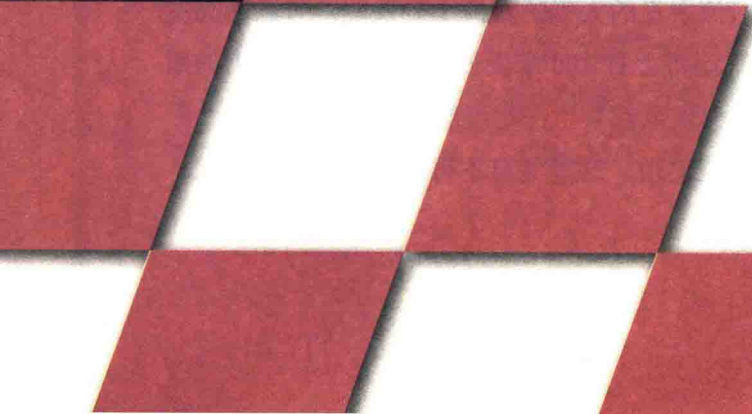


一、地球的大气





如果从气象卫星上俯瞰地球，你就会发现地球披着一层赏心悦目的淡蓝色外衣——大气。我们人类就世代生活在这个大气“海洋”的洋底。正是这个大气海洋，供给了人类呼吸的氧气；正是这个大气海洋的温室效应，保证了地球变得足够温暖，适合于人类生存。稠密的大气层还使人类免遭无数宇宙陨石的袭击（坠落的大部分陨石会在大气层中烧毁），而大气中的臭氧层更是保护了人类和地面其他生物免遭太阳紫外线的杀伤和毁灭，所以，没有地球大气，便没有包括人类在内的地球生命。

地球大气是由多达几十种气体组成的，其中最主要的是氮气，约占了78%，人类呼吸的氧气约占21%，第三位是稀有气体，占0.94%，其他气体全加在一起也只不过占0.06%（均按体积计算）。地球大气的密度在垂直方向上不是均匀分布的，随着高度的升高，空气密度越来越小。例如，大约30%的大气质量集中在3000米以下的大气层里，5500米高度是个中线，即它以上和以下的大气质量是相等的。大约90%的大气质量集中在16.5千米以下的低层大气里，32千米以上的大气质量还不到整个大气质量的1%。

地球大气从地面到大气上界，大体可以分为5层。从地面到其上17千米~18千米处（极地8千米~9千米，赤道10千米~12千米）叫对流层。因为这一对流层里的大气的对流十分发达，气温随高度的上升而均匀下降（平均每上升100米降低 0.6°C ）。地球上的雨雪冰雹、风云变化等天气现象都发生在对流层这个大舞台里。

对流层的顶部叫对流层顶，这里气温不再随高度上升而降低，



而是基本不变，所以这是一个很稳定的层次，对流层里的天气影响不到这儿来。这里经常晴空万里，能见度极高，气流平稳，空气密度小，非常适宜高速喷气式客机的飞行。从对流层顶到其上大约 50 千米的高度叫平流层，气温是随高度的上升而升高的。平流层也是地球大气中臭氧集中的地方，尤其在 15 千米～25 千米高度上臭氧浓度最大（图 1 右下方），所以这个层次又称臭氧层。平流层的上一层叫中层，范围是 50 千米～85 千米。在中层中，气温又随高度的上升而降低。过了中层顶，上面就是热层了。热层顶大约在 500 千米左右。之所以叫热层，是因为这层中的空气分子和离子直接吸收太阳紫外辐射能量，因而运动速度很快，和高温气体一样。不过，因为这里的大气密度实在太小，所以尽管热层顶的气温可达 1000°C （太阳比较宁静时）～ 2000°C （太阳活动剧烈时），但实际上是根本不会感到热的。500 千米以上，稀稀拉拉的空气粒子很少碰撞，一旦向上飞去就可能再也回不来了，因此称为外逸层或称“逃逸层”。

