第 46 卷 第 2 期 天 文 学 报 Vol.46 No.2
2005 年 4 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Apr., 2005

流星暴的航天定义*

马月华 徐品新 李广宇 包 纲

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

摘要 定义 ZHR* 以每小时穿过 1000 平方公里天顶截面的，能在铝质表面打出直径不小于 1 厘米的弹坑的流星体数，作为流星群对航天安全威胁强度的定量标志，给出了从 ZHR 到 ZHR* 的换算公式. 用 ZHR* 取代 ZHR 来评价 20 世纪 90 年代以来的一些强流星雨，发现 1998 年的贾可比尼 (天龙座) 流星雨对航天安全来说，是比公认的 1999 、 2001 、 2002 年 3 次狮子座流星暴强数倍的更强流星暴.

关键词 太阳系：流星雨，航天安全

中图分类号： P 134; **文献标识码**： A

1 引言

20 世纪 90 年代开始的一轮狮子座流星雨高潮，不仅引起天文界的兴趣，而且引起航天界的重视，这是因为流星暴所表征的较稠密流星体流 (流星群) 可能伤害在大气层外运行的航天器. 例如，在英仙座流星雨期间， Mir-1 空间站的宇航员听到了流星体的撞击声，且 Mir-1 的太阳能帆板被损坏 [1]; ESA 的 Olympus 卫星失踪也是英仙座流星群撞击的结果 [2]. 1993 年， NASA 为躲避 8 月 12 日可能出现的英仙座流星暴，推迟了原计划 8 月 4 日的航天器发射，并通过遥控指令，改变了哈勃空间望远镜的指向，以避免镜面受到尘粒伤害. 1998 年 11 月 18 日，为躲避可能出现的狮子座流星暴，我国航天部门也对正在运行的航天器采取了保护措施. 1999 年 11 月，根据我们的建议，航天部门调整了 “神舟一号” 飞船的发射安排，躲过了 11 月 18 日发生的狮子座流星暴 (ZHR=3700)，保证了 “神舟一号” 任务的顺利完成.

在天文学中，国际上通常把标准目视每小时流星数 (ZHR) 在 1000 颗以上的流星雨算作流星暴. 按照这种定义， 1999 、 2001 和 2002 年都发生了狮子座流星暴 [3−5].

用 ZHR 来表征流星群的强度 (空间流量，即单位时间穿过单位天顶截面的流星体数目) 是一个简单、直观但并不完善的办法. 流星群流量定义中的流星体数目，需要有一个标准. 例如限定在某一星等范围，或某一质量范围. 当研究流星群空间密度分布时，常取质量大于某一下限的流星体数目来定义流星群流量，而在 ZHR 的定义中采用的是亮于 6.5 等的流星数. 我们知道，流星体在大气层中烧蚀发光的强度是依赖于它的质量和速度的. 在同一质量范围内数目相同的两批流星体中，各有多少流星体能够生成亮于 6.5 等

2004-07-15 收到原稿， 2004-09-09 收到修改稿

* 国家自然科学基金 (10273024) 、中国空间技术研究院和小行星基金会资助

的流星，不仅有赖于流星体的速度大小，而且有赖于各批中大小流星体的组成比例 (有赖于流星数按质量的分布因子). 因此，速度与分布因子不同的两个流星群，即使实际流量相同，其观测到的 ZHR 可能并不相同；反之， ZHR 相同的两个流星群，其流量可能不同；甚至， ZHR 较小的，流量反而较大.

一个流星体对航天器危害的程度，表现在它撞击航天器表面而形成的弹坑大小. 这也依赖于流星体的质量和速度. 但其依赖关系，不同于流星发光强度对流星体质量和速度的依赖关系. 质量和速度不同的两个流星体，在航天器表面撞出较大弹坑者，如果进入大气层烧蚀发光，可能反而发光较弱.

基于以上原因，有一些流星雨，其 ZHR 虽未达到 1000 (因而未被认作流星暴), 但对航天器的威胁程度却超过某些流星暴. 因此，使用星等范围和质量范围内的流星体个数来定义流星群强度，对航天安全来说，都不大合适，而应该用能量范围来定义流星群强度. 本文通过计算，将建议一个物理量，定量刻画流星群对航天安全威胁的强度，以取代或修正 ZHR, 来定义航天流星暴.

