

## 遥感物理讲座

### 第五讲 遥感图象的相干光处理

陈 怀 琳

(北京大学物理系)

遥感图象的获得手段是多样的。除了直接凭目视判读这些原始图象外，往往还对它们作某些加工，即进行图象处理。

应该着重指出，所谓图象处理，只能根据需要对图象原来包含的信息作某种加工，决不能增加任何有用信息。实际处理方法常视具体的目的和任务而定。例如，为了显示原有图象的细节，可以作高通滤波处理，即抑制反映图象缓慢变化的低频信息，相对地突出高频信息。不存在能普遍增强一切信息的办法。

遥感图象处理就其目的来说可分为三类：

1. 图象的恢复和噪声的消除。图象记录系统的局限性及噪声均能导致象质下降，所以必须通过处理以重现原始场景。例如，成象系统传递函数的补偿处理即属于此范围。

2. 图象增强。目的在于增强某些信息以便于检测判读。例如，反差的增强、光密度分割、彩色合成、相加相减和方向增强等。

3. 图象分析。此类处理结果不能绘出一张完整的图象，但是能提供反映图象中某些固有特征的数据，例如频谱分析和特征识别处理。

图象处理的方法和手段，可以分为：1. 非相干光学处理；2. 相干光学处理；3. 模拟电子处理；4. 数学计算机处理；5. 混合处理（上述诸方法的组合）。本文主要介绍相干光学处理，也简单涉及相干光和数字计算机相结合的混合处理。

非相干光处理在空域（即原图分布函数上）作处理，相干光处理则是在频域作处理，即改变原图的空间频率分布函数。这两种光学处理方法并不相悖，并且一般说来，其功能亦不能相互

代替。

光学处理优点是信息量大、快速、设备简单和成本低。计算机处理的特点是精度高和方法灵活。因此，光学-数字混合处理兼有二者的优点，在图象处理上可能有良好的前景。

#### 一、相干光图象处理原理<sup>[1]</sup>

相干光处理的物理基础是光的干涉和衍射。下面简单地介绍一些有关的基本概念。

##### 1. 图象的描述

在相干光照明系统中，光场的描写是用复振幅：

$$\tilde{U} = A \exp[i\phi], \quad (1)$$

其中  $A$  为振幅， $\phi$  为相位。如果被处理的遥感图象是一透明底片，则以复振幅透过率  $i(x, y)$  来描述：

$$i(x, y) = \frac{\tilde{U}_i(x, y)}{\tilde{U}_0}, \quad (2)$$

其中  $\tilde{U}_0$  为入射波复振幅， $\tilde{U}_i(x, y)$  为坐标  $(x, y)$  处的透射波复振幅。

人眼、乳胶底片和光电元件等探测器所接收的是光强。光强  $I$  与复振幅  $\tilde{U}$  有以下关系：

$$I = \sqrt{\tilde{U}} = \tilde{U} \cdot \tilde{U}^*, \quad (3)$$

$\tilde{U}^*$  为  $\tilde{U}$  的复数共轭。

##### 2. 傅里叶变换和空间频谱

设底片的振幅透过率为二维分布函数  $g(x, y)$  对  $g(x, y)$  作二维傅里叶变换（以符号  $\mathcal{F}$  表示），即得到空间频率分布函数  $G(\nu_x, \nu_y)$ ，

$$G(v_x, v_y) = \mathcal{F}[g(x, y)]$$

$$= \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp[-i2\pi(v_x x + v_y y)] dx dy.$$

(4)

而  $G(v_x, v_y)$  的逆傅里叶变换则是函数  $g(x, y)$ , 即

$$g(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[G(v_x, v_y)]$$

$$= \iint_{-\infty}^{\infty} G(v_x, v_y) \exp[i2\pi(v_x x + v_y y)] dv_x dv_y.$$

(4')

(4')式可以作如下简单理解: 函数  $g(x, y)$  可以看作是很多空间频率为  $(v_x, v_y)$  的正弦光栅函数的线性叠加,  $G(v_x, v_y)dv_x dv_y$  则是相应项的权重. 函数  $G(v_x, v_y)$  称为  $g(x, y)$  的空间频谱, 它反映了函数  $g(x, y)$  (图象) 随空间坐标变化的快慢程度及变化的取向. 如果  $g(x, y)$  有很多细节, 则其频谱  $G(v_x, v_y)$  分布很宽, 有较多高频信息. 反之, 图象  $g(x, y)$  是粗线条的缓慢变化, 则其频谱  $G(v_x, v_y)$  集中在很小的  $v_x, v_y$  频率范围内, 没有高频信息.

