

晚型恒星中的类太阳活动(Ⅱ): 恒星的耀发及其物理模型

翟迪生

(中国科学院北京天文台)

提 要

本文对经典耀星和 RS CVn 型双星中的耀发现象作了综述。在总结有关耀发的观测统计特征的基础上,对各种有关耀发的物理模型作了分析,并与包括近年来用多波段对耀发的监测在内的观测作了比较。许多研究者认为,恒星的耀发类似于太阳白光耀发,它的光学辐射是类黑体的,来自较深的色球层和一定的耀发面积。本文亦从类太阳活动的观点,讨论了有关耀发能量释放的过程和加热机制的问题。

一、引 言

对恒星耀发现象的观测表明,它是晚型恒星中具有一定普遍性的活动现象^[1]。对耀发活动的研究起始于对经典的 dKe、dMe 耀星的观测。耀发与新星的爆发和其他恒星光度扰动变化之区别在于:它的亮度耀发增亮的速率非常高,可以在几秒钟之内,亮度增加几个星等,比超新星爆发亮度增加还快得多,并且耀发光极大后的下降光变曲线形状与变幅和耀发的时间宽度无关。在经典耀星的研究中,曾有人把亮度增亮速率 $>0.005\text{mag}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光度变化,定义为耀发^[2]。实际观测到的耀发增亮速率,往往比此值大得多。例如 1974 年观测到的 UV Cet 的一次耀发,在 31 秒钟内亮度增加 420 倍,相当于 $2.8\text{mag}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[3]。因此,耀发现象在物理上反映了一种特殊的恒星能量释放过程。对其观测和研究,在认识晚型星的活动性本质方面,有重要的意义。

近十多年来,对耀发现象的多波段观测,尤其是几个波段的同时观测以得到具有一定空间分辨率的结果方面,正不断取得进展,这对揭示有关耀发现象的恒星大气物理过程和耀发机理,提供了新的依据。本文作者在有关晚型星中类太阳活动的系列综评报告中,曾系统地介绍了类太阳黑子活动和磁场的观测^[4],并简述耀发活动和恒星色球、冕区活动的相关性^[1]。本文在有关恒星耀发现象的统计物理特征的综合阐述的基础上,分别对有关耀发的物理模型和能量释放问题的研究作了评述,尤其是作为一种类太阳活动,介绍了它的近期研究进展。

二、耀发现象的观测统计特征

描写一耀发事件,通常用耀发的时间宽度、光学星等幅度、光变曲线形状和耀发能量等

1991年8月26日收到。

1992年2月13日收到修改稿。

表现特征量，但它们在统计上都有很宽的分布范围。例如，耀发时间尺度可以从几秒钟到几个小时，近 10^4 量级的跨度；星等变幅实际上是一个相对测量，与本底星的固有亮度有关，所以一般用耀发的能量时间积分，即总耀发能来表征一次耀发的强度和规模。在经典 dMe、dKe 耀星中，最弱的耀发是在最弱的耀星 CN Leo 中观测到， $\sim 3 \times 10^{27}$ 尔格^[5]，而最强的耀发，是在星团耀星中被记录到的，光学波段耀发总能量可达 3×10^{35} 尔格，跨度约 8—9 个量级。近期，北京天文台双星组在具有同类耀发特征的类太阳活动双星 RS CVn 星中观测到 HR 1099 在 1989 年 12 月的一次特大光学耀发事件^[6]，其光学波段总能量 $E_{opt} \approx 10^{37}$ 尔格^[7]。有趣的是该星在第一次耀发后的 12 小时左右又发生一次更大的耀发，估计 $E_{opt} \approx 10^{38}$ 尔格^[8]，均超过经典耀星观测到的耀发能量记录。关于耀发的光变曲线形状，一般是上升很快，下降缓慢。人们把上升时间从几秒到几分钟而延续约 1 小时的，称 I 型耀发；而把上升时间 ≥ 30 分钟，而延续 3—10 小时的称为 II 型耀发。UV Cet 型耀星通常是 I 型耀发，而星团耀星的耀发一般属 II 型。目前，还把总时间 < 10 秒的称为“微耀”，而时间短变幅大的耀发，称做尖峰式耀发(Spike flare)。

尽管耀发现象的表现特征参数分布很宽，但根据大量光学光度和光谱观测结果，以及 80 年代射电、紫外到 X 射线的多波段观测结果的统计分析，耀发现象具有以下平均物理特征：

1. 耀发光学辐射具有很强的紫外超。

Moffett 1974 年对 8 个耀星 400 多次耀发的大样本统计，给出耀发光度极大附近的色指数(纯耀发部份)： $(U - B)_r = -0.88 \pm 0.15$ ， $(B - V)_r = 0.34 \pm 0.44$ ^[9]；Gurzadyan 1980 年对 6 颗耀星 26 次耀发的统计平均得出： $(U - B)_r = -1.20 \pm 0.18$ ； $(B - V)_r = 0.03 \pm 0.17$ ^[12]；而 Grinin 1990 年在双色图上得出不同耀星的耀发极大的平均位置，云集在 $(U - B)_r = -1.0$ ； $(B - V)_r = 0.2$ 附近^[10]。虽然观测有较大的弥散，但各研究者的统计平均结果是一致的，即耀发辐射的颜色有很强的紫余，耀发光极大的色指数找不到与此直接对应的黑体温度。

2. 耀发积分能量的幂律分布。

Gersberg 和 Shakhovskaya 1983 年以耀发的 B 波段时间积分总耀发能 E_B (尔格)的对数为纵坐标，以耀发频数 $\bar{\nu}$ (每小时)的对数为横坐标，对每颗耀星作所谓“能谱曲线”，如图 1 所示。这儿的 $\bar{\nu}$ 代表单个耀星平均每小时能量超过 E_B 的耀发频数。结果，每

