

牛顿环实验的研究和思考

张勇 孟建新 徐杰 郭霞
(解放军蚌埠坦克学院基础部实验中心 安徽蚌埠 233050)

摘 要:牛顿环测量透镜的曲率半径是大学物理实验中一个基础光学实验,该实验用牛顿环产生的等厚干涉条纹来测量透镜的曲率半径,这种测量方法适用于测量很大的曲率半径。本文阐述了牛顿环干涉原理,解释了牛顿环实验图样并就牛顿环实验中的几个需要注意的问题,做一些简要的论述。

关键词:牛顿环 薄膜干涉 光程差

中图分类号:0436

文献标识码:A

文章编号:1674-098X(2010)03(b)-0251-02

1 牛顿环的由来

牛顿环又称“牛顿圈”。牛顿环装置是由一个曲率半径相当大的平凸透镜放在平板玻璃板上组成的。平凸透镜的凸面与平板玻璃之间的空气层厚度从中心接触点到边缘逐渐增加。若将单色平行光垂直照射到牛顿环装置上,则经空气层上、下两表面反射的两束光就产生光程差,它们在平凸透镜的凸面相遇后,将产生干涉。当用显微镜观察时,可以清楚地看到一个中心是暗斑,而周围许多明暗相同、间隔逐渐减小的同心圆环,这称为牛顿环,它属于等厚干涉条纹。

牛顿在1675年首先观察到,将一块曲率半径较大的平凸透镜放在一块玻璃平板上,用单色光照射透镜与玻璃板,就可以观察到一些明暗相同的同心圆环。圆环分布是中间疏、边缘密。从反射光看到的牛顿环中心是暗的,从透射光看到的牛顿环中心是明的。若用白光入射,将观察到彩色圆环。

牛顿当时取来两块玻璃体,一块是14英尺望远镜用的平凸镜,另一块是50英尺左右望远镜用的大型双凸透镜。在双凸透镜上放上平凸镜,使其平面向下,当把玻璃体互相压

紧时,就会在围绕着接触点的周围出现各种颜色,形成色环。于是这些颜色又在圆环中心相继消失。在压紧玻璃体时,在别的颜色中心最后现出的颜色,初次出现时看起来像是一个从周边到中心几乎均匀的色环,再压紧玻璃体时,这色环会逐渐变宽,直到新的颜色在其中心现出。如此继续下去,第三、第四、第五种以及跟着的别种颜色不断在中心现出,并成为包在最内层颜色外面的一组色环,最后一种颜色是黑点。

2 牛顿环测量平凸透镜曲率半径原理

牛顿环是光的一种干涉图样,是一些明暗相间的同心圆环。将一块曲率半径较大的平凸透镜放在一块玻璃平板上,用单色光照射透镜与玻璃板,就可以观察到一些明暗相同的同心圆环。圆环分布是中间疏、边缘密,圆心在接触点O。从反射光看到的牛顿环中心是暗的,从透射光看到的牛顿环中心是明的。若用白光入射,将观察到彩色圆环。

牛顿环是典型的等厚薄膜干涉。平凸透镜的凸球面和玻璃平板之间形成一个厚度均匀变化的圆尖劈形空气薄膜,当平行光垂直射

向平凸透镜时,从尖劈形空气膜上、下表面反射的两束光相互叠加而产生干涉。同一半径的圆环处空气膜厚度相同,上、下表面反射光程差相同,因此使干涉图样呈圆环状,这种由同一厚度薄膜产生同一干涉条纹的干涉称作等厚干涉。

如图1所示,当透镜凸面的曲率半径R很大时,在P点处相遇的两反射光线的几何程差为该处空气间隙厚度d的两倍,即2d。又因这两条相干光线中一条光线来自光密媒质面上的反射,另一条光线来自光疏媒质上的反射,它们之间有一附加的半波损失,所以在P点处得两相干光的总光程差为:

