

日冕发射线研究的近期进展

堵锦生

(北京师范大学天文系)

提 要

本文从以下四个方面回顾了日冕发射线研究(1960—1989年)的进展: 1. 日冕发射线与日冕物质抛射之间的关系; 2. 日冕发射线与太阳磁场之间的关系; 3. 日冕发射线与太阳活动周期、太阳自转之间的关系; 4. 日冕与行星际效应。最后对今后的研究提出几点想法。

一、引 言

日冕发射线包括来自日冕的从 X 射线到远红外波段的所有发射线。在日冕发射线中含有许多精细、重要的信息。它的研究是个经典课题, 在近几年中又有了新的进展。

自 1869 年首次观测到日冕绿光谱线至今已有约 120 年的历史了。它提供给我们很多有关日冕的物理参量(电子密度、温度、视向速度、沿视线方向的大小等); 20 年来它又在以下四个方面取得了新进展。

本文主要对提要中所述四方面的进展作一概述, 最后对这方面的研究工作提出几点建议。

二、近年来的进展

1. 日冕发射线与日冕膨胀、物质抛射之间的关系

自 Parker 首先从理论上预言存在着太阳风之后, 有关日冕膨胀的研究很快开展起来。Yallop 最早提出日冕的膨胀影响 $\lambda 5303 \text{ \AA}$ 线的谱线轮廓的宽度^[1]。他指出球对称日冕当其温度大于 $1.75 \times 10^6 \text{ K}$ 时, 太阳边缘之上 $0.7 R_{\odot}$ 处的绿日冕线因膨胀所导致的加宽可超过观测误差。

Rybansky 等研究了日冕膨胀速度与日冕发射线轮廓之间的关系^[2]。他们的研究表明: 太阳日冕的径向膨胀运动可用来解释 $\lambda 5303 \text{ \AA}$ 谱线轮廓的致宽。推导出对等温、球对称日冕有以下关系式

$$I(\lambda, \rho) = A \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-\beta \sqrt{(\rho^2 + x^2)}] (\rho^2 + x^2)^{-1/4} \cdot \exp\{-[(\lambda - \lambda_0)/\delta] + V(r) \lambda_0 x \delta^{-1} c^{-1} (\rho^2 + x^2)^{-1/2}\} \cdot dx \quad (1)$$

1990年5月15日收到。

1990年10月29日收到修改稿。

(1)式中 $\rho \cdot x \cdot I \cdot \delta$ 分别是以太阳半径为单位的离日心的距离、指向观测者方向的距离、距离 ρ 处谱线的强度、多普勒半宽, $A, \beta, V, \lambda, \lambda_0$ 分别是常数、与强度有关的系数、径向速度、位移后的波长、实验室波长。(1)式表明, 只要给出已测定的太阳边缘之上高斯轮廓的强度梯度, 则光谱线强度的扰动仅取决于径向速度 V 。

Kulcar 的研究表明: 太阳赤道区绿日冕线强度的减小, 伴随有几率约为 70% 的太阳风粒子通量的增加^[3]。他的统计分析的资料时间范围是 1963 年 7 月—1976 年 10 月。太阳高纬地区绿日冕线强度与太阳风通量之间的关系, 是 Kulcar 的第二步的工作, 结果尚待发表。

美国 Fisher、Wagner、苏联 Kovalenko、捷克 Kulcar 等人在日冕物质抛射方面作了系统的研究工作。

Fisher 曾用固体法布里-珀罗滤光器加在日冕仪上, 同时得到 Fe XIV $\lambda 5303 \text{ \AA}$ 发射线日冕对线心偏红和偏蓝的像, 此两像的多普勒效应的研究表明: 日冕物质视向速度所对应的特征温度是 $2.0 \times 10^6 \text{ K}$ ^[4]。从太阳边缘 $1R$ 到 $1.4R$ 之间, 绿日冕事件伴随有白光日冕事件, 得到了几个大的环状结构的像。在大的盔状物的边缘, 检测到向外的物质流速度是 $12 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

Dunn 指出: 绿日冕单色像在一般情况下是很宁静的, 在个别情况下, 有一些偶然事件被观测到。这些偶然事件可分为三类: (1) 缓慢事件; (2) 环系和拱系事件; (3) 快速事件^[5]。