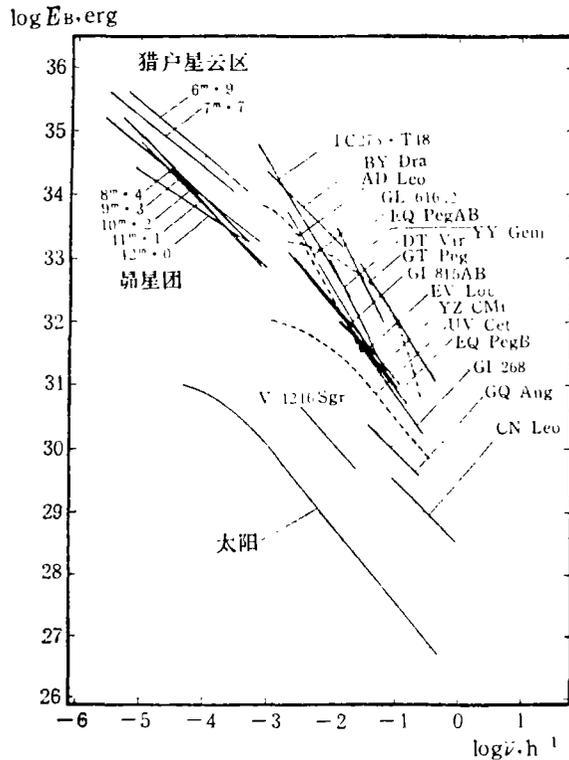


图 1 红矮星和太阳的耀发能谱。 E_B 为 B 波段总能量(尔格)， $\bar{\nu}$ 为能量超过 E_B 的耀发次数/小时

一曲线可以用一幂函数来表示:^[11]

$$\log \bar{\nu} = \alpha - \beta \log E_B \quad (1)$$

其中, β 称能谱指数, 对不同的耀星, β 值在 0.4—1.4 之间。由图 1 可看到, 全部耀星样本形成一个较窄的分布带区, 具有确定的上边界, 表示具体的耀星可以达到的光学耀发最大效率。统计还表明, 对年龄、质量和物理条件不同的恒星来说, β 值很接近, 这意味着耀发虽然与耀发星的物理特性有关, 但耀发机制不可能有基本的差别。(1) 式的物理意义, 目前尚在探讨之中^[12]。

3. 耀发光学平均功率 L_r 的统计性质

L_r 定义为给定时间内所发生的所有光学耀发的能量之和被时间除。它是单位时间内通过耀发辐射出的平均能量, 所以, 一般 L_r 只有对耀发频繁的恒星才有统计上的意义。 L_r 代表恒星耀发的绝对活动水平。对太阳系附近的耀星的统计研究表明:^[1,13]

(1) L_r 与绝对星等 M_v 有关。耀发星愈弱, L_r 愈小, 尽管弱星观测到的耀发频数常常偏高;

(2) L_r 只占耀发星热光度的很小一部份, $L_r/L_{bol} < 10^{-3}$, 且比值与 M_v 无关;

(3) 质量和光度相同的恒星, L_r 或 L_r/L_{bol} 有很大弥散, 可达 3 个量级的带宽, 表明耀发活动水平可以相差很大;

(4) L_r 与耀发星的耀发宁静期色球、冕区活动水平紧密相关。若用 L_{bal} 代表色球 Balmer 线系发射总光度, L_x 代表冕区 X 射线光度, 则 $\log L_r$ 和 $\log L_{bal}$ 或 $\log L_x$ 之间有简单的线性统计关系。

4. 耀发光极大时光谱连续背景的巴尔麦不连续性指数减小, 具有“平谱”特征, 表示辐射是光学厚的, 且光学厚超出巴尔麦不连续区。图 2 是 dMe5.5 耀星 Wolf 424 的一次 $\Delta U >$

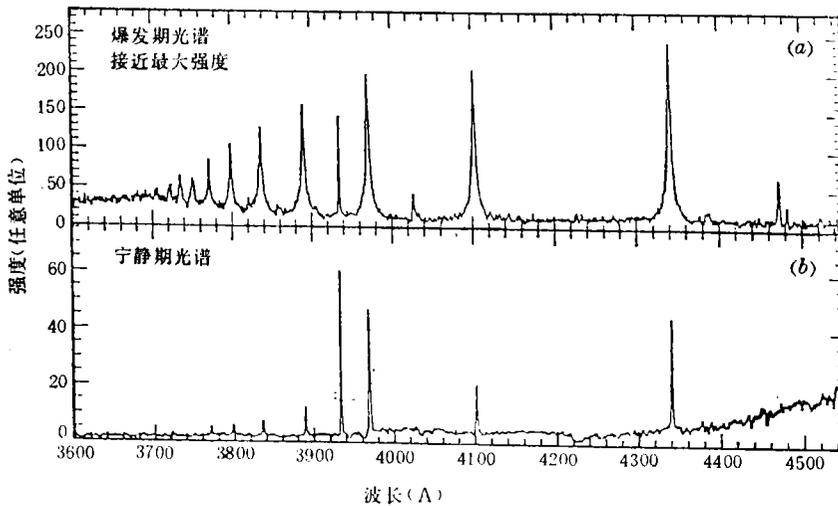


图 2 Wolf 424 的一次耀发 ($\Delta U > 3\text{mag}$) 时的光谱特征 (a), 下图为宁静期光谱 (b)