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta = (2m+1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad m=0,1,2\ldots \text{时,为暗条纹}$$

$$\Delta = 2m \cdot \frac{\lambda}{2} \quad m=1,2,3\ldots \text{时,为明条纹}$$

设透镜L的曲率半径为R,r为环形干涉条纹的半径,且半径为r的环形条纹下面的空气厚度为d,则由图1中的几何关系可知:

$$R^2 = (R-d)^2 + r^2 = R^2 - 2Rd + d^2 + r^2$$

因为R远大于d,故可略去 d^2 项,则可得:

$$d = \frac{r^2}{2R}$$

这一结果表明,离中心越远,光程差增加愈快,所看到的牛顿环也变得愈来愈密。

由此可得,牛顿环的明、暗纹半径分别为:

$$r_m = \sqrt{mR\lambda} \quad (\text{暗纹})$$

$$r'_m = \sqrt{(2m-1)R \cdot \frac{\lambda}{2}} \quad (\text{明纹})$$

式中m为干涉条纹的级数。

以上两式表明,当 λ 已知时,只要测出第m级亮环(或暗环)的半径,就可计算出透镜的曲率半径R;相反,当R已知时,即可算出 λ 。

3 几个要注意的问题

(1)为什么测量暗环直径时尽量选择远离中心的环来进行?

由于牛顿环的环间距随着半径的增大而逐渐减小,而且中心变化快,边缘变化慢,因此,选择边缘部分,即圆环变化比较慢且大致看成是均匀变化的部分进行测量,是比较合理的。

(2)牛顿环中心为什么是暗斑?如中心出现亮斑作何解释?对实验结果有影响吗?

在凸透镜和平玻璃片的接触处 $e_k=0$, $=\lambda/2$,故牛顿环中心为暗斑。

(下转253页)

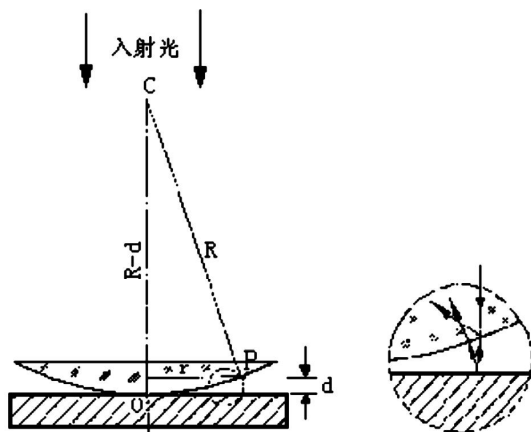


图1 凸透镜干涉光路图



图2 牛顿环干涉花样

差,且最大差值超过25m/s,表明局地有较强烈的中尺度气旋出现。持久深厚的中气旋是超级单体风暴最本质的特征。同时强烈的中气旋的存在也为超级单体的持续提供动力。

三体散射的出现并不意味着有冰雹,但冰雹云大多会伴随三体散射出现,从这一点上,应该有充分理由怀疑这个超级单体风暴中包含冰雹。

4.2 冰雹云高度和垂直液态水积分

对流的强弱在一定程度上和回波伸展高度有关,可以通过41号产品(图略)分析单体顶高,从而估计对流的相对强弱。自13:14开始,对流单体在我县西北侧形成,并发展到10km高度,此后风暴顶基本维持在12~14km,对流最旺盛时期曾达到15~16km,说明此风暴发展极为旺盛。且过程持续时间100min以上。有利于小冰雹粒子在冰雹云中循环增长,从而形成大冰雹。

57号产品垂直液态水积分是反映降水云体中,在某一确定的底面积的垂直柱体内也太水总量的分布图像。是判别强降水及降水潜力等灾害性天气有效工具之一。从图4中发现自13:14开始垂直液态水含量激增,仅用近30min便达到73kg/m²,远远大于一般对流云降水指标,表明局地对流形成的上升气流强劲,能在短时间内把低层水汽带到高空,是产生大冰雹的必要条件。

生大冰雹的必要条件。

5 地形影响

泰顺境内多山,昼夜间山风、谷风明显,尤其是午后容易产生强对流天气。通过分析降雪区的地形发现,雪区海拔都较高,而且越高的地方雪粒越大。这大概因为云体爬升的动力作用,使得雪云发展更加旺盛,有利于大冰雹的发育;同时越高的地方,冰雹融化掉落的时间越短,所以到达地面的冰雹也越大,王华^[2]文中描述的爬坡效应和融化效应能够解释这一现象。

6 小结

此次特大冰雹事件发生在大尺度暖气团活动的区域,大尺度的暖气团活动是形成此次大冰雹的背景。山区地形的动力作用是不可忽略的原因之一。能量指数在一定程度上能够预示强对流的发生,中低层的中强程度的垂直风切变是有利于超级单体风暴发展的环境,垂直方向上深厚的冻结层提供了适宜的冰雹增长高度,这为冰雹性天气的发生成为可能,需引起预报员的注意。