60 千米以上的大气层，由于空气分子已成为电离状态，因此能很好反射地面发出的无线电波。无线电波借助于地面和电离层之间的多次反射而实现了远距离的越洋通讯。但电视塔发射的无线电波因其波长较短，会穿过电离层而一去不返，因此，越洋电视转播必须依靠人造卫星。

大家知道，大气中的臭氧浓度是很低的，只有百万分之几，可是它却可以吸收太阳辐射中人眼不可见的紫外辐射中紫外 C（波长 200 纳米～280 纳米，1 纳米 = 10^{-9} 米）的全部和紫外 B（280 纳



米~320 纳米) 的绝大部分。紫外 C 如果到达地面, 可以杀灭地球表面一切生物; 紫外 B 也能杀死或严重损伤地面上的生物。臭氧层不能吸收的紫外 A (波长大于 320 纳米) 恰恰是对人类有用处的,

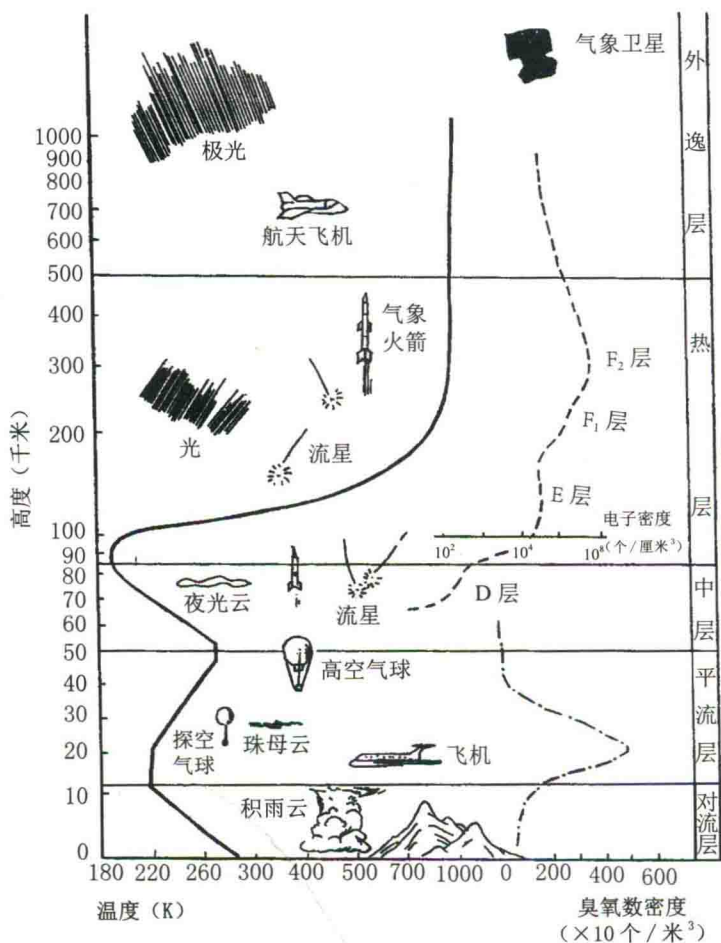


图 1 地球大气垂直分层示意图



例如杀灭细菌，防止佝偻病等。自然界设计得是如此周到合理，可是目前由于人类制造出来的氯氟烃化合物（用于制冷剂、发泡剂、喷雾剂和灭火剂等），却正在大量破坏臭氧层中的臭氧分子，使两极地区的臭氧层明显变薄，南极上空春季甚至出现臭氧洞（臭氧浓度只有正常值的 $1/3 \sim 2/3$ ），使人类皮肤癌和白内障等发病率增加，从而引起了世人的极大关注。不过，如果能严格执行 1987 年国际《蒙特利尔议定书》，逐步禁止这类化合物的使用和生产，那么大气臭氧层便可望在几十年以后逐步得到恢复。据最近的观测报告，已经看到了臭氧层可以在 21 世纪中期得到恢复的曙光。