3mag 的耀发极大光附近的光谱观测实例^[14]。

5. 耀发时具有突出的巴尔麦发射线系的加强, 极大光附近, 巴尔麦减幅减小, 甚至发

生所谓“反转现象”, 即由原强度 $H_\alpha > H_\beta > H_\gamma > \dots$, 变为 $H_\alpha < H_\beta < H_\gamma < \dots$ 。反转发生在那些谱线之间, 对不同的耀发可以不同。发射线的增亮, 在起耀时间上滞后于连续谱的增亮, 但衰减则远慢于连续谱, 总的谱线耀发增亮时间宽度一般是连续谱的 5 倍(见图 3)^[2]。Ca II 发射线的增亮又滞后于巴尔麦线, 消失也滞后^[15]。

耀发光学光谱的两种成份, 即连续谱和发射线谱随时间的变化的不同, 造成对总辐射的贡献比例因不同的耀发阶段而不同。耀发光极大的快速耀发阶段, 发射线只占总 B 波段辐射的 5%—11%, 但到耀发衰减的缓变阶段, 其比例可达 40% 左右。光学光谱的两种成份的不同变化规律表明, 它们分别来自不同的大气活动区, 或不同的能量释放阶段。这是任何有关耀发的物理模型都必须加以解释的。

6. 高分辨率、高信噪比光谱观测揭示, 巴尔麦发射线心在耀发极大时有红移, 且谱线有不对称的红翼致宽效应^[16]。这种谱线轮廓的多普勒效应, 也在 Mg II, C IV 紫外发射线中观测到^{[17][18]}。Doyle 等(1989)在 UV Cet 的一次耀发中, 还发现有 H_α 线的蓝移发射成份。这些均显示出在耀发过程中伴随有物质流动^[19]。

7. IUE 紫外卫星观测揭示了耀发时紫外连续谱和发射线的增强。在观测谱域 1150—1950 Å 区间上, 在耀发极大附近, 连续谱呈平坦分布, 与可见区光谱紫区的“平谱特征”相应, 被认为是来自同一深层发射源的光学厚辐射。紫外连续谱所包含的耀发能量相当可观, 不亚于其他任何波段的耀发能量流密度。紫外光谱的线发射成份含有突出的 C IV 共振线, 以及其他过渡区谱线 C I, C II, Si II, Si IV, Al III, He II 和 N V 发射线的增强。表 1 表明, 这些过渡区发射线能量损失 $E_{TR} \sim 10^{32} - 10^{33}$ 尔格。由 UV 发射线可推得电子温度 $T_e \sim 10^5 K$, 从而证明耀发时, 高层大气中有光学薄的热气体存在^[20]。

8. 多波段耀发同时观测的初步结果表明, 恒星射电爆发与光学耀发之间缺少或只有很弱的关系。射电耀发通常在光学耀发之后出现, 类似于太阳 IV 型爆, 具有很高的亮度温度 ($\sim 10^{15} K$), 并且有高的圆偏振, 有时达 100%, 相当于等离子体过程的典型性质^[21]。当然, 光学耀发并不一定伴随有观测到的射电爆发, 或反之亦然。多波段同时观测亦表明, 只有很少的 X 射线耀发有光学耀发相伴随。总之, 不像太阳耀斑爆发那样在光学、微波和软 X 射线事件之间有很强的相互关系。但是, 这只是初步结论。毕竟由于耀发的偶然性, 使得同时多波段的观测能成功的例子尚少, 故需进一步验证。

X 射线耀发观测, 目前只在软 X 射线波段, 能量 E_x 在 $3 \times 10^{31} - 3 \times 10^{36}$ 尔格之间, 平均比太阳高出 3 个数量级, 但亮度温度相同 ($\sim (1-3) \times 10^7 K$)。由磁流管模型可推得等离子

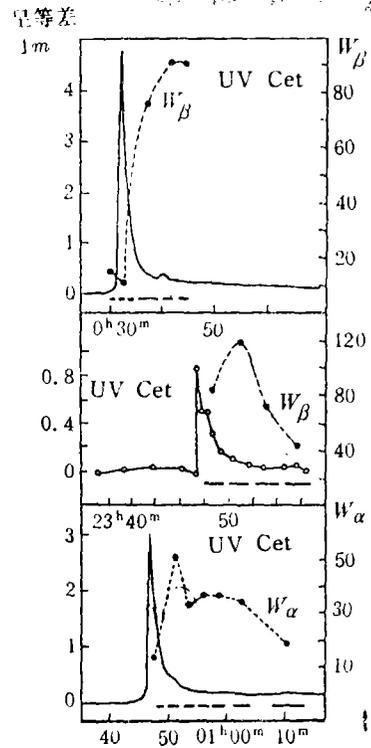


图 3 UV Cet 的三次耀发的光变曲线和 H_α 、 H_β 线等值宽度 W 的变化对照图

体电子密度 $N_e \sim 10^{11} \sim 10^{13}/\text{cm}^3$ 量级。按 Pallavicini 的分类可分为两群 X 射线耀发事件，一是脉冲式耀发，从起耀到极大约几分钟时间，另一是慢耀发，衰减时间可延续 ~ 1 小时，它们分别类似于太阳上的致密耀发和双带耀发^{[22][23]}。

