

# 卷云冰晶水平取向的光雷达观测

L. Thomas, J. C. Cartwright 和 D. P. Wareing

(英国威尔士大学物理系)

**摘要** 在 Aberystwyth(52.4°N, 4.1°W) 利用一个扫描激光雷达系统测量卷云中的后向散射及退偏比。测量表明：卷云最多出现高度接近 9 km, 约 50% 的云都表明在某些高度存在一些近于水平取向的冰晶。围绕垂直方向的后向散射与角度的关系表明：这些冰晶对水平面的最大倾角约为 0.3°。

## 1. 引言

在天气和气候研究中, 卷云被认为是重要的尚未解决的课题之一 (Bretherton 和 Suomi, 1983)。它们包含大量的非球形大冰晶, 在这些冰晶中, 发现在温度为  $-20^{\circ}\text{C}$  以上时, 片状和星状冰晶居多, 而在温度低于  $-30^{\circ}\text{C}$  时, 柱状冰晶居多, 这已为地面观测及飞机飞行观测所证实 (Weickmann, 1945; Magono 和 Lee, 1966)。此外, 由 Ono (1969) 在高达 5.6 km 处所进行的飞机观测表明: 冰晶降落时使片状冰晶的最大表面及柱状冰晶的最长边处于与地面平行, 此种情况下空气阻力最大。这种取向的片状及柱状冰晶对阳光的反射被认为就造成了天空中的某些光现象 (Greenler, 1980)。这种现象在 Platt (1977), Platt 等 (1978) 和 Sassen (1984) 的在垂直及近垂直入射方向上的后向散射和退极化的光雷达观测以及 Gibson 等 (1977) 的在不同入射角下的后向散射和削光的光雷达测量

中得到证实。Platt (1977), Platt 等 (1978) 和 Sassen (1984) 的观测涉及的高度分别为 4.6—5.6 km, 2.4—3.0 km 和 4.7—5.1 km, 对应的温度范围为  $-12^{\circ}\text{C}$ — $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-9^{\circ}\text{C}$ — $-13^{\circ}\text{C}$  及  $-17^{\circ}\text{C}$ — $-20^{\circ}\text{C}$ 。这三项测量曾用片状冰晶来解释。Gibson 等 (1977) 的观测高度为 10—12 km, 因此与对流层上部的低温特性有关, 曾用柱状冰晶来解释。

Asano (1983) 表明: 光学厚度等于或小于 1 的卷云的反射及透光特性, 在很大程度上取决于冰晶在三维空间或水平面上是否是随机取向的。因此, 有关水平取向的冰晶占多少的信息与卷云的大气加热率的计算密切相关。此外, 对不同高度, 因而也是不同温度时冰晶取向的观测与这些冰晶的习性有关。还有, 激光射束围绕垂直方向的后向散射的变化能够提供有关冰晶围绕水平面分布的信息。本文叙述的在 Aberystwyth (52.4°N, 4.1°W) 的激光测量表明: 在云中的任何高度上, 冰晶的取向有 50% 的机

会是与水平面呈小的交角。有人依照实验室研究推论：这些冰晶可能是在水平面附近颤振。

## 2. 装 备

激光雷达系统利用一个具有频率倍增晶体的钕/钷铝石榴石激光器来产生 15 ns 的平面极化脉冲，重复频率为 10 Hz，在 530 nm 的能量约为 250 mJ。为扩大激光器的输出，采用一个望远镜使激光的发射角减至 0.1 mrad，并采用直径 0.6 m 主镜面的 Cassegrain 型接收望远镜，使光集中到可变直径的视场光阑孔，其后为一个准直管。激光发射机的轴与望远镜的轴相距 0.8 m，以避免来自非非常低的高度上的过大信号使检测器超载。在某个高度以上激光束与望远镜视野完全重合，这个高度可以通过调节视场光阑孔径（因而视野可在 0.3—0.8 mrad 范围内变化）而改变。经过重行校正的激光束通过一个 1 nm 带宽的干涉滤光器，这种小视野的干涉滤光器可有效地使背景光减弱，从而可以在白天进行操作。然后，光束射向一个平面玻璃光束分离器，通过它到达两个 EMI9902 光电倍增管之一，为记录平面极化的发射光束的后向散射中的两个正交分量，在此光电倍增管上安装二色偏振器。数据记录采用光子计数方法，高度分辨能力可以调整直至 30 m。此系统能够在方位角上扫描，由于拥有安装在携带接收机镜面的空心轴内的发射机望远镜，可以确保对发射机和接收机的随动追踪。具有合适传动装置的步进电机使发射机和接收机的光束方向维持 0.1 mrad 的递增变化。