Wagner 把快速事件分为以下五个过程^[6]: 闪烁过程(O), 显示出类似波振荡的结构, 这种结构看来好像阻尼小, 仅在稀少情况下能够被观测到; 分裂过程(D), 一个拱系呈现出模糊的、不规则的运动, 通常保持拱状外形; 抛射过程(E), 从色球或低日冕有类似云(大而弥漫的或小而集中)的物质, 被驱动向上升起; 重新排列过程(R), 大的拱或拱系急速地移向新位置, 喷出的物质通常从日面边缘大于 $1.20R$ 处沿径向运动, 同时反映到 Fe XIV $\lambda 5303 \text{ \AA}$ 发射线上; 加速过程(X), 呈现为很快地膨胀着的拱或泡状物, 通常接近拱状物的一个足点出现破裂, 引起一个类似冕脱的事件^[6]。用萨克峰附有 6 英寸滤光器的日冕仪拍摄 $\lambda 5303 \text{ \AA}$ 单色像, 研究瞬变事件, 发现瞬变事件多数产生在 1.04 — $1.20R$ 之间, 当它在边缘时, 经常伴随有 $H\alpha$ 事件, 特别是伴随有大日浪和爆发日珥。与 $\lambda 5303 \text{ \AA}$ 日冕事件同时还伴随有厘米波和米波射电爆发。可由绿日冕单色像的资料估算出快速事件随高度传播的情况^[7]。Altrok 分析了 1982 年 10 月 19 日一个典型日冕瞬变事件。他试图用日冕发射线资料预报日冕瞬变事件^[8]。表 1 给出这个典型日冕瞬变事件过程中绿日冕单色像的变化情况。初始亮度增加反映出在日浪出现之前由于磁场的变化使局部日冕等离子体密度增加; 亮度极大反映了上升日浪的力学效应。

近 20 年来, 由于宇航事业的发展, 日冕远紫外、X 射线的研究取得了很大的进展^[9]。软 X 射线发射线的研究表明, 几乎所有这个波段的发射线都来自明亮日冕环的顶部。值得提出的是: 日冕远紫外发射谱中, $Z > 8$ 的类氦离子谱线只出现在有耀斑的日冕活动区中, Fe XIV $\lambda 283 \text{ \AA}$ 线也只在活动区谱线中见到。日冕物质抛射在这两个波段中也有明显的征兆。

研究 Fe XIV $\lambda 5303 \text{ \AA}$ 谱线轮廓的总发射量、线心强度的变化, 发现日冕物质有周期为

表 1

时 间 (UT)	离日面边缘距离(R_{\odot})	日冕瞬变过程	绿日冕线强度
82.10.19 17 ^h 30 ^m	1.08	瞬变先兆	亮度增加
17 ^h 48 ^m	1.08	出现一小日浪	
		径向速度 $70 \pm 10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	
18 ^h 10 ^m $\pm 24^{\circ}$	1.15		亮度呈现极大
18 ^h 16 ^m $\pm 24^{\circ}$	1.35	径向速度 $740 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	
	1.5		

表 2

研 究 者	年代	谱线/方法	强 度	谱线宽度	速 度
Billings	1959	$\lambda 5303 \text{ \AA}$ 谱线轮廓(日冕仪)	无	波图像	无
Noxon	1969	$\lambda 5303 \text{ \AA}$ 谱线轮廓	8 min (>50%)	无	无
		$\lambda 6374 \text{ \AA}$ 谱线轮廓(光谱仪)	无	无	无
Chapman 等人	1972	EUV 太阳照相机(OSO-7)	262s	无	无
Schmidt 等人	1972	白光电影(日食)	无	—	—
Leitenberg 和					
Hoffman	1974	$\lambda 5303 \text{ \AA}$ 干涉计(日食)	6 \pm 1 min (很大)	—	—
Koutchmy	1975	白光照相(日食)	无	—	—
Vernazza 等人	1975	EUV 分光仪(日食)	无	—	—
Tsubaki	1977	$\lambda 5303 \text{ \AA}$ 谱线轮廓(日冕仪)	无	280, 325s(弱)	280, 315s ($\pm 1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)
Egan 和	1979	$\lambda 5303 \text{ \AA}$ 谱线轮廓(日冕仪)	6.1 min	6.1 \pm 0.6 min	无
Schneeberger			(2 \pm 1.4 \AA)	(0.7 \pm 0.06 \AA)	
Koutchmy 等人	1983	$\lambda 5303 \text{ \AA}$ 谱线轮廓(日冕仪)	无	无	300, 80, 40s ($\pm 2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)
Antonucci 等人	1984	EUV 分光计(飞船)	117, 141s(6%)	—	—
Pasachoff 和		$\lambda 5363 \text{ \AA}$ / 滤光器 + PMT*	0.5—2.0s	—	—
Landman		+ 显示器(日食)	(1—2%)		
Tsubaki 等人	1986	$\lambda 5303 \text{ \AA}$ 谱线轮廓(日冕仪)	235s(2—3误差限)	无	无
Pasachoff 和	1987	$\lambda 5303 \text{ \AA}$ / 滤光器 + PMT*	0.5—4.0s(1%)	—	—
Ladd		+ 显示器(日食)			