表 1 多波段恒星耀发观测结果

| 星名 | E_{opt} 10 ³² erg | E_X 10 ³² erg | E_{tr} 10 ³² erg | E_{CIV} 10 ³⁰ erg | $E_{\text{L}\alpha}$ 10 ³⁰ erg | $S_{(2cm)}$ | $S_{(b)}$ mJY | $S_{(20)}$ | 参考 |
|------------------|--|-------------------------------|---|--|--|-------------|------------------|------------|-------------|
| dMe 耀星: | | | | | | | | | |
| BY Dra | 40 | 20 | — | — | — | — | — | — | * |
| EQ Peg | (0.16) | 5 | — | — | — | — | — | — | * |
| | (Mg I) | | | | | | | | |
| | — | — | 4 | 6 | — | — | — | — | * |
| | — | 100 | — | — | — | — | >10 | >10 | * |
| Wolf 630 | (0.6) | 12 | — | — | — | — | — | — | * |
| | (H α) | | | | | | | | |
| YZ CMi | 0.12(U) | 36 | — | — | — | — | — | — | * |
| | 10.3(UBV) | | | | | | | | |
| | — | — | 3 | 4 | — | — | — | — | * |
| | 2 | — | — | — | — | <2 | 5.5 | <2 | * |
| | — | 0.2 | — | — | — | — | 2 | 15 | * |
| Prox Cen | — | 0.35 | 0.4 | 0.5 | 2.4 | — | — | — | * |
| FK Aqr | — | — | 25 | 34 | — | — | — | — | * |
| AT Mic | — | — | 15 | 20 | 40 | — | — | — | * |
| AD Leo | 0.15(U) | — | 0.2 | 0.24 | 4 | — | — | — | * |
| | 3(U) | — | — | — | 32 | 16 | — | — | * |
| RSCVn 型双星: | | | | | | | | | |
| σ Cor Bor | — | 10 ⁴ | — | — | — | — | — | — | * |
| VTII Tau | — | — | 2 $\times 10^4$ | 1.4 $\times 10^4$ | 1.3 $\times 10^4$ | — | — | — | * |
| | 10 ⁵ | — | — | — | — | — | — | — | Zhai等(1990) |
| λ And | — | — | >1.1 $\times 10^4$ | 8 $\times 10^3$ | 5.5 $\times 10^4$ | — | — | — | * |
| II Peg | — | — | 2.5 $\times 10^3$ | 7 $\times 10^3$ | — | — | — | — | * |
| | 6.6 $\times 10^2$ (U) | — | — | — | — | — | — | — | † |
| IM Peg | — | — | 7.4 $\times 10^4$ | 10 ⁵ | — | — | — | — | * |
| UX Ari | — | — | — | >5 $\times 10^2$ | — | — | 90—170 | — | * |

* 参考 P. B. Byrne(1989)文献中的表 1.2 和表 4。

† 参考 M. N. R. A. S., 248 (1991), 503.

表 1 列出多波段同时观测得到的耀发能量的初步结果。Katsova 等(1986)从为数不多的观测作估计，对于弱耀发，光学波段能量可能小于 X 射线波段， $E_{\text{opt}} < E_X$ ，而强耀发则有 $E_{\text{opt}} > E_X$ ，一般 E_{opt}/E_X 在 0.1—0.2 之间^[24]。Haisch 等(1983)曾从 Prox Cen 的观测得到 $E_X \approx E_{\text{TR}}$ ^[25]，因此，耀发的能量释放在光学波段、过渡区谱线发射和软 X 射线波段可能有 $E_{\text{opt}} \approx E_{\text{TR}} \approx E_X$ 。此推论无疑需进一步验证。

以上有关耀发现象的观测统计的平均特征，主要是根据 dKe、dMe 经典耀星的观测结果而得到的，包括 RS CVn 型双星的近期观测。另一类有耀发活动的恒星，即主序前 T Tau 型星，其耀发特征明显区别于经典耀星。Askebjerg (1989) 对这类星 13 个耀发事件的分析得出：耀发光极大无明显紫外超，其蓝区能流密度大大高于紫区，有 $E_U = 0.3E_B$ ， $E_U \geq 0.6E_V$ ，能谱曲线几乎完全可以用黑体辐射来加以描述，黑体温度 $6200\text{K} < T_e < 7300\text{K}$ 。光

变曲线很不同于耀星的耀发, 尤其是经典 T Tau 星(CTTs), 耀发增亮慢, 衰减亦慢。因此, 研究者把 T Tau 星的耀发称为“类耀发事件”来区别于一般耀发现象^[26]。

三、恒星耀发的理论模型

耀发是一个很复杂的天体物理现象, 历史上曾先后提出过三个主要的有关耀发的物理模型, 即热等离子模型, 星云模型和逆康普顿效应模型。而 80 年代研究者更多地直接类比太阳的耀发以对恒星耀发进行研究。

1. 热等离子模型 首先是由 Andrews (1965) 提出^[27]。他通过 $T \geq 10^6 \text{K}$ 的热等离子体的韧致辐射计算, 解释了观测到的耀发极大光的颜色和衰减时间尺度。后来, Mullan (1976)^[28] 和 Kodaira (1977)^[29] 分别引入分层效应, 认为热等离子体的热能只是部分地通过韧致效应辐射出去, 同时, 其热能通过热传导加热下层较冷较密的大气, 经由复合辐射更有效地辐射出去。这一分层模型虽然进一步解释了耀发衰减阶段的光学成份, 但耀发极大光的主要成份仍是韧致辐射这一点 ($T \approx 10^7 \text{K}$), 和原初的模型一样, 不能解释光极大时光谱中的发射线谱的低温性质。