通过临近雷达反射率和速度场发现了悬垂回波和三体散射,确定了超级单体的形成,进一步肯定了单体中包含冰雹的可能性。超

级单体的形成可以作为预报、预警冰雹的一个重要依据。

4月份为春夏之交,冷暖空气活动频繁,是冰雹天气发生的高发期,结合当时异乎寻常的云体高度和垂直液态水积分,从而能够确定冰雹性天气的存在。

参考资料

- [1] 北京盛夏一次罕见的大冰雹事件分析,廖晓农,愈小鼎,余波,气象,2008年2月,第34卷第2期。
- [2] 下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用,王华,孙继松,气象,2008年3月,第34卷第3期。
- [3] 榆林新一代天气雷达冰雹云识别指标分析,刘子林等,陕西气象,2008年2月
- [4] 一次罕见冰雹天气过程的对流参数分析,陈晓红,郝莹,周后福,鲁俊,气象科学,2007年6月,第27卷第3期。

表1 探空站0度层和-20度层高度 单位M(hPa)

站号 层次	58725 (邵武)	58847 (福州)	58663 (衢州)	平均
ZH	4482 (519.3)	4566 (585.3)	4296 (604.3)	4448 (569)
-20H	7298 (411.7)	7369 (408.3)	7060 (424.5)	7209 (414)

(上接251页)

环中心出现亮斑是因为球面和平面之间没有紧密接触(接触处有尘埃,或有破损或磨毛),从而产生了附加光程差。这对测量结果并无影响。

(3)测暗环直径时,若十字叉丝的交点未通过圆环的中心,可能所测长度非真正的直径而是弦长,这对实验结果有影响吗?

以下证明可知:

$$r_m^2 - \left(\frac{1}{2}S_m\right)^2 = \overline{OA}^2,$$

$$r_n^2 - \left(\frac{1}{2}S_n\right)^2 = \overline{OA}^2,$$

得:

$$r_m^2 - r_n^2 = (S_m^2 - S_n^2), \text{故 } D_m^2 - D_n^2 = S_m^2 - S_n^2$$

证明说明,以弦长代替直径,对测量结果没有影响。

(4)为什么牛顿环的间距靠近中心的大于靠近边缘的?

设牛顿环的间距为 t_{k+1}, t_{k+2}, \dots ;

$$\text{又 } h_k = h_{k+1} = h_{k+2} = \dots = \frac{\lambda}{2}, \text{则:}$$

$$t_k = \frac{h_k}{\tan \theta_k} = \frac{\lambda}{2 \tan \theta_k}$$

$$t_{k+1} = \frac{h_{k+1}}{\tan \theta_{k+1}} = \frac{\lambda}{2 \tan \theta_{k+1}}$$

$$t_{k+2} = \frac{h_{k+2}}{\tan \theta_{k+2}} = \frac{\lambda}{2 \tan \theta_{k+2}}$$

.....

又 $\theta_k < \theta_{k+1} < \theta_{k+2} < \dots$, 故 $t_k > t_{k+1} > t_{k+2} > \dots$,

$$\text{另, } t = \frac{\lambda}{2 \tan \theta}, \quad \frac{dt}{d\theta} = \frac{\lambda}{2} (-\csc^2 \theta)$$

),在 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ 区间内, $\csc^2 \theta$ 为递减函数,故牛顿环的间距随环半径的增加而逐渐减小。

(5)反射光、透射光形成的干涉条纹有何不同?

在透镜凸表面和玻璃的接触点上,空气层厚度为0,两反射光的光程差为 $\lambda/2$,因此反射光方向上牛顿环中心为暗点。透射光方向与反射光条纹相反,因此透射光牛顿环中心是一亮点。

究其本质就是,反射光与透射光形成的干涉条纹是互补的,即反射干涉条纹是亮纹的地

方对应的投射干涉条纹是暗纹,原因就在于光从光疏介质射到光密介质,在界面上发生反射,是有半波损失的,透射则没有。

4 结语

尽管牛顿发现了牛顿环,但是却没有更严谨的思考,而是含糊的用旧理论来回答。因此失去了一次绝好的机会。

奇妙的牛顿环让我们懂得科学是严谨的,希望我们在思考每一个问题的时候,都能秉承实验严谨的探求、创新精神,只要我们能做到这一点,相信一定可以在未来的学习与工作中做的更好。