由于气压随高度升高而降低，海拔较高处的水便比地面上的水更容易烧开。例如，大约在海拔 2000 米的地方，水温于 94°C 时便沸腾了。作者曾在海拔 2896 米的五台山气象站居住多日，这里开水的温度是 91.7°C 。如果没有高压锅，蒸出的馒头常常欠火，煮出的米饭也多是夹生饭。面条如果等到全熟再吃，便成了糊糊。而在地球最高点，即海拔 8844.43 米的珠穆朗玛峰上， 81°C 左右时，水就沸腾了。

声波是靠空气传播的，所以地球上会有声音。大气中声速为 332 米 / 秒左右。不过，声音在大气中的传播方向会受到大气温度分布的很大影响。例如，夜间因为地面冷却，近地面气温较低而往上气温逐渐升高（这种现象叫逆温现象），它会使地面声源在向前并向上传播时慢慢发生折射，直至折回地面。其结果很类似高空电离层反射地面发出的无线电波一样。这就是为什么声音（例如钟声）在夜间传得远且清晰的缘故。唐代诗人张继能写出“姑苏城外寒山寺，



夜半钟声到客船”的传世佳句，其原因即在于此。这种夜半钟声甚至连山也隔不住，因而唐代诗人皇甫冉又有“秋临深水月，夜半隔山钟”的体验。相反，白天因为近地面空气的温度向上降低，声音在传播过程中逐渐折向天空，因而便连稍远处的钟声也常听不到了。

上述声音在大气逆温层中传播的“折射”现象还可造成远距离的反常可闻带。20 世纪初，人们发现了这样一个奇怪事实：当强大声源（如炮声、火山爆发等）发出的声音，几十千米开外已经听不到了的时候，可是在更远的地方却又听到了。这种反常可闻带的成因，就是因为大气层中存在着逆温层（例如，对流层顶就是最强大的一个逆温层），把强大的地面声音折回到了更远处地面的缘故。同样道理还可产生第二以至第三反常可闻带，它们呈同心圆状排列（见图 2）。当然，经过多次反射，声强会越来越小，直至完全听不见了。