2. 星云假说, 或称热气体模型 Kunkel (1970) 提出^[30], 耀发光极大时光谱中的巴尔麦线系、Ca II HK 线和中性 He 线的发射加强, 主要是加热到 $T = 10^4 \text{K}$ 的热气体的复合辐射谱, 而巴尔麦线系的递减反常现象, 正是一个光学厚的几乎完全热化气体的典型特征。根据这一假说, 他得到当电子密度 $N_e = 10^{13} - 10^{14} / \text{cm}^3$, $T_e = 2 - 3 \times 10^4 \text{K}$ 时, 可以计算出观测到的巴尔麦递减反转现象和强度比 $H_\gamma / H_\beta = 1.1 - 1.5$, 并且可得到巴尔麦不连续性指数 $I_- / I_+ = 4 - 5$ 。但是, 这一模型不能产生观测到的耀发极大光的颜色, 且对以后观测到的光谱巴尔麦不连续性系统的低于 Kunkel 的观测结果, 即连续谱的“平谱”性质, 亦不能加以解释。星云说与热等离子体模型相对比, 前者只解释了光谱中的发射线谱特征, 后者只解释了光谱中的连续谱的特征。

3. 逆康普顿效应模型 Gurzadyan (1980)^[21] 认为耀发现象的发生, 是因为恒星大气上层由于某种原因出现了短寿命的快速电子云, 又因为正常的恒星辐射光子与电子碰撞的逆康普顿效应, 从而系统地改变了光球辐射的能谱, 也即因红矮星的红外光子获得了能量, 从而增强了紫区短波段的辐射, 造成 UVB 波段的耀发增亮现象。他的计算表明, 电子能量在几个 MeV 时, $E_e / m_e c^2 = \gamma^2 \approx 10$, 相当于弱相对论电子, 即可得到观测的耀发事件的 ΔU , ΔB 和 ΔV 变幅, 并解释了光极大时的颜色。至于耀发光谱中的发射线谱, 该模型认为是由经过逆康普顿效应后的辐射对色球层的照射加热而引起的再复合辐射。这一模型在理论上有所独到之处, 也能解释较多的观测现象。但是, 根据这一模型必然导出另一个结论, 即耀发的同时会伴随有红外波段的“负耀发”。而目前, 唯一观测到有红外负耀发的确切例子, 只有 AD Leo 在 1984 年 3 月 28 日观测到的一次耀发(见图 4)。并且, 这一现象仍可能用 H^- 离子的不透明性变化来解释。逆康普顿效应模型最突出的困难是, 根据理论推算, 一次耀发需要很高的输出总能量 ($\sim 10^{51}$ 尔格); 并且, 大量的相对论电子的出现, 必然会与冕区等离子体以及恒星表层大气发生强相互作用, 最终的辐射肯定会远远超出只是逆康普顿效应的辐射, 所

以, 该模型目前尚不能被大多数研究者所接受, 但模型中首次提出非热致高能粒子可能是耀发的主要能源的概念, 是可取的。

除去上述三种有关耀发辐射的模型之外, Grinin 和 Sobolev(1977)还提出一种“冷云

说”, 或称为“变热的光球模型”^[31], 冷云说实际上是星云说的重要修正。星云说以其所得出的电子密度相当于色球层的典型值的理论而首次把耀发光学事件放到色球高度, 冷云说则提出, 星云的位置还要向下面更冷更密的大气层移动一下。因为热星云 ($T = 2-3 \times 10^4 \text{K}$) 会同时引起 He II 和其他高次电离元素谱线的加强, 但并未观测到。冷云位置相当于色球底部, $T = 0.5-1 \times 10^4 \text{K}$, $N_e = 10^{15}-10^{17}/\text{cm}^3$ 。在这一高度上, 当温度低时 ($T < 8000 \text{K}$), 负氢离子 H^- 的不透明性占优势, 并且 H^- 的发射会附加到氢原子的复合谱上, 发出相对平坦的连续谱; 而当温度增高时, 中性氢 HI 的不透明性增加很快, 会导致从一个光学厚的层发出类黑体的辐射。Grinin 和 Sobolev 发现, 当 $T = 8500 \text{K}$ 时, 所得到的光学辐射与观测一致。