2 流星群撞击的均化效应

设 v_0 、 γ 、 m 、 M 和 N 分别是流星体进入大气层的速度 (厘米 / 秒) 、流星数按星等的分布因子、流星的星等、流星体质量 (克) 和流星群的空间流量 (每平方公里每小时颗粒数), 我们有 [6−8]:

$$c(\gamma) = 0.987 - 5.918\gamma + 6.637\gamma^2 - 0.754\gamma^3\,, \tag{1}$$

$$\mathrm{ared} = 37200(\gamma - 1.3)^{-0.748}(\mathrm{km}^2)\,, \tag{2}$$

$$N(m \le 6.5) = c(\gamma)\cdot \mathrm{ZHR}/\mathrm{ared}\,, \tag{3}$$

$$N = N(m \le 6.5)\gamma^{m-6.5}\,. \tag{4}$$

这里， $c(\gamma)$ 是改正因子, 由于目视观测按一定概率遗漏较暗的流星， ZHR 乘上 $c(\gamma)$ 后，才是全部亮于 6.5 等的流星； ared 是与目视视场相对应的大气层 (流星发光层, 高度 100 公里) 面积. 因为目视遗漏在视场边缘多于视场中心，需对视场面积做等效改正，所以 ared 依赖于 γ[7]. $N(m \le 6.5)$ 是亮于 6.5 等的流量， N 是亮于 m 等的流量. 令 M_6 是 6.5 等流星体的质量,

$$M_6 = 10^{27.30-0.435\times 6.5} v_0^{-4.25}\,, \tag{5}$$

$$N(M \ge M_6) = N(m \le 6.5)\,. \tag{6}$$

令 A 是空间流量 N 的质量谱,

$$A = \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}M} = \frac{A(1)}{M^s}\,, \tag{7}$$

其中 $A(1)$ 是单位质量 (克) 流星体流量的谱值， s 是流星数按质量分布因子,

$$s = 1 + 2.3 \log \gamma \,. \tag{8}$$

对 (7) 式进行积分,

$$N(M \geq M_6) = \int_{M_6}^{\infty} A \mathrm{d}M = \frac{A(1)}{(s-1)M_6^{s-1}} \,. \tag{9}$$

由 (9) 式与 (6) 式可得:

$$A(1) = (s-1)M_6^{s-1} N(m \leq 6.5) \,. \tag{10}$$

设流星体撞击航天器表面形成的弹坑是半球形. 流星体本身的质量比弹坑半球体质量小得多, 可以忽略. 设流星体的动能全部转化成击碎半球体物质所需的能量, 从而确定弹坑的大小. 假设航天器就处在流星发光层外不远的空间, 忽略航天器本身的速度, 则流星体撞击航天器的速度也是 v_0. 令 ρ 为弹坑物质密度 (克 / 厘米 ^{3}), ε 为击碎每克弹坑物质所需的能量 (尔格 / 克), R 为弹坑半径 (厘米), 我们有:

$$\frac{M v_0^2}{2} = \frac{2\pi}{3} R^3 \rho \varepsilon \,, \tag{11}$$

把 A 的单位化为每平方厘米每秒每克颗粒数,

$$A^* = A/(3.6 \times 10^{13}) \,. \tag{12}$$

令 α 是质量大于 M_α 的流星体在单位时间 (秒) 内撞出的弹坑占横截面积的百分比,

$$\alpha = \int_{M_\alpha}^{\infty} \pi R^2 A^* \mathrm{d}M \,. \tag{13}$$

设未经撞击的横截面积为 S_r, t_a 为横截面积被弹坑覆盖 1% 所经历的时间 (秒),

$$\mathrm{d}S_r = -\alpha S_r \mathrm{d}t \,, \tag{14}$$

$$t_a = -\frac{1}{\alpha} \int_1^{\frac{99}{100}} \frac{\mathrm{d}S_r}{S_r} = \frac{\ln 100 - \ln 99}{\alpha} \,. \tag{15}$$

设航天器表面为铝质, $\rho = 2.7$ 克 / 厘米 ^{3}, $\varepsilon = 10^9$ 尔格 / 克, 取 M_α 为地球轨道附近太阳光压所允许的最小微流星体质量 5.2×10^{-14} 克, 并按国际惯用的流星暴标准取 ZHR=1000, 将 (1)—(12) 式代入 (13) 式对 M 积分. M 在 (13) 式的被积表达式中出现的形式是 $M^{2/3-s}$, 我们设

$$\frac{2}{3} - s = -\left(\frac{1}{3} + 2.3 \log \gamma\right) < -1 \,. \tag{16}$$