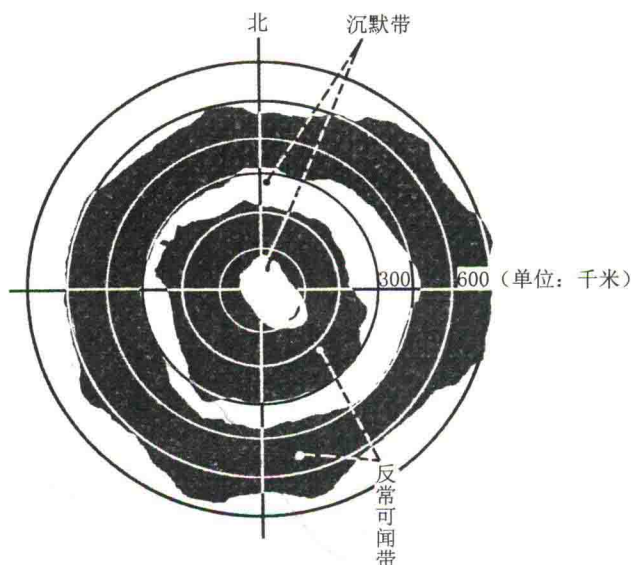


图 2 一次爆炸产生的声音反常传播

二、蓝天白云和海市蜃楼——天空美景（一）



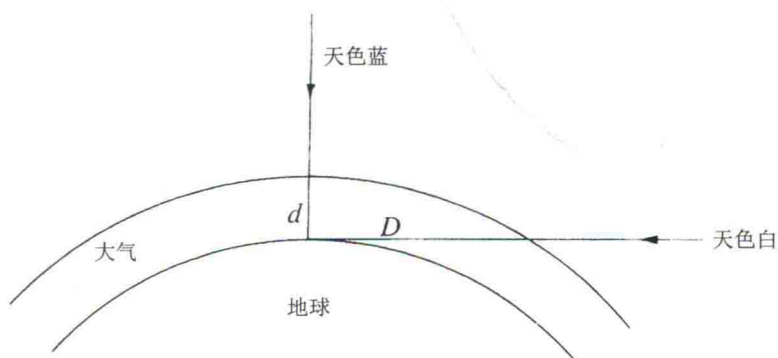


地球大气为大气光学美景准备了物质基础和表演的舞台。美丽的蓝天白云，灿烂的朝晚霞，是大气中光线散射的结果；星光闪烁，海市蜃楼，是大气中光线折射所造成的；日月光线通过大气中的云雾和雨滴时，在水滴内的折射和衍射，还可以产生美丽的霓虹和晕华，以及神秘的峨眉宝光等。

中国有首民歌中唱道：“蓝蓝的天上白云飘……”其实，蓝天白云本无色。蓝天之所以蓝，是由于太阳光线进入地球大气层以后，可见光中波长最短的蓝色光线被大气分子散射的强度最强（散射光强与光线波长的四次方成反比）的缘故，因此人们看到的天空便呈蓝色。

随着离地高度的上升，大气密度越来越小，因而蓝色散射光强也越来越弱。天色于是由蓝变紫，从紫变黑。到了大气高层或宇宙之中，只见日月和星星在黑色天穹上光芒并照，构成一幅地面上看不见的宇宙奇景。此时，如果你回头向下看，披着大气分子散射所形成的浅蓝色外衣的地球正在你的脚下。宇航员们常看到的正是这种“黑天蓝地”的奇异景象。

大气中除了大气分子以外，还有由水汽凝结而成的冰晶和水滴组成的云雾。它们的直径比大气分子大得多，对阳光中各个波段的可见光的散射强度都一样，因而云雾便显出白色。这就是“白云本不白”的原因所在。我们在冬季中看到的天色常比夏季中看到的要蓝得多，就是因为，夏季天空中水滴和其他大直径固体微粒（气象学中通称气溶胶）比较多，因而天色泛白，而冬季空气干燥（尤其北



■ 图3 天色（天顶蓝，天边白）的形成示意图（ $D > d$ ）

方），水滴大都蒸发消失，因而天色才显湛蓝。即使在同一时间，天边的天色泛白，天顶部蓝色较深，也是类似原因。即从地平线方向进入我们眼中的光线经过了较厚的大气层（图3中 D ），因而地平线方向气溶胶散射造成的白色程度也比天顶（经过大气层厚度为 d ）的强。

大家可曾注意过，每天清晨太阳升起以前，和傍晚太阳落山以后的一段时间里，明明太阳位于地平线以下，可这时天空仍较明亮，可以进行一般的户外活动。这种天空亮光叫曙暮光，是地平线下的太阳照亮了高层大气，高层大气分子的散射光照到地面上来的结果。不过，当太阳在地平线以下超过 7° 时，由于阳光只能照射到最高层的稀薄大气，散射光越来越弱，黑夜慢慢就来临了。在赤道地区，太阳垂直地东升西落，早上太阳从地平线下 7° 升到地平线之间的时间，和晚上从地平线降到地平线下 7° 之间的时间，即曙暮光的时间，是全世界最短的，大约20分钟。因此，赤道上有“日落即黑”



之说。相反，在高纬度，由于太阳斜着升落，曙暮光的时间便越来越长。在靠近极圈（ 66.5° ）的地方，夏至前后夜间太阳高度也都在地平线下 7° 以上，因此成为白夜，那时会有许多人去那里欣赏白夜奇观。到了南极和北极点附近，太阳轨道几乎是水平的，春分、秋分前后整日整夜的曙暮光甚至可以持续一个多月。