据冷云说, 我们可以把恒星的耀发直接类比于太阳的白光耀斑。冷云说也是第一次考虑到耀发形成区的面积问题, 根据计算, 它得出的恒星强耀发连续谱形成区的面积在

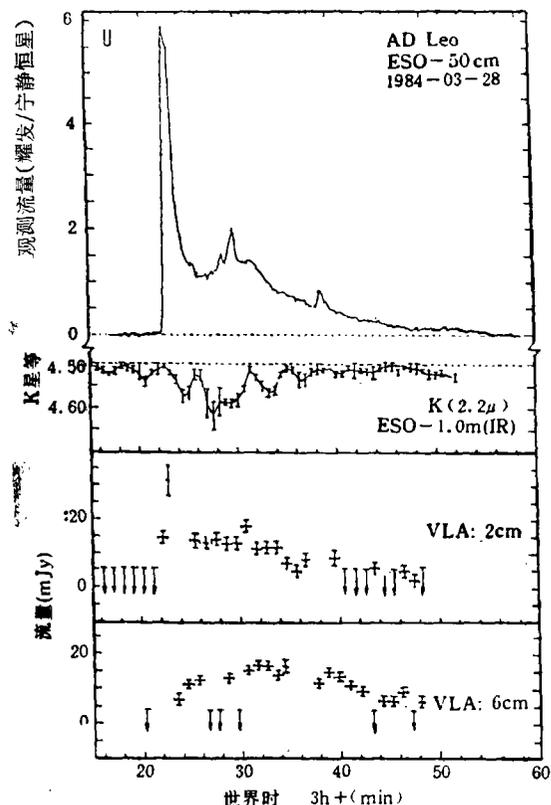


图 4 AD Leo 一次强耀发的 U, K, 2cm 和 6cm 波段同时观测结果对照图

光极大时约占恒星盘面的 1%—2%, 与目前观测到的有关黑子活动区面积相近。

随着多波段耀发观测的进展, 在 80 年代恒星耀发与太阳耀发的类比研究很活跃。de Jager(1986, 1989)^[32,33]直接把太阳活动极大年提出的有关太阳耀发的“冲击爆发模型”应用于 1984 年 BY Dra 的一次光学和 X 射线的耀发上, 以及应用于 1985 年 UV Cet 的一次大耀发 ($\Delta U \approx 3.9 \text{mag}$) 的多波段联合观测结果的解释上, 取得了明显的成功。这种模型认为, 能量粒子自上而下冲击加热色球层, 被加热的等离子体产生耀发中所观测到的可见区和 UV 波段的连续谱和发射线, 即色球爆发; 而被加热的热离子体从加热面逃逸出去, 散布在更大范围的星面上, 形成持续时间较长的高层等离子云, 它发射软 X 射线, 即冕区爆发, 并同时成为耀发光变缓变阶段的加热源。de Jager 应用这一模型得到 BY Dra 和 UV Cet 的耀发面积分别均在 $2 \times 10^7 \text{km}^2$ 左右, 而一个典型的太阳白光耀斑爆发面积 $\sim 10^7 \text{km}^2$ 与此接近。但是恒星冷等离子 ($T \sim 2 \times 10^4 \text{K}$) 的厚度至少有 700km, 比太阳 ($\sim 10-20 \text{km}$) 厚得多, 至少是它的 100 倍。此外, 太阳白光耀发基本上是光学薄的, 而恒星耀发是光学厚的 (超过巴尔麦

不连续区)，等等，这些区别虽被认为可能只是定量上的问题，但具体细节有待研究。de Jager 的计算中亦假定耀发辐射是类黑体的，对观测到的不同程度的蓝余或紫余问题，未能给出完满的解释。

80 年代前的三个主要的耀发模型，侧重于耀发辐射性质的解释，亦由于观测历史的原因，只对部份的观测事实有效，有明显的局限性，但它们均分别提出了某些重要的物理思想，如在 Mullan 的热等离子体分层模型中，首次提出热传导加热效应；在逆康普顿效应模型中，提出高速电子的作用问题；以及在星云模型中，第一次把耀发发生的可能高度放到色球层上等等，均对 80 年代的研究提供了重要启示。近来的研究，基本上认为光学耀发发生在色球底部，并且引入耀发面积和类黑体辐射的概念。由于恒星耀发和太阳耀斑爆发的类似性，从太阳物理的角度看，这些观点应更趋合理。并且，其结果将可以与恒星黑子活动区和色球 Ca II 谱斑区的多普勒成像观测结果相比较。

四、耀发的能量来源和加热机制

有关耀发的理论模型，最终都必须联系到能量释放过程的问题，也即耀发的能量激发源和加热机制；而且，要求能够解释反映在不同波段上的大气的不同层次上的耀发现象和它们的关系。

80 年代一系列重要的观测结果，强烈地支持恒星耀发和太阳耀发的类比研究，这就是：(1) Saar(1987)发现耀星上有很强的局部磁场， $\sim 4-6$ 千高斯^[34]；(2) Gershberg(1989)^[35]和 Schakhovskaja(1989)^[36]发现恒星耀发和太阳耀发的能谱的类似性；(3) 恒星耀发光学连续辐射、Balmer 线发射，以及软 X 射线的时间轮廓，都和太阳耀发相似等等。所以，普遍认为，我们可能正面临着处理同一本质的物理现象，恒星耀发亦是一种磁场活动的结果。

太阳耀发的主过程被认为是发生在磁环的上部，是由于磁环的再连接，而产生磁能的释放。尽管许多重要细节还不清楚，但太阳耀发时的硬 X 射线观测表明，有带电粒子的迅速加速。强太阳耀发时，快速电子的截止能 $E_1 \approx 10-20$ keV。现有仪器尚不能完成恒星耀发的硬 X 射线观测，直接观测到有带电粒子加速的是射电观测。在 dMe 矮星中，目前已观测到很多射电爆发，具有亮度温度超过 10^{10} K (Mullan, 1985)，表示存在相干过程^[37]。而解释这一现象的且被最广泛接受的模型是电子回旋加速脉泽辐射，电子是在耀发最初能量释放时被加速的。

磁能释放伴随带电粒子加速的“热化区”的能量，是如何最终通过深层大气的光学耀发和其他电磁波段的辐射途径而释放出来的？这一能量传输过程是目前研究的热门课题，以下是几种可能的能量传输模型：

1. 快速电子或质子流对下层大气的冲击加热

根据 Grinin 和 Soblev (1989)的计算^[38]，若采用带电质子流，质子截止能 $E_1 \approx 3-10$ MeV，能流密度 $F = 10^{11}-10^{12}$ 尔格/厘米²，所提供的气体加热结果，可以解释耀发光极大的光学光谱观测性质；若采用电子流加热，电子截止能要比质子小 $(m_p/m_e)^{1/2} \approx 50$ 倍，

~60—200keV, 光谱指数相同, 结果和质子流加热效应相同。带电粒子穿透大气的深度取决于大气的体密度。以上模型的带电粒子的加热效应, 都是在体密度 $\xi = 10^{22}/\text{cm}^2$ 处达到极大, 如再附加热气体的辐射转移作用, 实际加热区可达到 $\xi = 10^{24}/\text{cm}^2$ 的更深层。这一模型可以对耀发快速阶段提供可接受的解释。它和太阳耀发的典型模型的主要差别是定量上的, 即前者带电粒子具有更高的能量。模型计算表明, 结果对带电粒子是质子还是电子并不敏感, 但一些作者更倾向于质子流^[39,40]。