## 3. 观 测

图 1 表明利用激光雷达观测所显示的卷云的一些特征。它表示在 1985 年 3 月 5 日近 21:54 GMT 激光器 1000 次发射所观测的后向散射信号（经距离订正）随高度的变化，实线表示垂直入射，虚线表示入射偏离垂直

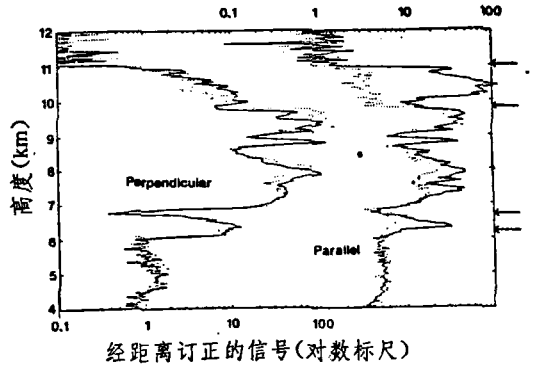


图 1 1985 年 3 月 5 日 21:54 GMT 与人射辐射垂直和平行的后向散射极化分量的高度变化。实线和虚线分别代表自偏离垂直方向  $0^\circ$  和  $3^\circ$  的发射情况。在箭头指向的高度范围内，垂直方向比  $3^\circ$  入射时的平行分量有较强的返回信号

方向  $3^\circ$ 。通常以此系统的 30 m 分辨率观测详细的高度结构。后向散射信号的与入射辐射平行的极化分量的结果，表明垂直入射情况下的要比  $3^\circ$  入射角的更强，特别是在高度范围为 9.8—11.0 km 及 6.2—6.7 km 的地方，即图中用箭头表示的部位。应该注意的是：无线电探空仪在近午夜时分从 Aughton ( $53.6^\circ\text{N}$ ,  $2.9^\circ\text{W}$ ) 升空，探明在这两个高度范围内的温度分别为  $-60^\circ\text{C}$  和  $-30^\circ\text{C}$ 。垂直于入射辐射的极化分量的相应结果则不表明垂直入射情况比  $3^\circ$  入射情况要强。垂直极化分量与平行极化分量之比（称之为线性退偏比）的高度变化，当估计到光束分离器的效率时，就可由每个分量的测量推导出来。图 2 表示  $3^\circ$  和  $0^\circ$  入射情况的退偏比的高度变化。可以看出：在垂直入射情况下，10.1—11.0 km 高度范围对应相对小的退偏比，即 3% 或更小；6.2—6.7 km 高度范围的退偏比从 6.2 km 的约 20% 减少到 6.3—6.7 km 的 5—8%。垂直入射情况下观测到的这些小的退偏比表明：在相应的高度范围出现镜面反射，镜面反射面是水平的。 $3^\circ$  入射情况下这两个高度范围的值分别为 10—30% 及 10—23%。观测到  $0^\circ$  和  $3^\circ$  入射情况下 6 km 高度上退偏比增加到约 20%，这可能表明在激光束穿入云的底部时水滴的多次

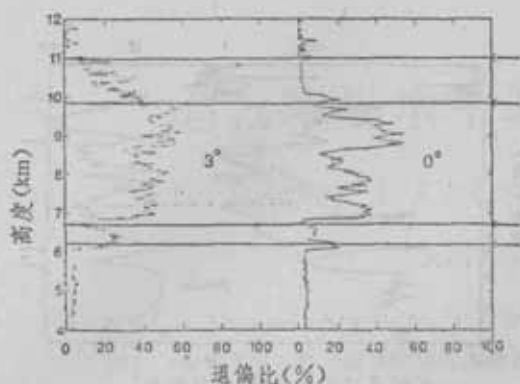


图2 图1表示的数据的退偏比的高度变化

散射作用。然而，预计这样的多次散射应与光束的衰减同时发生，而两个人射方向情况下却观测到信号有增加。

以10秒为间隔顺序按垂直方向和距垂直方向10 m rad不断改换入射方向，并利用返回的信号对阴极射线显示器进行强度调节，就能方便地证实水平取向冰晶的存在导致平行极化分量后向散射的增强。图3表示1986年7月12:18—12:38 GMT的实例，白