(≥ -1 的情况对应于更小的 γ 值, 在下面讨论表 1 之后可知, 更小的 γ 值对于表 1 没有讨论价值.) 积分结果得到 α 的表达式如下

$$\alpha = 4.032\times10^{-9} v_0^{\frac{4}{3}} \frac{c(\gamma)(\gamma-1.3)^{0.748}}{37.2\times3.6\times10^{13}} \left(\frac{3.21\times10^{16}}{v_0^{4.25}}\right)^{2.3\log\gamma} \frac{2.3\log\gamma}{2.3\log\gamma-\frac{2}{3}}, \qquad (17)$$

其中 v_0 改取公里 / 秒为单位，以便使用.

将 (17) 代入 (15), 计算结果见表 1, 得到当 ZHR=1000 时的 t_a 随 v_0 和 γ 取值的情况. 从表 1 可见， (1) 速度相同， γ 越大 (富含暗流星), t_a 越小，这说明暗流星对航天器表面的累积伤害不容忽视； (2) 同一 γ 值，速度越大， t_a 越大，这是因为同等亮度的流星，其 $Mv_0^{4.25}$ 或 Mv_0^4 相同 [7,9], 若 v_0 较大，其能量 $Mv_0^2/2$ 反而较小，所以 t_a 就大. (3) t_a 很大而且随 v_0 和 γ 而变化的幅度也很大，从 $v_0=20$ 公里 · 秒 $^{-1}$ 、 $\gamma=3.4$ 时的 6 小时迅速攀升直至 $v_0=70$ 公里 · 秒 $^{-1}$ 、 $\gamma=2.0$ 时的一两千年. 我们知道，流星暴一般只持续几个小时. 从表 1 可见：除了 v_0 较小而 γ 很大的一小部分情况外，流星暴对航天器表面的累积伤害可以忽略！但从上述的推导过程中，就会发现：这个结论是 (13) 式的均化效应造成的. (7) 式表明，较大流星体的谱值是很小的小数. (13) 式把弹坑面积乘以谱值，这就相当于把弹坑分割成许多很小的部分，均匀分配到很长的时间过程里面逐渐形成. 这与事实大不相符. 实际上，弹坑的形成是高度 “量子化” 的：不撞则已，一旦撞上就在瞬时间形成一个弹坑，具有或大或小的面积. 因此，我们不能用 t_a 来表征流星暴的航天威胁，而应当考虑流星群中较大撞击事件的发生概率. t_a 只能用作微流星体对航天器长时间作用的表征.

表 1　ZHR=1000 的 t_a (秒)

Table 1　The values of t_a (s) when ZHR=1000

v_0 (km/s)	γ	t_a	v_0 (km/s)	γ	t_a	v_0 (km/s)	γ	t_a
20	2.0	7.74E9	30	2.0	1.49E10	40	2.0	2.36E10
	2.2	1.92E9		2.2	4.34E9		2.2	7.74E9
	2.4	2.35E8		2.4	6.17E8		2.4	1.22E9
	2.6	2.95E7		2.6	8.90E7		2.6	1.95E8
	2.8	4.12E6		2.8	1.41E7		2.8	3.38E7
	3.0	6.46E5		3.0	2.49E6		3.0	6.49E6
	3.2	1.13E5		3.2	4.87E5		3.2	1.37E6
	3.4	2.19E4		3.4	1.05E5		3.4	3.18E5
50	2.0	3.38E10	60	2.0	4.54E10	70	2.0	5.81E10
	2.2	1.21E10		2.2	1.75E10		2.2	2.39E10
	2.4	2.08E9		2.4	3.22E9		2.4	4.65E9
	2.6	3.58E8		2.6	5.88E8		2.6	8.94E8
	2.8	6.66E7		2.8	1.16E8		2.8	1.85E8
	3.0	1.37E7		3.0	2.51E7		3.0	4.19E7
	3.2	3.07E6		3.2	5.93E6		3.2	1.03E7
	3.4	7.54E5		3.4	1.52E6		3.4	2.76E6

3 流星群的较大撞击事件

我们把撞出弹坑直径在 1 厘米以上的较大流星体称作危险流星体. $N(2R \geq 1)$ 是危险流星体的空间流量. 令 M_χ 是弹坑直径等于 1 厘米的流星体质量，我们有：

$$M_\chi = \frac{\pi \rho \varepsilon}{6 v_0^2} \,. \tag{18}$$

$$N(2R \geq 1) = N(M \geq M_\chi) = \frac{A(1)}{(s-1) M_\chi^{s-1}} = \mathrm{ZHR} \frac{c(\gamma)}{\mathrm{ared}} \left(\frac{M_6}{M_\chi} \right)^{s-1} \,, \tag{19}$$

仍取 ZHR=1000 和铝质表面，算得不同 v_0 和 γ 情况下的 $N(2R \geq 1)$ 如表 2 所示.