*PMT表示光电倍增管

28秒和 360 秒的振荡^[10]。

Tokio Tsubaki 研究了日冕和日珥中的周期振荡和波，也得到日冕谱线的三个参量：谱线强度、线宽、速度均呈现出周期振荡。表 2 给出 1959—1987 年日冕检测到的振荡和波的情况^[10]。

近代日冕 X 射线的观测提出了一个重要的概念——微耀斑 (microflare)^[22]。微耀斑被认为是可观测到的最小耀斑。Lin 等人发现在硬 X 射线中微耀斑的辐射流量的峰值比正常耀斑辐射通量的峰值小 10—100 倍，在软 X 射线中微耀斑辐射流量较硬 X 射线略有增加^[23]。

2. 日冕发射线与太阳磁场之间的关系

20多年来, 观测方面的进展是: 美国高山天文台制成 Fe XIII $\lambda 10747 \text{ \AA}$ 线的日冕发射线偏振计, 用它可由此线的偏振强度、方向推出日冕的磁场矢量。Smartt 等人研究了日冕发射线的偏振, 研究表明: Fe XIV $\lambda 5303 \text{ \AA}$ 线的偏振矢量在 $1.1-2.0R$ 。处接近径向方向, 大小为 0.016 ; Fe XIII $\lambda 10747 \text{ \AA}$ 线的偏振矢量在 $1.1-1.8R$ 。处接近于径向方向, 大小为 $0.12^{[11]}$ 。美国高山天文台、萨克拉门多峰天文台用改进了的斯托克斯偏振计记录到一些日冕线的全部 4 个斯托克斯参量 (I 、 Q 、 U 和 V)^[24]。由于这方面工作刚开始时间不长, 有关日冕磁场较确切的结果不多, 发表的文章很少。我们相信, 随着仪器的改进, 好的结果必将会出现。

Демкина 等人研究了一些日冕发射线在磁场中的特性^[12]。表 3 给出一些色球谱线、一些日冕发射线在磁场中的简况。

表 3

光 谱 线	线分量数	正常塞曼效应分量		$g_{\text{有效}}$
		π	σ	
H α , H β	7	18	30	H α =1.05, H β =1.06
He I D $_3$	6	18	36	1.12(1.06)*
He I $\lambda 10830 \text{ \AA}$	3	6	12	1.46(1.52)*
Fe XIV $\lambda 5303 \text{ \AA}$	1	2	4	1.50
Fe X $\lambda 6374 \text{ \AA}$	1	2	4	1.50
Fe XII $\lambda 10747 \text{ \AA}$	1	1	2	1.50

* 表计算条件是 $\Delta\lambda \geq 0.4$ 和 1.0 \AA

由表 3 看出: 给出的日冕发射线的有效兰德因子 $g_{\text{有效}}$ 是较大的, 它们的圆偏振具有经典的性质, 谱线分量数均为 1。

总的来说, 从物质冻结在磁力线上的观点来看, 日冕电子密度的特性取决于磁场位形, 因而宁静日冕的绿线强度呈现出缓慢随时间的变化; 就日冕局部活动区来说, 电离情况急速变化着, 磁场位形随时间改变, 引起电子密度随时间改变, 因而日冕绿线强度也随时间快速变化^[5]。

