

冰晶的位态与光柱林立

安徽宿县地区气象局
陈宜敬

关于光柱林立现象的进一步探讨

本刊今年第8期上刊登的王鹏飞同志《光柱林立》一文，对冬季在我国北部出现的光柱现象作了成因分析后，引起了不少同志的兴趣，有的同志从一些侧面又作了一些分析。在利用该文时，由于本刊对附图制作不够严格，也引起一些读者的误解。现在我们摘要选登几篇稿件，并将王鹏飞同志的补充分析也一并刊登于下。

王鹏飞同志《光柱林立》一文，描绘了我国东北寒冬夜间雪前、雪后曾出现“光柱林立”绚丽壮观的景色，并阐述了造成这种现象的原理。读后，颇受启示。冰晶的位态与光柱的形成到底有什么关系？光柱的直立和突然生消又是什么原因呢？

当你拿一面镜子以一定的角度对着太阳，在你面前的某处就会出现一个亮斑，角度变亮斑位置也变，而且太阳、亮斑总是对着镜面，这种现象叫做镜面反射。假若人的眼睛正位于光斑之处，就会感到阳光刺目，犹如太阳直射，好象太阳就在镜子的方向。严冬低空有冰晶下落时，在灯光的照射下，这些表面光滑并呈六角形横截面的冰针和冰片，就象无数个小镜子反射灯光，由于冰晶的空间位置和姿态（取向）不同，反射光的方向也就不同，因此，人目所接收到的反射灯光，仅是来自位于特定位置和取向的冰晶而已。

片状和针状冰晶在平静的大气中降落时，大多数以其较大的表面大体平行于地面或略有摆动。因此，我们假定冰晶的横截面平行于地面。为分析简便，在我们的讨论中也不考虑冰晶的双折射和二次反射。

先讨论人目和灯等高度的情况。假如在人目和灯之间的上方有三个等高度的冰晶A、B、C，A的垂直投影正落在人目(Q)和灯(P)的连线上并平分QP，B、C分别位于A的两侧。作一个包括QP平行于地面的平面Y，和包括QP垂直于地面的垂面Z。B、C的垂直投影落在Y平面的N和O点，把P、N和P、O分别连接起来，得到∠NPQ和∠OPQ。根据反射定律，入射角等于反射角和入射线、法线及反射线必位于同一个平面，在弥散光源P的照射下，我们很容易画出A、B、C三个冰晶的反射光线AQ、BS、CR(见图1)。由于B、C位于A的两侧，BPS面与APQ面有夹角∠NPQ，CPR面与APQ面有夹角∠OPQ，所以三条反射光线并不重合，只有冰晶A的反射光线AQ才能达到人目。由于A的垂直投影正落在人目和灯的连线上，故A冰晶必位于Z面上，由此得出只有冰晶位于Z垂直面上，才可能对光柱的形成有最大的贡献。

同理，假若A冰晶的前后分别有E、F两个冰晶，A、E、F同高并都位于Z垂直面上。在镜面反射时，根据反射定律我们可画出图2。由图2不难看出：E、F两个冰晶产生的反射光线分别是EG、FH，这两条反射线并不能达到人目，而人目所能接收到的反射光线仍来自A冰晶。

通过对A、B、C、E、F五个冰晶的讨论，可得出如下的结论：只有冰晶位于人目和灯连线正中间点的垂直线(即PQ的垂直平分线)上时，才能对光柱的形成有贡献。依此可画出图3。

由图3看到，位于灯源上方的冰晶，以“下表面”反射灯光，位于灯源下方的冰晶，则以“上表面”反射灯光。由于位于特定位置的冰晶为数众多，而又高度不一，因此就有无数的反射光线以不同的角度进入人目。夜

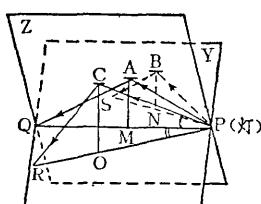


图 1

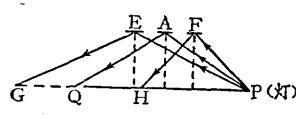


图 2

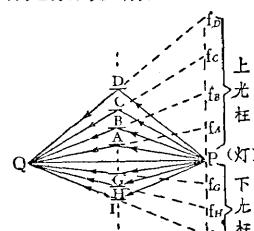


图 3

随意位置的冰晶所产生的反射光都可达到人目，而人目所能接收到的反射光，只有来自图1中AM上的冰晶。由于AM垂直于地面，则人目接收到的反射光线必须在垂直于地面的平面上，这个平面通过灯在空间的投影应是一条垂直于地面的光线。由于灯光源有一定的大小，而更重要的是人目有一定的接收面积，位于AM延长线上及其附近的冰晶产生的反射光均能被人目所接收，所以人眼看到的并不是直立于地面的光线，而是直立于地面的光柱。当夜晚灯光源多时，就形成了许多直立于地面的光柱，这就是所谓“光柱林立”的壮观幻景。