夏夜，繁星满天。仔细瞧瞧，几乎每个星星都在“眨眼”。这就是星光通过大气层时，受到不断运动着的不同密度的气流的影响，发生了不同程度折射的缘故。在冬季迎着阳光看窗前暖气片（或火炉）上方，或在夏日的白天看远方的田野，夜间看篝火堆的上方，远处的景物就好像在晃动，这两者的道理是一样的。所以，如果我们到 3000 米以上的高山看星星，多数星星就不闪烁了，因为最稠密的大气已在脚下。

但是，如果这种折射现象发生在水平方向，而且空气密度在较大范围内是均匀的，那么就有好戏看了。例如，夏季白天的海上，由于空气暖和而海水冷凉（下层空气密度大而上层密度小），因此大气中光线的折射现象可以把本来在地平线下的远处景物“抬升”上来，出现上现蜃景（海市蜃楼），如图 4 中上图。我国最著名的上现蜃景地点就是山东蓬莱。宋代沈括就在《梦溪笔谈》中记载过一次蜃景：“登州海中时有云气，如宫室台观，城堞人物，车马冠盖，历历可睹。”登州就是现在的山东蓬莱。相反，在沙漠中的白天，由于地面强烈受热，而空气温度相对较低时，可以出现下现蜃景，即把远处天空的景色倒映在观察者的前下方，如图 4 中的下图，成为一片蓝白色“湖水”，骗得沙漠旅行者空欢喜一场。在城市中，



夏季午后黑色路面的上前方出现一汪白色的小水面，是远方天空的下现蜃景，此时还可以看到汽车同时在其上行驶。此外，世界上还有侧现蜃景和更复杂的复合蜃景，这里就不多说了。

