

耀斑中高能电子与高能质子作用之争

甘 为 群

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

摘 要

目前在太阳物理中引起巨大争议的热点问题是：究竟是高能电子还是高能质子在耀斑中起主要作用。长期以来，人们一直认为高能电子在耀斑中的作用占据主导地位。然而最近的 γ 射线观测显示约为 1MeV 的质子所携带的能量可大于电子所携带的能量，从而导致电子、质子作用之争。综合介绍了各家观点，并讨论了可能的结局。

关键词 太阳：耀斑 — 高能粒子 — 太阳：X、 γ 射线

分类号：P182.52

1 引 言

多年来人们通常认为，耀斑的初始能量释放首先是加速电子，加速了的电子在传播过程中与大气作用产生陡升的非热韧致辐射，即脉冲硬 X 射线爆，同时，它还通过库仑碰撞加热大气，从而由此解释一系列耀斑现象。

80 年代中期，Simnett 提出耀斑中加速质子可能占优的观点^[1]。这一观点一经提出即遭反对，十多年来几乎被人们遗忘。1995 年，Ramaty 等人通过分析耀斑的 γ 射线谱线，提出约为 1MeV 的质子可携带巨大的能量^[2]，从而使电子、质子作用之争活跃起来。1996 年底，美国地球物理学会会刊上，以科学中的重大争端为题，发表了一组文章^[3-5]，辩论究竟是电子还是质子在耀斑中起主要作用，可见这一问题已经成为人们普遍关注的焦点。

2 质子为什么长期不受重视

耀斑过程中，在光学、射电、远紫外、软 X 射线、硬 X 射线、 γ 射线等波段均有爆发性辐射，这些辐射可提供加速粒子的信息。毫无疑问，耀斑中有大量的非热加速粒子。为解释硬 X 射线爆，需要大量的非热电子；为解释 γ 射线爆，需要有一定数量大于 30MeV 的非热质子和离子。

如果将大于 30MeV 的质子谱简单地按幂律谱延伸至 1MeV，则很快会发现质子所携带

的能量可超过非热电子，结合一个边缘耀斑观测结果，Simnett 认为 0.2—1MeV 的质子构成耀斑的主要成分，电子加速只不过是次级效应^[1]。问题是小于 1MeV 的质子不能产生通常意义上的可测辐射。直至 1995 年，低能质子的存在仍缺乏有效的观测支持。原则上行星际探测可以检测低能质子，但由于存在星际激波加速，无法区分低能质子是来自耀斑还是产生于星际加速；低能质子可引起 $L\alpha$ 红移^[6,7]，但 Skylab 的观测并未找到耀斑中 $L\alpha$ 红移的迹象^[8]，这可能是 $L\alpha$ 红移持续的时间非常短暂，难以测到^[9]； $H\alpha$ 偏振状态与低能质子的注入有关，但这方面的大量研究^[10]结论不很明确，一是偏振数据很难获得，二是导致偏振的因素多种多样，解释上也不很确切，但近来的观测似有支持 100keV 质子存在的迹象^[11,12]。

低能质子不被重视的另一个原因是它不能直接解释硬 X 射线爆。如果硬 X 射线爆由质子产生，这需要大量大于 40MeV 的质子，这与观测不符。尽管 Simnett 提出过一些解释^[1]，但由于缺乏自洽的模型，终未被人们接受。

3 电子为什么一直占优

非热电子之所以受到重视，原因之一是它的辐射正好在硬 X 波段。在厚靶模型下，非热韧致辐射损失的能量仅占电子束能量的 10^{-4} — 10^{-5} ，通过测硬 X 辐射，很容易估计非热电子所携带的能量，结果发现非热电子的能量足以提供整个耀斑的能量，这意味着，耀斑的初始能量释放大部分转化为电子的加速，加速的非热电子在运动过程中辐射硬 X 射线，并与物质碰撞，加热大气，从而产生一系列的耀斑次级现象。这正是目前广为接受的耀斑图像。一系列的研究均支持这一图像：

- 在经验大气模型中，通过考察能量平衡，非热电子能量沉积可解释色球温度增加^[13-15]。
- 耀斑环电子加速动力学模型预言的温度、密度、速度分布及软 X 射线谱线特征均与观测定性一致^[16-18]。
- 电子束轰击下的铁 $K\alpha$ 线计算结果与观测一致^[19]。
- $H\alpha$ 宽线翼发射被认为是非热电子注入加热或非热电离的结果^[20,21]。
- 硬 X 射线的低能延迟与不同能量电子的飞行时间差一致^[22]。
- “阳光卫星”的硬 X 射线像观测显示两足点同时增亮，支持是非热电子注入的结果^[23]。