表 2 ZHR=1000 的 $N(2R \geq 1)$ (每平方公里每小时的颗粒数)

Table 2 The values of $N(2R \geq 1)$ when ZHR =1000

v_0 (km/s)	γ	$N(2R \geq 1)$	v_0 (km/s)	γ	$N(2R \geq 1)$	v_0 (km/s)	γ	$N(2R \geq 1)$
20	2.0	1.23	30	2.0	0.66	40	2.0	0.42
	2.2	2.39		2.2	1.16		2.2	0.70
	2.4	4.22		2.4	1.90		2.4	1.08
	2.6	6.97		2.6	2.92		2.6	1.57
	2.8	10.90		2.8	4.27		2.8	2.19
	3.0	16.31		3.0	5.99		3.0	2.95
	3.2	23.51		3.2	8.15		3.2	3.84
	3.4	32.84		3.4	10.77		3.4	4.88
50	2.0	0.30	60	2.0	0.22	70	2.0	0.18
	2.2	0.47		2.2	0.34		2.2	0.26
	2.4	0.70		2.4	0.49		2.4	0.36
	2.6	0.97		2.6	0.66		2.6	0.47
	2.8	1.31		2.8	0.86		2.8	0.60
	3.0	1.70		3.0	1.08		3.0	0.74
	3.2	2.14		3.2	1.33		3.2	0.89
	3.4	2.64		3.4	1.60		3.4	1.05

$N(2R \geq 1)$ 正比于流星群中危险流星体的撞击概率. 表 2 从 $v_0 = 20$ 公里 · 秒 $^{-1}$ 、$\gamma = 3.4$ 时的 32.84 逐渐减小至 $v_0 = 70$ 公里 · 秒 $^{-1}$ 、 $\gamma = 2.0$ 时的 0.18, 变化幅度比表 1 小得多，且从左上到右下的对角线上恰好 $N(2R \geq 1) \approx 1$. 这启发我们：如果把

$$N(2R \geq 1) \geq 1 \tag{20}$$

定为流星暴的标准，是比较合理的，恰与 ZHR≥1000 的惯用标准对应. 用语言来表达流星暴的这个新标准就是：每平方公里每小时至少有一个流星体能在铝质表面打出直径不小于 1 厘米的弹坑.

为了把这个新标准同惯用的 ZHR≥1000 标准定量的联系起来，我们把 (20) 式写成：

$$N(2R \geq 1) = \frac{\mathrm{ZHR}}{1000} \cdot 1000 \cdot \frac{c(\gamma)}{\mathrm{ared}} \left(\frac{M_6}{M_\chi}\right)^{s-1} \geq 1\,. \tag{21}$$

令

$$n^* = 1000 \cdot \frac{c(\gamma)}{\mathrm{ared}} \left(\frac{M_6}{M_\chi}\right)^{s-1}\,, \tag{22}$$

n^* 在数值上就是表 2 所给 ZHR=1000 的 $N(2R \geq 1)$ 之值. 于是 (21) 式可写成：

$$\mathrm{ZHR} \cdot n^* \geq 1000\,. \tag{23}$$

令 ZHR*=ZHR$\cdot n^*$, 可称 ZHR* 为 “航天 ZHR”, 于是流星暴的新标准可表示为：

$$\mathrm{ZHR}^* \geq 1000\,. \tag{24}$$

n^* 是 v_0 和 γ 的函数，可直接表达为：

$$n^* = \frac{c(\gamma)(\gamma - 1.3)^{0.748}}{37.2} \left(\frac{1.181 \times 10^4}{v_0^{2.25}}\right)^{2.3 \log \gamma}\,, \tag{25}$$

其中 v_0 改取为公里 / 秒单位，以便于使用.