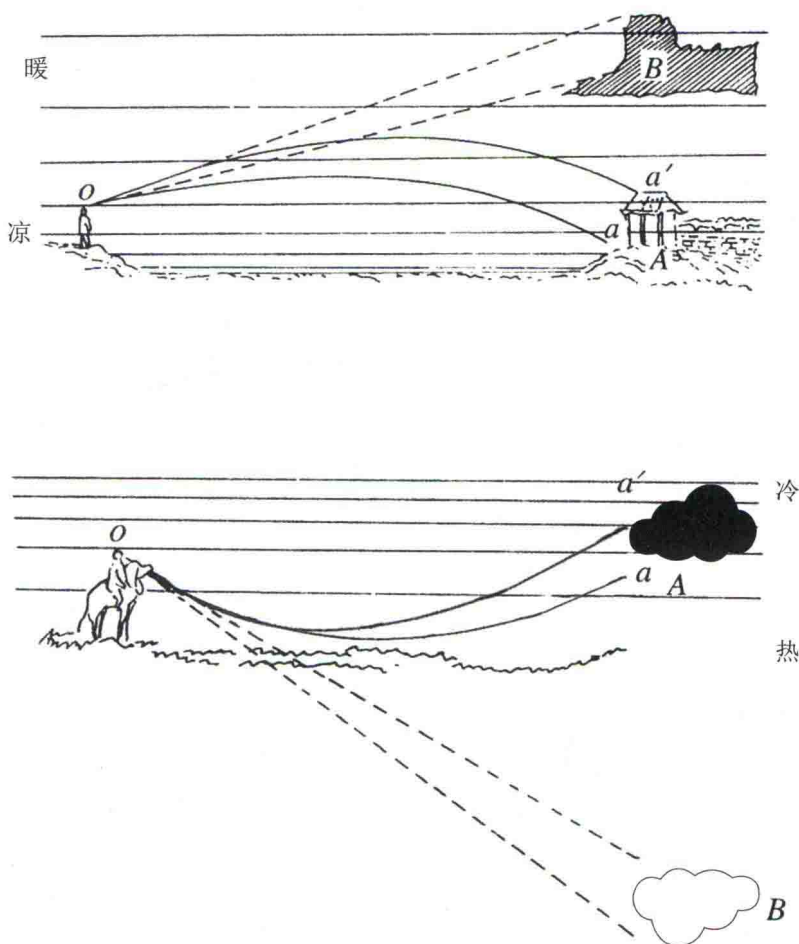


图 4 蜃景形成示意图



三、彩虹晕华和峨眉宝光——天空美景（二）





彩虹是大家最熟悉而又最美丽的大气光学美景之一。只要有太阳光来自身后，照射到对面正在或刚下过雨，仍有雨滴在下落的空气里，就会出现一条内紫外红的七色彩虹。彩虹的形成，主要是太阳光在圆形的雨滴内经过两次折射、一次反射，再进入到观察者眼睛的结果。（如图5下左）由于不同颜色的光线波长不同，它们在雨滴中“拐弯”的程度也稍有差别。因此对观察者来说，不同高度的雨滴便会出现不同的颜色。在雨滴幕上彩虹区的最上部的雨滴呈红色，然后依次呈橙、黄、绿、青和蓝色，最下部的雨滴便呈紫色的了。雨滴在不停地下降，但虹的位置不变（在短时间内太阳光入射角度可以当作是不变的），雨滴落到什么位置就呈什么颜色。雨滴落完了，彩虹也就消失了。所以，彩虹是发生在观察者眼中的一种光学现象，而并非实体。因此，即使乘了飞机，飞到了彩虹出现的位置，也是看不到、摸不着的。

在出现彩虹的同时，还常常会出现霓。它的位置在虹外侧，和虹并行排列。霓又称副虹，它的色序正和虹相反，即外紫而内红。这是因为阳光进入雨滴的角度（位置）不同，在雨滴内多了一次反射的缘故。（图5下右）因此霓的亮度比虹要弱得多，人们常常看不见。