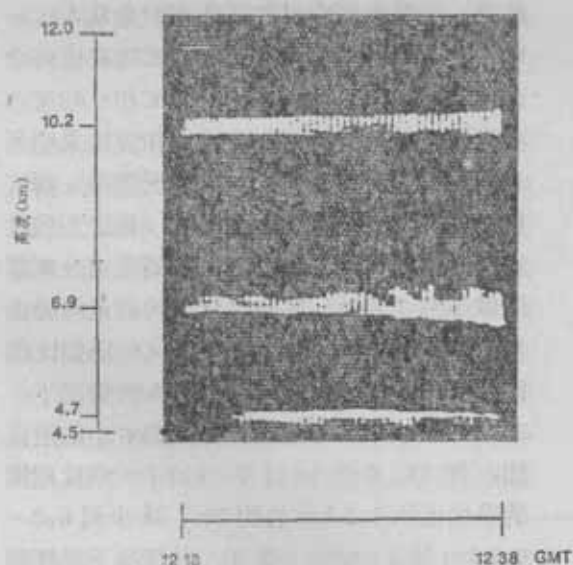


图3 1986年7月24日不断改变光束方向所观测的平行极化分量的后向散射。白色区域代表光束方向为垂直，黑色区域代表光束方向为偏离垂直10 m rad

色和黑色区域分别与垂直方向及偏离垂直方向的入射相对应。可以看出，在大约4.7 km，

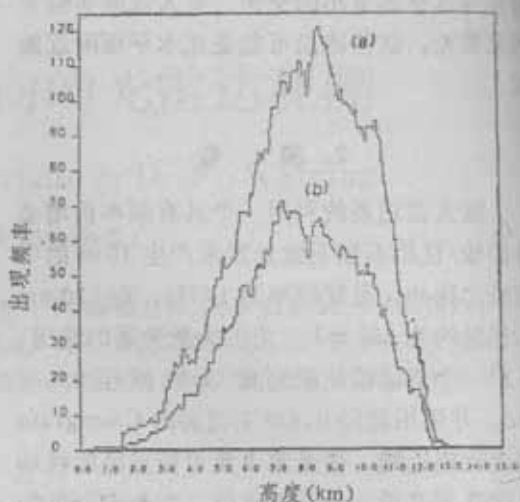


图4 在1986年7月至1989年5月时段内，所有观测到的卷云(a)及水平取向的冰晶(b)出现的高度

6.9 km和10.2 km三个层中同时观测到一定取向的冰晶。在Aughton的无线电探空仪测量表明这三层的温度分别为 $-9.0^{\circ}\text{C}$ 、 $-22.5^{\circ}\text{C}$ 和 $-46.5^{\circ}\text{C}$ 。图4表示在自1986年7月至1989年5月不包含低云的日子里利用这种方法从20分钟取样中推论出的全部结果。它表示在不同的高度范围内观测到的卷云总次数，以及在不同的高度范围内探测到具有水平取向冰晶的次数。可以看出，最多出现的高度接近9 km，并且在任何高度上有约50%的机会出现固定取向的冰晶。从无线电探空仪数据发现，定向冰晶出现的高度对应的温度范围约为 $-5^{\circ}\text{C}$ — $-70^{\circ}\text{C}$ 。Platt等(1987)在澳大利亚 $38^{\circ}\text{S}$ 的地方相应的激光雷达测量表明，在温度高于 $-40^{\circ}\text{C}$ 时，特别是在冬季出现定向冰晶，在温度范围为 $-20^{\circ}\text{C}$ — $-25^{\circ}\text{C}$ 时57%的观测结果在温度范围为 $-30^{\circ}\text{C}$ — $-35^{\circ}\text{C}$ 时46%的观测结果显示为这种定向冰晶(被认为是六角片状冰晶)。

图4中3 km以下高度的数据包括春天、夏天和冬天的数据。可以相信，它们与近融化层顶的雪花有关，正如南英格兰的偏振雷达测量所确定的那里也表明水平取向的冰晶

占一定程度的优势(Hall等人, 1984)。

为考察晶轴取向对水平方向的偏差, 观测了偏离垂直方向  $1.0 \text{ m rad}$  角的后向散射。图 5 表示 1985 年 9 月 23 日近 23:00 GMT 时在  $5.25\text{--}5.91 \text{ km}$  高度范围内, 以  $30 \text{ m}$  为间隔的各高度上, 与入射辐射平行的极化分量的后向散射随扫描角的变化。可以看出: 每个高度上在垂直方向与偏离垂直方向  $\pm 5 \text{ m rad}$  之间后向散射的减少达到大约 20 倍(各高度的减少状况相似)。角扫描过程中垂直极化分量没有任何变化表明: 正常入射时镜面反射发生在偏离垂直方向达  $5 \text{ m rad}$  的角度, 这意味着存在有许多冰晶, 它们的晶轴取向与水平面交角为  $0.3^\circ$ 。