2. 热传导加热模型

一个具有 E keV 的电子, 假定由于库仑碰撞, 它所能穿透的大气体密度 $\xi_p = 6 \times 10^{19} (E/20)^2/\text{cm}^2$ 。根据计算, 典型的太阳磁环参数是, $L = (0.3-3) \times 10^9 \text{cm}$, $N_e = (1-100) \times 10^9/\text{cm}^3$, 因此, 体密度 $\xi = 3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{20}/\text{cm}^2$ 。这样, 20keV 的电子, 在太阳上可以穿透到色球层, 若电子能量更大些, 就可加热色球, 引起 H_α 耀发, 称“色球电子流耀发”, 耀发谱线有很强的 Stark 致宽效应; 但如果磁环内物质密度较高, 那么 20keV 的电子就会在色球层之上被阻止, 而把能量释放在冕区加热上, 再通过热传导传向色球层, 这样引起的 H_α 耀发, 称“色球热传导耀发”, 其 H_α 谱线比较窄, 且中心不出现反转轮廓。

在恒星上的情况, Haisch (1983) 曾采用以下磁管参数^[41]: $L = (0.2-6) \times 10^{10} \text{cm}$, $N_e = (1-30) \times 10^{12}/\text{cm}^3$, 因此, 体密度 $\xi = 2 \times 10^{21} - 2 \times 10^{24}/\text{cm}^2$ 。所以, 20keV 的能量电子到不了色球层。要么, 可能 Haisch 采用的磁管参数估计过高, 要么是恒星上有可能存在前面所述高达几百 keV 到 1MeV 的电子, 而目前尚缺观测证明。另一方面, 从恒星耀发的高分辨率光谱观测得到, H_α 谱线尽管强度增加, 但并未出现 Stark 致宽效应和中心反转轮廓特征^[16], 所以, M型矮星中大多数的色球耀发可能是热导耀发, 或者说很难找到纯电子流耀发的例子。

对于 RS CVn 型双星, 有人推导其磁环的典型密度和长度, 推导出只有能量大于 300keV 的电子才能穿透色球达到光球顶部。进而认为因为双星的子星表面重力低, 有较长的延伸大气层, 一般电子在较高的大气层上就被阻止住, 只会产生冕区耀发或过渡区耀发, 不会在 RS CVn 型双星中观测到有强的光学耀发。但 1989 年北京天文台双星组首次观测到 HR 1099 的特大能量光学宽波段的耀发, 对上述理论上的预言提出了挑战, 引起对电子流在恒星大耀发中的作用的再讨论。要么是热传导加热, 要么是质子流对深层大气的加热起了主要作用, 这是一个很有意义并需要进一步探讨的问题。

3. X射线加热模型

Mullan (1976) 曾提出耀发时热等离子体上部软 X 射线对下层色球的可能加热效应, 并提供部份在耀发衰减缓变阶段的能源^[28]。近年来, Hawley (1989) 对这种加热模型作了详细的计算^[42], 采用精确的非局部热动平衡辐射冷却函数, 结果得出, 只需取 X 射线观测结果参数的近似值, 就能提供完全可以解释恒星耀发中形成主要发射线所需的气体加热效应。但是, 严格而言, X 射线形成的加热效应, 只对耀发缓变阶段有用, 对快速增亮阶段不是决定性的, 因为不少光学耀发并没有同时找到有 X 射线耀发, 且软 X 射线耀发的时间轮廓滞后于光学耀发。

4. 冲击波加热的流体动力学模型

Katsova 等(1981)认为^[43], 当电子流快速加热时, 红矮星色球会产生流体动力学效应, 即形成冲击波和波前高密度层, 这一层估计以大约 $100\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度向大气深层运动, 而光学耀发就发生在这一冲击波前的高压密度层。这一模型与观测到的关于在耀发极大附近有谱线红翼不对称性的情况相符, 但是她所采用的光学耀发参数相当于恒星弱耀发。进一步的研究, 要与近期观测到的一系列短时标微耀相结合。此外, 这一模型是否能产生强光学耀发事件以及解释有关的种种观测特征, 仍是一个问题。

恒星在耀发时能量的释放, 除通过电磁辐射外, 还会发生物质运动或类太阳星风质量损失的机械能耗。在太阳上, 后者要比前者高几倍。恒星耀发中有关的一些动力学问题, 如耀发中的动量平衡问题, 动能流及与之相关的质量损失问题等等, Mullan (1989)曾作了较好的评述, 可参见[44]。

总之, 恒星的耀发机理, 在理论上和太阳耀发一样是一个仍未解决而更为复杂的问题, 人们期待着有更多的用多波段对耀发的观测结果。目前, 已建立起国际自动望远镜(APT)观测网, 和一系列国际多波段联合观测计划, 如 SYNOP 计划(Linsky 1987)^[45], MUSICOS 计划(Foing 1989)^[46]和 ODIN 计划(Pettersen 1989)等^[47], 可望在 90 年代, 对恒星耀发的观测和理论研究能取得重要的进展。