众多的冰晶是不会突然生消的，但光柱的出现却可以是突然的。这是因为冰晶不位于人灯之间的正中间天空(即图3中的PQ的垂直平分线)上时，它对灯光的反射就进入不了人目，尤其对一个面对灯光前进的行者而言，原来他远离光源，即使灯附近的天空有冰晶的存在，由于未满足上述产生光源柱的条件，他看到的仍是一个个的灯光，随着他的前行越来越接近灯光源，当冰晶群的前沿距行者和灯光源的距离相等时，就立即满足了形成光柱的条件，直立于地面的光柱就会突然出现在行者的眼前。光柱的消失通常不应是突然的，但如果冰晶出

夜间天空黑暗，人目所能看到的参考点只能是灯部，这些反射光线在夜空中的投影就分别位于灯的上方和下方。灯以上的冰晶形成上光柱，灯以下的冰晶形成下光柱。之所以是直立的光柱，关键在于不是

现的范围不大，由于行者继续前进，冰晶群的后沿不再能够位于人、灯连线的垂直平分线上，或者低层空间出现阵性大风而改变了冰晶的姿态，那么维持光柱的条件也可立即消失。

下面讨论第二种情况，即灯的高度大于人目的高度。即相当于图3中的Q点垂直位移到Q'点。由图3不难看出，只要Q点下移，位于灯光源高度以上的冰晶若还是位于PQ线的垂直平分线上，其反射的光线是无法被人目Q'所接收，必须相应的向右下方移动。依据入射角必等于反射角和反射线又必须达到人目Q'的原则作图，得到了图4的反射光线的图形。由图4看出，形成上光柱的冰晶必须靠近灯的一侧，距离灯的水平距离总小于灯和人目之间水平距离的二分之一。从图4中还看出，对形成上光柱有贡献的冰晶其空间分布，由直立变成前下倾了。人目和灯高度差之间的冰晶，以其“上表面”反射灯光，故反射线达到不了人目之中，所以对形成下光柱没有贡献，从而造成了上、下光柱的脱节。位于人目高度以下的冰晶，从原理上说也可以形成下光柱，但往往人是站在地面上，人目高度很低而冰晶又须在人的近旁，故反射光在夜空中的投影达不到灯的下方。因此，有理由认为下光柱在通常情况下是不出现的。

通过对以上两种情况的分析，可得出三点看法：(1) 冰晶的表面反射是形成光柱的根本原因；(2) 冰晶的位态与光柱的形成关系极为密切，能对形成光柱有贡献的冰晶，必位于特定的位置上；(3) 冰晶总是由上向下降落，故上光柱总应优先出现。

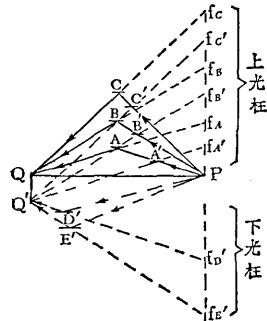


图4

关于《光柱林立》一文的补充意见

湖北黄岗地区气象局 杨起华

王鹏飞同志的《光柱林立》一文对黑龙江地区出现的奇异壮观的光柱夜景作了精辟的科学说明，使读者们看后即知：啊，这原是一种在特定气象条件下所产生的一种有趣的光学现象，这种“光柱”原来是由于空中无数平行于地面（水平面）的冰针以其较大的上、下表面将灯光反射入人目而形成的一种视觉幻景（虚象）！该文的基本观点笔者完全赞同，但在光学作图和其它个别问题上提出两点补充意见和不同看法。

1. 形成垂直射向夜空的光柱幻景是由于空中无数平行于地面的冰针以其较大的下（或上）表面对灯光产生镜面反射所致，但在无数平行于地面的冰针中，并非每个冰针的反射光都能进入人目，从而形成光柱幻景，只有部分占有有利空间位置的冰针，它们能将灯光反射入人目，形成光柱幻景，我们且把这些冰针称为“有效冰针”。实际上，有效冰针在空间的位置是有着一严格的规律性，在三种情况下有三种不同的排列方式和三种不同的成像效果：