此外，还有大量的研究，诸如 Neupert 效应、大气动量平衡等，均显示非热电子是耀斑的能量主体。与此对比，低能质子作用的研究却少有问题。

4 质子的转机

前面第二节已经谈到， $H\alpha$ 偏振测量似有支持低能质子存在的迹象，但真正引起人们重视的是 Ramaty 等人的工作^[20]。他们研究了“太阳极大年卫星”上 γ 射线谱仪观测到的 19 个 γ 射线耀斑中核线形成区第一电离势低的元素与第一电离势高的元素丰度之比，发现 γ 射

线产生区在日冕之下, 为避免 Ne/O 过大, 要求加速粒子能谱幂律延伸至 1MeV, 这意味着质子所含的能量可与电子相比拟, 甚至更大。

Simnett 进一步提出质子占优的有利之处^[24]是加速机制, 因为除直流电场加速机制外, 大多数加速机制更能有效地加速质子而不是电子。即使是直流电场可能有效地加速电子到约 200keV, 但却需要复杂的日冕电流系统^[3]。于是, 电子加速是质子加速的次级效应的观点再一次被提出^[4]。

5 电子、质子作用之争

争论的双方都在努力收集与己有利的观测证据。焦点集中在: 若电子占优必须能解释其能量小于质子; 若质子占优则需较好地解释硬 X 射线爆。

Emslie 等人在文献 [2] 刊出不久, 即撰文^[25]指出: “单凭高能质子具有较大的能量要改变电子的主导地位是证据不足的, 这还要看它的能量分布是否能解释硬 X 射线爆, 其能量沉积是否处在恰当的位置以解释软 X 射线增强。”他们通过计算证明, 仅截止能量大约为 1MeV 的高能质子束可在色球顶部过渡区附近沉积相当的能量, 以与 20keV 以上电子束轰击相比拟。但此时质子的速度远远小于 20keV 以上电子的速度, 不能直接产生硬 X 射线爆。Emslie 还形象地描述到^[5]: “很难想象, 电子呆着不动, 而比电子质量大得多的质子却在大气中传播, 且只在质子停下来之后, 电子才被加速……, 关键是电子加速模型已经获得巨大的成功, 任何负责任的科学家都会毫不犹豫地选择电子作为耀斑中能量运输的主要机制。”

质子占优观点受到 Ramaty 等人的观测支持后, Simnett 进一步定性地解释电子加速的次级过程^[24]: 离子和电子同时加速, 获得同样的速度, 束呈电中性。当束到达过渡区时, 电子受散射而停止, 质子由于大动量而继续传播, 因而出现电场; 如束流量较低, 色球中的电子可以补偿; 反之, 如束流量较大, 由于色球电阻大, 色球不能快速地补充足够的电子, 于是出现电势, 从而加速电子。即认为发射硬 X 射线电子的加速是在色球中完成的。他们还列举了大量的有利于质子的证据, 例如: 关于色球蒸发, 现有许多观测^[26]显示, 软 X 射线谱线蓝移开始于硬 X 射线爆之前; 另外, 耀斑中 H α 红移不对称性较为普遍, 且持续时间大于 30s, 如是电子加速, 需要有一定的能流阈值才能产生与“爆发式蒸发”相对应的 H α 红移; 射电观测显示有些 III 型爆漂移速度很慢, 不能用电子束解释; 此外, 硬 X 射线发射缺乏方向性、微波爆相对硬 X 爆延迟、硬 X 爆中的快速时变结构、硬、软 X 射线之间缺乏精确的相关、远紫外与硬 X 不相关等现象均被认为是质子占优的证据。还有一个常常被提到的事实是, 电子的最高能量仅约 100MeV, 而质子最高能量约达 25GeV, 而且高能电子的相当一部分还是高能质子与大气作用产生 π 介子衰变的结果。 γ 射线相对硬 X 射线的延迟也不难解释, 1MeV 质子当然是在 30MeV 质子之前被加速。

总的看来, “电子”派定量的证据足, “质子”派定性的证据也不少。

6 结局会是怎样

在耀斑中存在低能质子的事实看来已经被人们广泛接受, 这意味着从总能量的角度而言, 质子的作用不亚于电子, 甚至超过电子, 但质子在驱动耀斑现象中能否占主导地位, 现

在还有很大的疑问。首先, 约 1MeV 质子的存在还需要进一步的观测证实, 包括研究新的诊断方法。其次, 电子加速是质子加速次级效应的解释必须量化, 以能自洽地解释硬 X 射线爆; 在此基础上, 方需要进行一系列的质子注入驱动大气响应的模型研究 (这方面已经提前开展了一些工作^[27,28]), 以最终确定质子是否可取代电子的地位。

我们注意到, 在电子质子争论中, 热传导的作用常常被忽略。事实上, 耀斑能量的初始释放有可能存在部分的直接热沉积, 热传导在能量输运过程中起着一定的作用^[29]。另外, 我们最近研究一个 γ 射线大耀斑发现非热电子低能截止能量约为 77keV^[30], 这意味着非热电子携带的能量远远不足以提供整个耀斑的能量, 结果趋向于支持质子供能。对 γ 射线耀斑的进一步统计^[31]发现, 原则上存在两类耀斑: 电子占优事件和质子占优事件。