参 考 文 献

- [1] 翟迪生, 天文学进展, 8(1990), 198
- [2] Gurzadyan, G. A., Flare Stars, Pergamon Press, Oxford, (1980).
- [3] Jarrett, A. H. and Gibson, J. B., *IBVS.*, No. 979, (1975).
- [4] 翟迪生, 天文学进展, 8(1990), 189.
- [5] Gersberg, R. E., *Mem. Soc. Astro. Ital.*, 60 (1989), N. 1-2.
- [6] Zhang, R. X., Zhai, D. S., Zhang, X. B., Zhang, J. T. and Li, Q. S., *IBVS.*, No. 3456, (1990).
- [7] Zhai, D. S., Catala, C., Foing, B. H. and Zhang, R. X., *Asia Rim Colloq.*, New Frontiers in Binary Star Research, p. 68, (1990).
- [8] Henry, G. W., and Hall, D. S., *Ap. J.* 373 (1991), L9-L12.
- [9] Moffett, T. J., *Ap. J. Suppl. Ser.*, 29 (1974), 1.
- [10] Grinin, V. P., in *IAU Symp. No. 137*, p. 299, (1990).
- [11] Gersberg, R. E., and Shakhovskaya, N. I. *Astrophys. Space Sci.*, 95 (1983), 235.
- [12] Pustilnik, L. A., *USSR. Astron. J. Letters*, 14 (1988), 398.
- [13] Shakhovskaya, N. I., *Solar Phys.*, 121 (1989), 375.
- [14] Robinson, R. D., in *IAU Symp. No. 104*, p. 83, (1989).
- [15] Rodono, M., et al., in *IAU Symp. No. 104*, p. 53, (1989).
- [16] Shneeberger, T. J., Linsky, J. L., McClintock, W. and Worden, S. P., *Ap. J.*, 231 (1979), 148.
- [17] Linsky, J. L., et al., *Astron. Astrophys.*, 211 (1989), 173
- [18] Neff, J. E., Brown, A. and Linsky, J. L., in *IAU Symp. No. 104*, p. 111, (1989).
- [19] Doyle, J. G., Byrne, P. B. and Van den Oord, G. H. J., *Astron. Astrophys.*, 224 (1989), 153.
- [20] Giampapa, M. S., in *IAU Colloq. No. 71*, p. 223, (1983).
- [21] Gibson, D. M., in *IAU Colloq. No. 71*, p. 273, (1983).
- [22] Ambruster, C. W., Sciortino, S. and Golub, L., *Ap. J.*, 65 (1987), 273.
- [23] Pailavicini, R., Stella, L. and Tagliaferri, G., *Astron. Astrophys.*, 228 (1990), 403.
- [24] Katsova, M. M. and Livshits, M. A., in *Flare Stars and Related Objects*, ed. by L. V. Mirzoyan, p. 183,
- [25] Haisch, B. M., Linsky, J. L., Bornman, P. L., Antiochos, S. K., Golub, L. and Vaiana, G. S., *Ap. J.*, 267 (1983), 280.
- [26] Gahm, G. F., in *IAU Symp. No. 137*, p. 193, (1990).
- [27] Andrews, A. D., *Irish Astron. J.*, 7 (1965), 20.

- [28] Mullan, D. J., *Ap. J.*, 207 (1976), 289.
 [29] Kodair, K., *Astron. Astrophys.*, 61 (1977), 625.
 [30] Kunkel, W. E., *Ap. J.*, 161 (1970), 503.
 [31] Grinin, V. P. and Sobolev, V. V., *Astrofizika*, 13 (1977), 586.
 [32] De Jager, C., *Astron. Astrophys.*, 156(1986), 95.
 [33] De Jager, C., *Astron. Astrophys.*, 211(1989), 157.
 [34] Saar, S., et al., Preprints in 27th Liege Inst. Astrophys. Colloq., (1987).
 [35] Gersberg, R. E., *Men. Soc. Astron. Ital.*, 60 (1989), 263.
 [36] Shakhovskaya, N. I., in IAU Symp. No. 104, p. 375, (1989).
 [37] Mullan, D. J., *Radio Stars*, ed. by R. M. Hjellming and D. M. Gibson, p. 173, (1985).
 [38] Grinin, V. P., and Sobolev, V. V., in IAU Symp. No. 104, p. 297, (1989).
 [39] Van den Oord, G. H. J., *Astron. Astrophys.*, 207 (1988), 101.
 [40] Simnett, G. M., in IAU Symp. No. 104, p. 357, (1989).
 [41] Haisch, B. M., in IAU Colloq. No. 71, p. 255, (1983).
 [42] Hawley, S. L., in IAU Symp. No. 104, Post papers, p. 49, (1989).
 [43] Kotsova, M. M., Kosovichev, A. G., and Livshits, M. A., *Astrofizika*, 17 (1981), 285.
 [44] Mullan, D. J., *Solar Phys.*, 121 (1989), 239.
 [45] Linsky, J. L., in Cool Stars, Stellar Systems and the Sun, ed. by J. L. Linsky and R. E. Stencel p. 483, (1987).
 [46] Foing, B. H., *MUSICOS Circ.*, Inst. Astrophys. Spatiale, Paris, (1989).
 [47] Pettersen, B. R., *ODIN Circ.*, Inst. Theor. Astrophys., Oslo, Norway, (1989).

(责任编辑 林一梅)

Solar-like Activities in Late-type Stars (Ⅲ): Stellar Flares and Their Physical Models

Zhai Disheng

(Beijing Observatory, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

The present review is given of stellar flares in classical flare stars as well as the RS CVn binary stars. Based on their statistical properties, various physical models of flares are analysed in comparison with observations including recent multi-wavelength monitoring. It is argued by many researchers that the stellar flare is something similar to solar white flare and its optical radiation is of quasi-black-body and from deep chromosphere with limited emission area. The questions about how to understand the energy release processes and the heating mechanism are discussed in the view of solar-stellar connection.