①当人目与光源（灯）处在同一水平面上（参阅图3），只有在垂直中距线上的冰针，才能将灯光反射入人目，从而形成光柱幻景，而且冰针所在高度愈高，其进入人目的反射光与水平面的夹角也就愈大，因而“光柱”也就愈高（如图3中C比B高， f_c 比 f_B 也要高）。各有效冰针均排列在人目与光源间的垂直（地面）中距线上。此时，人们看到的将是连续的“全光柱”（上、下光柱与光源连成一线）。

②当人目低于光源时（图5），有效冰针仍位于人目和光源的一垂直面上，但分居于垂直中距线的两侧：靠近光源一侧的有效冰针（它们的位置均高于光源）以其下表面反射灯光入人目而形成“上光柱”；而靠近观测者一侧的有效冰针（它们的位置均低于人目）则以其上表面反射灯光入人目而形成“下光柱”，但在下光柱与光源之间必有一无光柱段，其长度应等于人目与光源的水平高度差。此种情况下，各有效冰针分别排列在两条有规则的曲线上：形成“上光柱”的冰针排列在以光源为渐近点、以垂直中距线为渐近线的一条向上伸展的曲线上；形成“下光柱”的冰针排列在以人目为渐近点、以垂直中距线为渐近线的另一条向下伸展的曲线上。这就是说它们的空间位置呈准双曲线形*。亦如①中所述，当冰针位置较高时，其反射光对应在“光柱”上的虚光点也较高（如

* 若以人目为原点，在人目和光源所在的垂面上作一直角坐标系，令人目与光源的水平距离为 s ，水平高度差为 b ，有效冰针的坐标为 (x, y)

则由图7知 $\angle 1 = \angle 2$ （入射角 = 反射角）冰针B的水平线和 x 轴平行，

$$\therefore \angle 3 = \angle 4 = \angle 5$$

$$\tan \angle 3 = \tan \angle 5$$

$$\text{即 } \frac{y - b}{s - x} = \frac{y}{x} \quad (0 < x < s)$$

$$\text{整理后得 } y = \frac{b}{2} + \frac{bs}{4x - 2s} \quad (0 < x < s, \text{ 且 } x \neq \frac{s}{2})$$

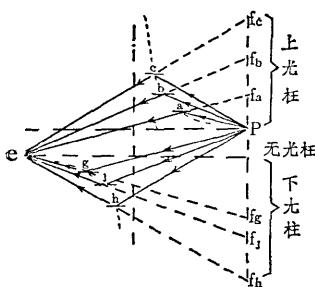


图5 人目低于光源时的情形

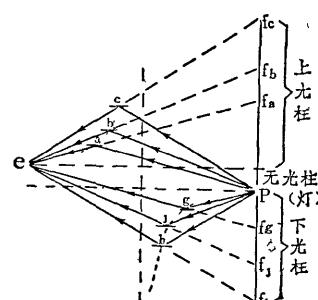


图6 人目高于光源时的情形

图5中 f_e 比 f_b 要高)。

③当人目高于光源时(图6),其时所看到的“光柱”与②例恰好相反,无光柱段将出现在上光柱与光源之间,长度等于人目与光源的水平高度差。有效冰针仍呈准双曲线形排列,但是形成“上光柱”的有效冰针将是靠近人目一侧,形成下光柱的有效冰针则靠近光源一侧。冰针的位置较高者,其反射光在“光柱”上的对应虚光点亦高(如图6中 f_c 高于 f_b)。

2.由对以上的三种情况分析可知:有效冰针所在位置的高低是决定“光柱”高低的因素之一,在其它情况相同的情况下,冰针较高时其反射光所对应的“光柱”也较高。因此“光柱”自上而下的消失也许就是一种必然规律了。

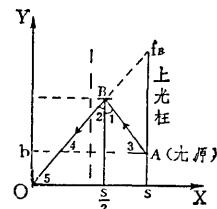


图7

光柱林立现象的进一步探讨

王鹏飞

上面两位同志的看法,虽有一定道理,但并不全面,与实际出现的光柱现象,不相符合。为什么会出现这些看法呢?我想这与8月号这篇文章所附的图印得不准确有关。那张图把造成光柱的冰晶,印得不在入射光与反射光的转折处,却印成为a、b、c、d、g、h、i、j八个字母下的横划,从而易使人误认为冰晶的反射表面好象是严格地呈水平状态。其实,我当初画的时候,是这样画的(见图8):先把空中任一点(例如c点)与人目(e)和灯光(l)分别连成两条线(lc和ce线),然后作此两条线在c点的夹角的分角线,使 $\angle 1 = \angle 2$ 。然后再作垂直于此分角线的短划。此短划两侧,才表示冰晶的上下表面。由此可以看出,反射灯光并造成光柱的冰晶c,就不一定严格地与地面(水平面)平行了。