换一个视角看,

$$\mathrm{ZHR}^* = 1000 N(2R \geq 1)\,, \tag{26}$$

也就是说， ZHR* 是每小时穿过 1000 平方公里横截面的危险流星体数.

我们选取 20 世纪 90 年代以来 10 个反常流星雨峰值 [3−5,8,10−14] 作为例子来计算 ZHR*, 见表 3. 其中 v_∞ (公里 / 秒) 是流星群未受地球引力影响的对地速度. v_0 是由 v_∞ 经地球引力加速而形成的.

$$v_0^2 = v_\infty^2 + 2 \times 398600.5/6470\,. \tag{27}$$

表 3 10 个例子

Table 3 10 examples

Meteor shower	$\lambda_{\max}$(2000.0)	v_∞ (km/s)	v_0 (km/s)	γ	ZHR	M_6 (10^{-4}g)	M_χ(10^{-4}g)	ZHR*
1991 Perseids	139.580	59	60.04	1.9	350	0.462	0.392	61
1992 Perseids	139.500	59	60.04	2.1	250	0.462	0.392	70
1993 Perseids	139.535	59	60.04	1.8	300	0.462	0.392	39
1994 Perseids	139.595	59	60.04	1.8	250	0.462	0.392	33
1995 α Monocerotids	239.321	65	65.94	2.51	350	0.310	0.325	166
1998 June Bootids	95.662	18	21.15	2.22	102	38.9	3.16	234
1998 Giacobinids	195.075	20	22.87	3.0	720	27.9	2.70	8429
1999 Leonids	235.285	70.5	71.37	2.3	3700	0.221	0.278	1097
2001 Leonids	236.458	70.5	71.37	2.25	3430	0.221	0.278	937
2002 Leonids	236.893	70.5	71.37	2.92	2940	0.221	0.278	1915

表 3 给出 1998 年贾可比尼 (天龙座) 流星雨顶峰 ZHR*=8429, 它是 1999 年狮子座流星暴 (ZHR*=1097) 的 8 倍、 2002 年狮子座流星暴 (ZHR*=1915) 的 4 倍. 至于 2001 年狮子座流星暴 (ZHR*=937), 如果用 ZHR*=1000 作为流星暴的标准, 它还未达到流星暴的程度. 当然, 流星暴标准只是提醒人们警觉的一种人为标志, 供航天防护工作参考, 并不表示在物理上有什么质的飞跃. 另一方面, ZHR* 代表的是撞击概率, 对于某一特定的航天器来说, 也可能在 ZHR* 较小时恰好受到撞击, 但对大量航天器来说, ZHR* 较大时, 被撞击的危险较大.

参 考 文 献

1 Lenorovitz J M. Aviation Week and Space Technology, 1993, August 23, 22
2 Caswell R D, McBride N, Taylor A D. Int J Impact Eng, 1995, 17: 139
3 Arlt R, Bellot Rubio L, Brown P, et al. WGN, 1999, 27(6): 286
4 Arlt R, Kac J, Krumov V, et al. WGN, 2001, 29(6): 187
5 Arlt R, Krumov V, Buchmann A, et al. WGN, 2002, 30(6): 205
6 Koschack R, Rendtel J. WGN, 1988, 16: 5, 149
7 Koschack R, Rendtel J. WGN, 1990, 18(2):, 44, 18(4): 118
8 Arlt R. WGN, 1998, 26(6): 256
9 Hughes D W, Williams I P. MNRAS, 2000, 315: 629
10 Koschack R, Arlt R, Rendtel J. WGN, 1993, 21(4): 152
11 Rendtel J. WGN, 1993, 21(5): 235
12 Rendtel J. WGN, 1994, 22(6): 205
13 Rendtel J. WGN, 1995, 23(6): 200
14 Rendtel J, Arlt R, Velkov V. WGN, 1998, 26(4): 165

Astronautic Definition of Meteor Storm

MA Yue-hua XU Pin-xin LI Guang-yu BAO Gang

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

Abstract ZHR* is defined as the number of meteoroids passing 1000 km^2 zenith area per hour which can form craters no less than 1 cm in diameter on a aluminum surface. The relationship between ZHR and ZHR* is deduced. To evaluate the strong meteor showers since 1990s by ZHR* instead of ZHR, it is found the Giacobinids (Draconids) in 1998 is much stronger than the Leonids in 1999, 2001 and 2002 for spaceflight security.

Key words solar system: meteor shower, spaceflight security