,它的辐射强度主要取决于等离子体的物理环境(温度、密度、速度)。尤其象 H α 辐射,是光学厚的,需要通过求解辐射转移方程才能得到。因此,如何解释 H α 的快速变化是一项有趣的课题。色球加热的途径主要是热传导和高能电子轰击。前者很难想象会有快速起伏;即使有,原子的激发和电离也很难作出瞬时的回应。较大的可能性还是高能电子的作用。通过数值计算,可以详细研究耀斑大气受到短时间的高能电子轰击以后产生的响应,即求解含时的能量方程、能级平衡方程和辐射转移方程,得到耀斑大气的温度、氢原子在各能级的数密度以及谱线强度等物理量随时间的变化。最新的研究表明^[17],原子的激发和电离对高能电子的响应非常迅速(虽然有一定的位相差),由此产生的 H α 辐射强度也随电子束的流量而起伏,在一定的假设条件下(如存在宏观湍动速度),起伏的幅度可以达到同观测值相当。这项研究表明,光学波段辐射的快速变化现象也是由小尺度的短标的高能电子注入产生的,即所谓的“元爆发”现象。

4 展望

在未来一段时间内,太阳物理学中的各个分支

的侧重点将有所变化,但可以说对太阳耀斑的研究仍将是主要方向之一。国际上已有几颗专门观测耀斑的卫星,一些大型的地面望远镜正在建造或规划之中。可以说,对太阳活动现象的观测将向着更多的波段、更高的空间和时间分辨率发展。在理论研究方面,多能的辐射转移、辐射动力学模型等课题将受到重视。对耀斑的整体认识(包括耀斑的爆发机制、能量传输机制、辐射机制)可望取得新的突破。

参 考 文 献

- [1] Lin R P, Hudson H S. Non-thermal processes in large solar flares. *Solar Phys.*, 1976, 50: 153—178.
- [2] Ricchiazzi P J, Canfield R C. A static model of chromospheric heating in solar flares. *Astrophys. J.*, 1983, 272: 739—755.
- [3] Aboudarham J, Henoux J C. Non-thermal excitation and ionization of hydrogen in solar flares. I. Effects on a flaring chromosphere. *Astron. Astrophys.*, 1986, 168: 301—307.
- [4] Fang C, Henoux J C, Gan W Q. Diagnostics of non-thermal processes in chromospheric flares. I. $H\alpha$ and $CaII$ K line profiles of an atmosphere bombarded by 10—500 keV electrons. *Astron. Astrophys.*, 1993, 274: 917—922.
- [5] Gomez D O, Mauas P J. Kinetic description of electron beams in the solar chromosphere. *Astrophys. J.*, 1992, 398: 682—691.
- [6] Emslie A G. The collisional interaction of a beam of charged particles with a hydrogen target of arbitrary ionization level. *Astrophys. J.*, 1978, 224: 241—246.
- [7] Henoux J C, Fang C, Gan W Q. Diagnostics of non-thermal processes in chromospheric flares. III. $Ly\alpha$ and $Ly\beta$ spectra for an atmosphere bombarded by electron or proton beams. *Astron. Astrophys.*, 1995, 297: 574—578.
- [8] Ding M D, Fang C. The role of nonthermal electrons in the hydrogen and calcium lines of stellar flares. *MNRAS*, 2001, 326: 943—949.
- [9] Ding M D, Qiu J, Wang H. Non-LTE calculation of the Ni I 676.8 nanometer line in a flaring atmosphere. *Astrophys. J.*, 2002, 576: L83—L86.
- [10] Ding M D, Fang C. Parametric study of the continuum emission of white-light flares. *Astron. Astrophys.*, 1996, 314: 643—649.
- [11] Ding M D, Fang C, Gan W Q et al. Optical spectra and semi-empirical model of a white-light flare. *Astrophys. J.*, 1994, 429: 890—898.
- [12] Ji H S, Song M T, Li X Q. Current-sheet buildup and magnetic reconnection in weakly ionized solar lower atmosphere. *Solar Phys.*, 2001, 198: 133—148.
- [13] Liu Y, Ding M D, Fang C. Enhanced emission at the infrared continuum in the flare of 2001 March 10. *Astrophys. J.*, 2001, 563: L169—L172.
- [14] Henoux J C, Aboudarham J, Brown J C et al. Black and white flares? *Astron. Astrophys.*, 1990, 233: 577—582.
- [15] Ding M D, Schleicher H. Lyman continuum as a diagnostic for nonthermal processes in solar flares. *Astron. Astrophys.*, 1997, 322: 674—678.
- [16] Wang H, Qiu J, Denker C et al. High-cadence observations of an impulsive flare. *Astrophys. J.*, 2000, 542: 1080—1087.
- [17] Ding M D, Qiu J, Wang H et al. On the fast fluctuations in solar flare $H\alpha$ blue wing emission. *Astrophys. J.*, 2001, 552: 340—347.

THE ROLE OF ENERGETIC ELECTRONS IN THE RADIATION OF SOLAR FLARES

Ding Mingde

(Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Solar flares are among the most energetic phenomena on the Sun. The eruption of a flare is usually accompanied by the acceleration of energetic electrons, which have a great influence on the flare radiation. This article summarizes the recent progress made in the study on this problem.

Key words solar flares, energetic electrons, radiation