如此看来, 这场争论的结局已初见端倪, 但现在断言还为时尚早。总之, 这场争端带有根本性, 必将繁荣未来若干年的太阳耀斑物理研究。

参 考 文 献

- 1] Simnett G M, Strong K T. *Ap. J.*, 1984, 284: 839
- 2 Ramaty R, Mandzhavidze N, Kozlovsky B et al. *Ap. J.*, 1995, 455: L193
- 3 Cargill P. *EOS Trans*, 1996, 77: 353
- 4 Simnett G M. *EOS Trans*, 1996, 77: 355
- 5 Emslie A G. *EOS Trans*, 1996, 77: 355
- 6 Orrall F Q, Zirker J B. *Ap. J.*, 1976, 195: 648
- 7 Canfield R C, Chang C R. *Ap. J.*, 1985, 295: 275
- 8 Canfield R C, Cook J W. *Ap. J.*, 1978, 225: 650
- 9 Brosius J W, Robinson R D, Maran S P. *Ap. J.*, 1995, 441: 385
- 10 Henoux J C, Chambe G. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1990, 44: 193
- 11 Metcalf T R, Mickey D, Canfield R C et al. *AIP Conf. Proc.*, 1994, 194: 59
- 12 Saar S H, Martens P C H, Huovelin J et al. *Astron. Astrophys.*, 1994, 286: 194
- 13 Emslie A G, Brown J C, Machado M E. *Ap. J.*, 1981, 246: 337
- 14 Gan W Q, Fang C. *Solar Phys.*, 1990, 125: 333
- 15 Fang C, Henoux J C. *Astron. Astrophys.*, 1983, 118: 139
- 16 Fisher G H, Canfield R C, McClymont A N. *Ap. J.*, 1981, 246: 337
- 17 Gan W Q, Fang C. *Ap. J.*, 1990, 358: 328
- 18 Emslie A G, Li P, Mariska J T. *Ap. J.*, 1992, 399: 714
- 19 Emslie A G, Phillips K J H, Dennis B R. *Solar Phys.*, 1986, 103: 89
- 20 Canfield R C, Gunkler T A, Ricchiazzi P J. *Ap. J.*, 1984, 282: 296
- 21 Fang C, Henoux J C, Gan W Q. *Astron. Astrophys.*, 1993, 274: 917
- 22 Aschwanden M J, Schwartz R A, Alt D M. *Ap. J.*, 1995, 447: 923
- 23 Hudson H, Ryan J. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1995, 33: 239
- 24 Simnett G M. *Space Sci. Rev.*, 1995, 73: 387
- 25 Emslie A G, Henoux J C, Mariska J T et al. *Ap. J.*, 1995, 470: L131
- 26 Plunkett S P, Simnett G M. *Solar Phys.*, 1994, 155: 351
- 27 Henoux J C, Fang C, Gan W Q. *Astron. Astrophys.*, 1993, 274: 923
- 28 Henoux J C, Fang C, Gan W Q. *Astron. Astrophys.*, 1995, 297: 574
- 29 Gan W Q, Fang C, Zhang H Q. *Astron. Astrophys.*, 1991, 241: 618
- 30 Gan W Q. *Astrophys. Space Sci.*, 1998, submitted
- 31 Gan W Q, Lin C M. *Sci. in China*, 1998, submitted

Great Debates on the Role between Electrons and Protons in Powering Solar Flares

Gan Weiqun

(Purple Mountain Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract

A highlight problem now in solar physics is: what are the most important accelerated species in solar flares, electrons or protons? It has been believed for a long time that the electrons dominate particle acceleration in solar flares. But recent γ -ray observations show that quite amount of energy resides in acceleration protons, which induces a great debate on the role between the electrons and the protons in powering solar flares. This paper summarizes different views on the topic, and discusses the possible conclusions in the near future.

Key words Sun: flares—high energy particles—Sun: X-ray, γ -ray

* * * * *

征 订 启 事

本刊 1999 年征订工作业已开始。本刊委托天津市半导体杂志社全国非邮发报刊联合发行部办理订阅事宜。定价每册 7.50 元，全年订价 30.00 元。凡需订阅者请将订刊款通过银行信汇或邮局汇款至下列地址即可：

邮政编码：300220

地 址：天津市陈塘庄岩峰路电子部 46 所内 (天津 412 信箱) 全国非
邮发报刊联合发行部

开户银行：工商银行天津市尖山分理处

银行帐号：605248-1-003734

户头全称：联订服务部

电话及传真：(022) 28345545

请在汇款时注明本刊名称、本刊编号 (5155)、订阅年份、份数、订户名称、收件人姓名、地址、邮政编码，以便本编辑部逐期及时邮寄。

欢迎订阅。谢谢。

《天文学进展》编辑部

1998 年 7 月 20 日