在美国的热带夏威夷岛上，阳光灿烂，阵雨特多，因而也是经常出现彩虹的地方。有位摄影师连续拍摄，拍到了一组“彩虹从

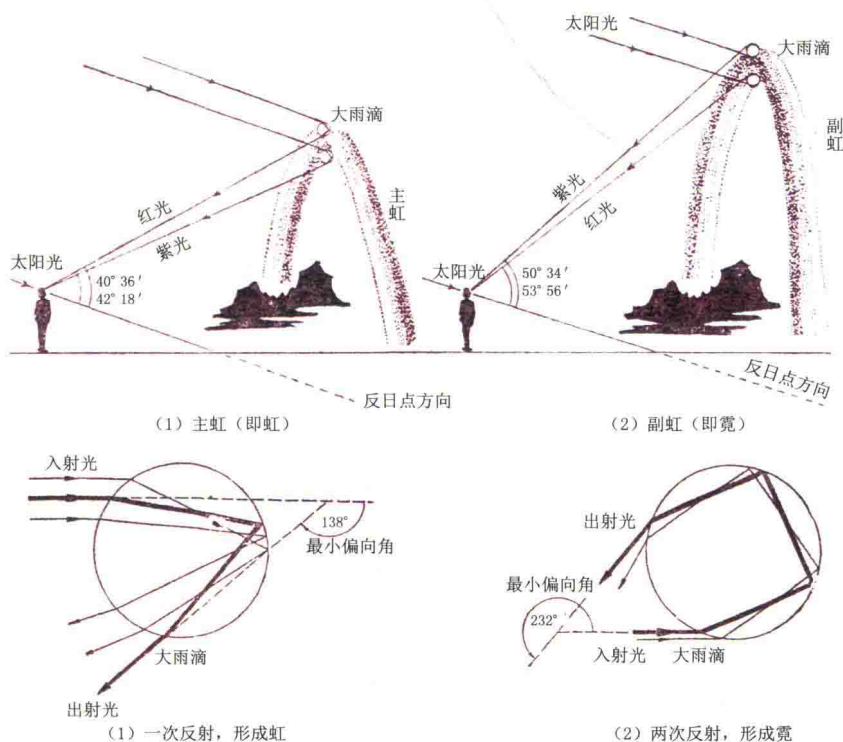


图 5 虹和霓形成示意图

海上升起”的镜头。原来这是在下午 3 时 45 分到 4 时 15 分之间，太阳逐渐下沉，因而彩虹不断上升的结果。

“东虹日头西虹雨。”这条天气谚语是说，如果早起西方有虹，当地天将下雨。这是因为太阳刚刚升起不久，西方就已经有雨（虹）。这种降雨云系，按温带地区一般规律都是自西向东移动的，当地自然不久就可能下雨了。相反，早晨见到东方有虹，说明降雨天气系统已在东方，并将继续东去，当然就更加不会影响当地了。



我们在生活中也常可见到彩虹。例如，在人工喷泉和天然瀑布的旁边就可以常常看到彩虹，或者在家里熨衣服时喷一口水，只要背后有光线过来，前方也会出现彩虹。

有时候，天上有能透过阳光或月光的薄薄高云。这时在太阳或月亮的周围会出现彩色光圈，即晕。晕是日月光通过高云中的无数冰晶发生折射所造成的外紫色内红色的光圈。如果冰晶是横着下降的，阳光从冰晶的侧面进另一侧面出，我们看到的晕圈视角是 22° ；如果冰晶竖着下降，太阳光线从侧面进底面出，就会出现视角为 46° 的大晕圈。由于降雨天气云系往往以这种高云为前导（第一梯队），因此日月晕的出现常可预兆后面的坏天气将要来临，因而有“日晕三更雨，月晕午时风”之说。有时我们看到的日月旁边的彩色光圈，其颜色排列和晕相反，即外红内紫，而且直径比晕要小得多，这叫华。华是日月光线照射到中云（中云比高云要低，一般由水滴组成），遇到云中微小水滴，小水滴作为障碍物而发生的日月光线衍射的结果。日华因为距明亮的太阳过近，因而一般不如月华易于发现。

华俗称“枷”，好比太阳和月亮带上了枷的意思。俗话说：“日枷风，月枷雨。”它也能预兆天气变化。因为出现华的中云往往是降雨云系的第二梯队，日月晕后紧跟着出现日月华，降雨刮风的可能性就更大了。华的直径和云中水滴直径有关，水滴直径越大，华的直径越小。因此当华圈由大变小时，表示云中水滴越来越大，



有可能要下雨。“大华晴，小华雨”，说的就是这个意思。

大气光象中最神秘的要数峨眉宝光。12 世纪宋代诗人范成大就曾在峨眉山目睹这种宝光并做了记载。峨眉宝光就是因为在峨眉山发现并最多见（每年可有数十天）而得名的。在峨眉山，峨眉宝光上、下午都可见，一般在下午最为多见。以下午为例，阳光从西方射来，把人像投影到了对面（东方）的云雾上，人动影亦动。不过，最神秘之处在人影的四周有着像晕华一样的彩色光圈，人移圈亦移。古人不知此是云雾折射和衍射阳光造成的大气光学现象，以为是自己已经成佛（中国古代的佛画像中佛头周围都有彩色光圈），是神仙来接自己上天，所以常在一个突出的岩石上（原称睹光台，因在此看峨眉宝光位置十分理想）纵身而跳，摔死谷中。因此，这个地方后来得了个名称，叫作“舍身崖”。其实，峨眉宝光只要条件合适，其他地方也可出现，并不只限于四川峨眉山。国外以德国汉兹山脉布劳肯山最常见，所以国外都称“布劳肯幽灵”。这与我国过去称“峨眉佛光”的原因是类似的。我们有时坐飞机也可看到峨眉宝光。只要太阳在上，下面有云层，距离合适，就可以俯瞰到云层上十字架式的飞机黑影外面的彩色光圈，它随飞机前进而前进，随云的有无而有无。彩色光圈的直径则随云层高度的变化而变化。