3. 日冕发射线与太阳活动周、太阳自转之间的关系

(1) 日冕发射线与太阳活动周的关系

Waldmeier、Рушин 和 Рыбански、Макаров、Тягун 等人在这方面作了工作^[13-17]。特别是 Waldmeier 进行了系统的研究工作^[13,14]。

综合他们的研究, 主要有以下几方面的成就: (i) 绿日冕的亮度的最大值与黑子沃尔夫数极大值的时间不一致, 以太阳活动周 21 周为例, 黑子沃尔夫数极大值时间在 1979—1980 年, 而绿日冕亮度的极大值时间在 1981—1982 年, 滞后约 2 年。18 周、19 周有类似情况。绿日冕亮度是以日冕发射线 $\lambda 5303 \text{ \AA}$ 的总强度为代表的。Waldmeier 在研究 20 周时, 总强度是选取距离太阳边缘 $30''$ 处沿太阳圆面每隔 5° 测一个值, 共 72 个测量点, 把它们的平均值

定义为当天绿日冕的总强度；(ii) 21 周绿日冕的平均辐射比 20 周大 7.6%；(iii) 日冕南北半球亮度的不对称性，以 21 周为例，从周期开始到 1982 年(1980 年除外)为止，绿日冕北半球比南半球亮，之后到周期末尾，南半球比北半球亮。红($\lambda 6374 \text{ \AA}$)日冕情况则相反，从周期开始到 1983 年为止(除去 1980 年 2 月—1981 年 1 月)，南半球比北半球亮，到周期末尾，北半球比南半球亮；(iv) 平均电离温度在 21 周中变化情况是：从周期开始到 1983 年，北半球高于南半球，之后到周期末尾南半球高于北半球，其中除去 1980 年 2 月—1981 年 1 月的时期；(v) 红日冕亮度在活动周中的变化，与绿日冕相比，是有差别的。红日冕亮度在每个活动周中有两个极大，一个亮度极大时期与黑子沃尔夫数极大时期相一致，如 19 周的 1958 年、20 周的 1968 年，第二个亮度极大时期与黑子沃尔夫数极小时期相一致。Waldmeier 曾对这一点作过解释，他认为红日冕强度随密度增大而加强，但随电离温度的增大却是减小，这样就形成红日冕亮度的两个极大。

(2) 日冕发射线与日冕的自转运动

Тягун、Рушин 和 Зверко 等人在这方面作了工作^[18,19]。

总结他们的研究，可概括为：(i) 与光球相比，日冕的较差自转是较弱的；(ii) 日冕南北半球的自转速度是有差别的；(iii) 最近的两个太阳活动周(20 周、21 周)日冕的自转是减速的；(iv) 虽然在活动周的不同位相期日冕个别结构自转速度在变化着，与光球相比，日冕的自转是较快的；(v) 日冕长寿命的结构具有类似刚体的自转，而短寿命的结构没有发现这种类似性。

4. 日冕发射线与行星际效应

(1) 日冕发射线强度与扇形结构

研究表明：在太阳活动 20 周中绿日冕线的强度对行星际磁场的扇形结构是有影响的。它对行星际磁场的扇形边界有调制作用。接近 Hale 边界(到日面纬度 $\pm 30^\circ$ 处)调制作用最大，离 Hale 边界远的地方调制作用不明显，超过 $\pm 30^\circ$ 的日面中高纬区域没有显示出绿日冕线强度与行星际磁场扇形结构的相关性^[20]。

(2) Fisher 用绿日冕线的资料确定高速太阳风流，进而预报对地球磁场扰动的影响^[21]。

(3) 日冕发射线对人造卫星制动的影响：设想一个日冕瞬变事件，传播到地球上的时间是 10 天，此日冕瞬变对应一定的绿日冕线强度。瞬变流通过地球对应于低速太阳风流，它加强该处质子密度，并加热地球上层大气，这样就可能形成对人造卫星的一个附加制动力，因此可用日冕瞬变资料，预报这种制动作用的大小^[8]。

三、研究展望

1. 为了研究宁静日冕、冕洞、日冕活动区的物理情况，高水平工作的第一个要求是获得多波段的完整的日冕光谱观测资料。这里所说的多波段有狭意和广意之分。狭意上是指光学波段的多条发射线，包括地面日冕仪观测常用的绿线、红线和黄线($\text{CaXV} \lambda 5694 \text{ \AA}$)；广意上是指从 X 射线、紫外线、可见光、红外到射电波段。这里所说的完整是指对日冕某一区域，特别是对大的日冕活动区获得同时的多条谱线，以及一定时间间隔、日冕不同高度处的