为了强调冰晶上下表面不必要严格水平,我在8月号那篇文章中,曾有两处强调说:“(冰晶是)以其较大的表面,大体平行于地面(水平)的状态、或略有摆动地漂浮下降”。这里,“大体”、“摆动”两词就意味着冰晶上下表面不严格平行于水平面。“略有”一词,意味着冰晶上下表面虽不严格平行于水平面,但又是接近于平行水平面。这里,“摆动”又表示冰晶不仅在铅直的光路平面内有前后轻微俯仰摇摆,而且还在铅直的光路平面上,有左右轻微摇摆(象跷跷板那样)的运动。正象一张白纸从上向下飘落的情况相似,白纸面不会严格地水平下降的。

在冰晶上下表面不严格水平的情况下,我们先谈冰晶前后俯仰造成的光柱情况。先参看图9。图中人目(e)并不与灯(l)在同一水平线上(关于人目与灯在同一水平线上的情况,可以认为是这个图的一个特例,因而不再讨论)。设在任意点c处有一冰晶,该冰晶的上下表面或是处于严格水平状态,如图中K',或是由于在光路平面内前后俯仰摆动而处于与水平有一角度的K的状态。N'及N分别是状态K'及K时冰晶反射面的法线。可以看出,虽然当冰晶上下表面处于严格水平时,反射灯光ce'不能进入人目,但冰晶摆动时,总有一个摆动的位置K,使反射灯光ce,正好能进入人目e。此时人目就会感觉似有光线自 f_c 处射来,此光线是光柱的构成成分。从这个图中,我们可以得出如下结论:

1.位于光柱方位的铅直平面上的任一点的冰晶,只要其上下表面在前后俯仰摆动中达到一定的取向,就可以供人目以反射灯光。如图10所示,虽严格水平的冰晶b,必须位于人目、灯光连线le的铅直平分线上,才能把反射灯光送入人目。但摆动至适当取向的冰晶a及c,它们并不位于上述铅直平分线上,却仍能把反射灯光送入人目(e)中。

2.在图9中可知,在人目高度和灯光高度间的冰晶,也能对造成光柱有贡献。

3.在图9中,人目低于灯光,而当冰晶位于K的取向时,见到的反射光似发自光柱中 f_c 的部位,而 f_c 的位置正好在灯光水平线与人目水平线之间。因此,前面说的光柱脱开情况就不会出现。换言之即使人目与灯光不在同一高度上,上下光柱仍可相接。

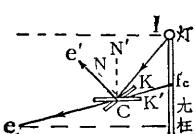


图9

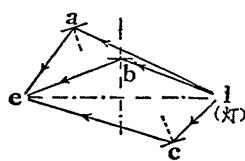


图10

4.由于有光柱时,空中冰晶很多,它们在空中各处均作不严格的近乎水平的前后摇摆飘降,又由于对光柱上任一点 f_s 来说,空中任一点上冰晶,只要其反射灯光与 f_s e线正合,都可看作是光柱上 f_s 点来光的供应者。如图11。图中a、b、c三个冰晶,它们在光路铅直平面上前后俯仰摆动,冰晶a的上下表面比冰晶c要较近乎水平些,冰晶b的上下表面的水平程

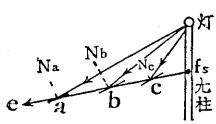


图 11

关，但主要还是与冰晶是否转为雪花、镜面反射是否转为漫反射的现象或冰晶在空中的“有”、“无”，更为密切些。

附带要说明的，我们上面指出的，当人目与灯光不在同高度时，上光柱仍可与下光柱相连。这并不是说有了上光柱，必须同时有下光柱，上下光柱不一定必须同时出现。例如，在图 12 中，当冰晶飘浮的高度较高，冰晶高度角大于灯光高度角时（即 $h_a > h_l$ ），就只能出现上光柱，当上空无冰晶，而冰晶高度角小于灯光高度角时（即 $h_b < h_l$ ），就只能出现下光柱。图中冰晶 a，形成上光柱上的光点，冰晶 b，形成下光柱上的光点。又当人目高于灯光时，则当冰晶的俯角小于灯的俯角时，可出现“上光柱”，当冰晶俯角大于灯的俯角时，可出现“下光柱”。理由与图 12 相似，不另作图来表示了。