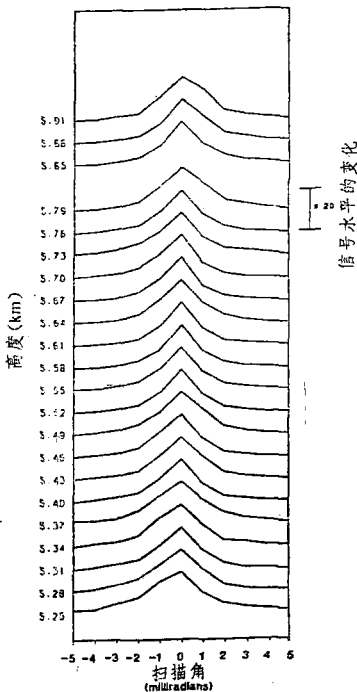


图 5 在 1985 年 9 月 23 日近 23:00 GMT 时, 光东方向围绕垂直方向扫描, 平行极化分量的归一化后向散射在不同高度上的变化

#### 4. 讨 论

实验室测量表明: 温度是确定冰晶习性的主要因子, 但湿度条件也有影响(Kobayashi, 1961; Mason 等人, 1963)。因此, 在温度高于约  $-8^\circ\text{C}$  及低于约  $-25^\circ\text{C}$  时, 观测

到柱状冰晶。而在这两个温度之间时, 片状冰晶占优势; 在湿度条件接近冰面饱和时, 柱状冰晶变短, 而片状冰晶变厚; 在水汽密度更大的条件下, 柱状冰晶变得较长及空心, 片状冰晶变薄, 呈扇形及枝状。Pruppacher 和 Klett(1978)指出: 正如 Magona 和 Lee(1966)所总结的那样, 尽管在什么温度及湿度条件下冰晶增长和获得它们的形状仍有不确定性, 但实验室观测的冰晶习性与云中的观测是基本一致的。不过, 云中的观测还表现出更复杂的形状, 比如柱状冰晶的组合物, 其中单个柱状冰晶可能呈子弹形状。

在实验室和云中观测的基础上, 可以预计: 在目前的研究中, 在对流层中层的高度上形成镜面反射的冰晶, 以片状及扇形冰晶居多, 而在更高的近对流层顶的高度上, 柱状冰晶居多。Takano 和 Jayaweera(1985)和 Takano (私人通信, 1988)从理论上阐述: 在一个水平面上晶轴取向无规律的六角片状及柱状冰晶导致垂直入射时平行极化分量的后向散射增强及非常低的退偏比。

Mossop 等(1967)和 Heymsfield(1975)所做的取样实验表明: 在对应温度为  $-33^\circ\text{C}$  和  $-35^\circ\text{C}$  的高度上存在六角片状冰晶, 有可能片状冰晶也有助于增强来自对流层顶高度上的回波(本研究中这里的温度更低)。在这方面, Heymsfield(1985)在赤道附近的  $16.2$  和  $16.7 \text{ km}$  之间, 温度接近  $-83^\circ\text{C}$  的高空对卷云的飞机观测表明: 冰晶特性表现为有 50% 是三角片状和柱状冰晶的混合物。这种低温下三角冰晶的证据在 Yamashita(1973)的实验室实验中也曾获得。

在目前的研究中, 冰晶对水平面的最大倾斜角度为  $0.3^\circ$ , Platt 等(1978)发现为  $0.5^\circ$ , 这两个值比 McDowell(1979)的环天顶弧观测所推导的约  $1^\circ$  及 Sassen(1980)的光柱观测所推导的  $3^\circ$  要小。从圆盘和圆柱自由降落到粘滞液体中的实验室研究曾获得在大气中下降的冰晶的特性 (Willmarth 等人, 1964; Jayaweera 和 Mason, 1965), 可以用

雷诺数  $Re = \frac{vd}{\nu}$  表示这种特性，此处， $d$  代表在运动粘性  $\nu$  的流体中下降速度为  $V$  的粒子直径。Willmarth 等发现：薄圆盘在静止流体中当  $1 < Re < 100$  时一般呈现水平姿态。Sassen(1980)指出，片状冰晶只在  $Re$  处于这个范围内时，观测到光柱，这些冰晶保持水平取向的能力是  $Re$  的函数。 $Re \approx 10$  (直径  $\approx 0.5$  mm) 的冰晶表现出最完善的直线排列，

倾斜角为  $0.5^\circ$ ，但对应于  $Re \approx 1$  (直径  $\approx 0.15$  m)， $Re \approx 100$  (直径  $\approx 3.5$  mm) 的冰晶，则倾斜角为  $3^\circ$ 。Sassen(1980)的这些结果表明，激光雷达测量中发现的最大倾斜角的相对小的值对应于小的  $Re$  值范围，因而对应于小的冰晶直径范围。

章育仲译自 «Tellus» 42 B, P.211—  
216, 1990.

郝 望校