多条日冕发射线资料。需要说明的是：用日冕仪在无日食时拍摄同时的多条发射线常受到外界条件、光谱线本身特性的限制，不易做到。

2. 日冕发射线的偏振观测，特别是用斯托克斯偏振计观测日冕发射线的偏振情况，这是个有趣而有意义的课题。由前面的介绍看出，近年来，一些人在这方面作了一些事，但都是试探性的，好的结果尚待发表。此外，日冕发射线的偏振与K冕亮度分布之间的关系也是个有意义的课题。

3. 日冕单色像(绿、红)与FeXIII λ 10747 Å线所得日冕磁图的比较研究，对我们了解日冕在一定高度处磁场的大小、分布有重要意义。

4. X射线微耀斑与紫外线微耀斑之间的关系，微耀斑的物质抛射与日冕瞬变的物质抛射之间的关系，这是个值得探讨的新课题。

参 考 文 献

- [1] Yallop, B. D., *The Observatory.*, 81(1961), 235.
- [2] Dzifcakova, E. and Rybansky, M., *Pr. Astron. Observ. Skalnatom Plese*, 15 (1986), 423.
- [3] Kulcar, L., *Pr. Astron. Observ. Skalnatom Plese*, 16 (1986), 27.
- [4] Fisher, R. R., *Bull. Am. Astron. Soc.*, 20 (1988), 703.
- [5] Dunn, R. B., in *Physics of the Solar Corona*, ed. by Macris, p. 115, (1971).
- [6] Demastus, H. L. and Wagner, W. J., *Solar Phys.*, 33 (1971), 449.
- [7] Wagner, W. J., *Solar Phys.*, 114 (1987), 81.
- [8] Altrock, R. C., *The Solar-Terrestrial Prediction, Workshop in Medon, France, 18-22 June, 1984.*
- [9] Zirin, H., in *Astrophysics of the Sun*, p. 232, Cambridge University Press, Cambridge, (1988).
- [10] Tokio Tsubaki, *Solar and Stellar Coronal Structure and Dynamics, Summer Workshop in Sunspot (New Mexico), 17-21 August, 1987.*
- [11] Smartt, R. N. and Arnaud, J., *Coronal Emission-line Polarization*, (to be published).
- [12] Демкина, Л. Б. и Никольский, Г. М., *Сол. Дан.*, 12 (1981), 105.
- [13] Waldmeier, M., *Solar Phys.*, 20 (1971), 232.
- [14] Waldmeier, M., in *Physics of the Solar Corona*, ed. by Macris, p. 238, (1971).
- [15] Рушни, В. и Рыбански, М., *Солнечные Магнитные Поля и Корона*, I (1989), 242.
- [16] Макаров, В. И., *А. Ж.*, 64 (1987), 1072.
- [17] Степанов, В. Е. и Тягун, Н. Ф., *Исследования по Геомагнетизму, Аэронавигации и Физике Солнца*, 42 (1977), 60.
- [18] Тягун, Н. Ф., *Боллетень Абастуманской Астрофизической Обсерватории*, 60 (1985), 235.
- [19] Рушни, В. и Зверко, Ю., *Сол. Маг. По и Кор.*, I (1989), 350.
- [20] Тягун, Н. Ф., *Сол. Дан.*, 2 (1983), 78.
- [21] Fisher, R. R., *Solar Phys.*, 36 (1974), 343.
- [22] Tandberg-Hanse, E. and Emslie, A. G., in *The Physics of Solar Flares*, p. 145, Cambridge University Press, (1988).
- [23] Lin, R. P. et al., *Ap. J.*, 283 (1984), 421.
- [24] Stenflo, J. O., *Solar Phys.*, 100 (1985), 189.

The Recent Progress in the Research of Coronal Emission Lines

Du Jinsheng

(Department of Astronomy, Beijing Normal University)

Abstract

The relationship of coronal emission lines with the coronal mass ejection, the solar magnetic field, the cycle of solar activity as well as the solar rotation and the interplanetary effects is reviewed in this paper. Some comments on further work are given.