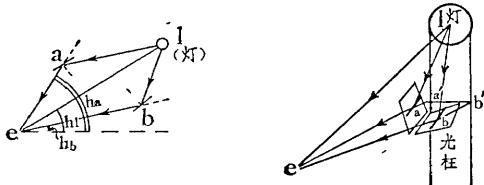


图 12

图 13

来的光线。但是既然 α 为最大下倾角，那末由于冰晶摆动，必有自 0 到 α 的各种下倾角的冰晶面存在，它们都有分别为左侧下倾及右侧下倾的对称冰晶能供应反射灯光。它们造成图 13 中光柱内自 a' 到 b' 之间各点的光，从而促使光柱具有一定宽度。其中正中的光来自 $\alpha=0$ 的冰晶。这种 $\alpha=0$ 的冰晶也并非严格水平的，它仍有前后俯仰的摆动。

注意，在图 13 中，造成的光柱宽度，是由最大下倾角 α 大小所决定。按照类似的道理，也可解释上光柱的宽度之形成。

但这个宽度，还仅仅是灯光中心 l 的来光所造成。事实上灯的本身有宽度，在此宽度中每一个光源点，均可造成类似 a' b' 的光柱宽度，因此叠加起来，就使光柱更宽。

根据上面的讨论，我们对光柱现象，就有了更深入的理解。可归纳为下列各点：

1. 形成光柱的冰晶，在空中飘浮下降时，其上下表面并非严格水平，而是前后左右俯仰摇摆的。
2. 由于冰晶的前后俯仰摇摆，所以当灯光与人目位于同一高度时，造成光柱的冰晶，并不必须位于人目与灯光连线的铅直平分线上。
3. 由于冰晶的前后俯仰摇摆，所以当灯光与人目不在同一高度时，造成光柱的冰晶，并不必须位于双曲线上。而且当有上光柱与下光柱同时存在时，其间并不必须出现上下光柱之间的空隙。同时，在灯光和人目高度之间的冰晶，仍能在形成光柱中起作用。
4. 在冰晶有前后俯仰摇摆的前提下，光柱上某点 f_s ，可以由人目 (e) 与该点间所存在的许多冰晶中，任一具有合适的上下表面取向的冰晶形成，只要该冰晶的反射灯光与 $f_s e$ 线重合即可。因而形成光柱，并不十分困难。
5. 在冰晶有前后俯仰摇摆的前提下，当灯光高于人目时，“上光柱”是冰晶的高度角大于灯光高度角的条件下形成的；“下光柱”是冰晶的高度角低于灯光高度角的条件下形成的。而当灯光低于人目（例如人在高岗，高堤上、公路上向下望低处灯光），则“上光柱”是冰晶的俯角小于灯光的俯角（或看冰晶是仰角，而看灯光为俯角）时形成；“下光柱”是冰晶的俯角大于灯光的俯角时形成的。
6. 光柱的突然出现或消失，与产生光柱的冰晶在空中由“无”变“有”，或因空中温湿条件的改变，使冰晶转化为雪花，或冰晶下降到地，空中不再产生等原因有关。
7. 每条光柱有一定的宽度，不是一条铅直的无宽度的线，造成这种宽度的原因有两个。一是因为灯光源具有一定宽度，二是因为空中飘浮的形成光柱的冰晶，具有左右轻微的摇摆。设最大摇摆角为 α ， $\alpha=0$ 为未左右摇摆的冰晶，则左右摇摆所造成的点光源的光柱宽度，与 α 角大小有关。实际光柱的宽度，是这两个原因叠加（即共同起作用）所致。

现在再来谈谈为什么光柱有一定宽度，而不是一条铅直的无宽度的线的问题，这固然如陈同志所说的，与灯光光源有一定宽度有关。但更重要的，乃是与冰晶在铅直的光路平面上，有左右轻微摇摆的现象有关。现在请先参看图 13。图中 e 为人目，l 为灯的中心，a、b 为两个对称的冰晶表面，与严格水平的冰晶相比较，若以灯的方位作为前方，则 a 为左侧下倾，b 为右侧下倾。它们最大下倾角 α 均很微，而且下倾程度也相等，a 冰晶的反射灯光由左侧入人目，b 冰晶的反射灯光由右侧入人目，结果从人目看来，好象是光柱两侧 a' 、 b' 两处