### 3. 透镜的傅里叶变换作用和相干光处理系统

凸透镜具有傅里叶变换的能力. 在相干光照明下如果凸透镜前焦面的波前为  $g(x, y)$ , 则其后焦面的波前适为  $g(x, y)$  的傅氏变换  $G(v_x, v_y)$ ,  $v_x, v_y$  与后焦面的空间坐标  $\xi, \eta$  有如下相应关系:

$$v_x = \frac{\xi}{\lambda f}, \quad v_y = \frac{\eta}{\lambda f}, \quad (5)$$

其中  $\lambda$  为波长,  $f$  为凸透镜焦距. 相当复杂的两维傅里叶变换运算可以用一个简单透镜来解决, 这就提出了一种可能性, 即利用光学系统进行图象和数据的处理.

相干光图象处理的典型光路如图 1 所示的  $4f$  系统.  $L_1, L_2$  为傅里叶透镜 (设焦距均为  $f$ ),  $L_1$  的前焦面为物面  $P_1$  (或称输入平面), 后焦面为频谱面  $P_2$ .  $L_2$  的前焦面为  $P_2$ , 后焦面为象面  $P_3$  (或称输出平面). 激光束经短焦距透镜会聚形成点光源, 通过准直镜成为平面波照明物面  $P_1$ . 从几何光学角度看, 从  $P_1$  到  $P_3$  是一

成象系统. 如果在  $P_1$  放一透明底片, 则在  $P_3$  平面上将得到放大系数为 1 的倒象.

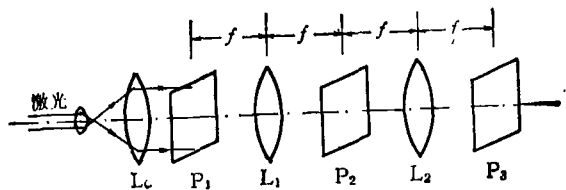


图 1 相干光学处理系统

在相干光 (单色点光源) 照明下,  $4f$  系统的成象过程也正是两次傅里叶变换的过程. 如  $P_1$  面上复振幅为  $g(x, y)$ , 由于  $L_1$  的傅里叶变换作用, 则在  $P_2$  面上形成  $g(x, y)$  的空间频谱分布  $G(v_x, v_y)$ . 也就是说, 透镜  $L_1$  使函数  $g(x, y)$  中空间频率为  $(v_x, v_y)$  的信息都集中到  $P_2$  面上相应的一点 ( $\xi = v_x \lambda f, \eta = v_y \lambda f$ ), 而该点的复振幅  $G(v_x, v_y)$  就是原函数中相应空间频率成分的权重.  $P_2$  面常称为空间频谱面. 透镜  $L_2$  将  $P_2$  面上  $G(v_x, v_y)$  作逆傅里叶变换, 将频谱分布又转换成为  $P_3$  平面上的空间分布  $g(-x', -y')$ , 即和  $P_1$  面分布一样, 只是方向相反.  $4f$  系统的两次变换可概括为: 先将各种频率成分分开, 后将各种频率成分合起来.

### 4. 空间滤波和滤波器

如果在  $P_2$  面上放一振幅透过率为  $H(v_x, v_y)$  的滤波器, 则透过滤波器的复振幅分布是

$$G'(v_x, v_y) = G(v_x, v_y) \cdot H(v_x, v_y).$$

也就是说,  $L_2$  前焦面的复振幅已不是  $G(v_x, v_y)$ , 经  $L_2$  合频,  $P_3$  上当然也不再是  $g(-x', -y')$ , 这就是空间滤波. 关键的问题在于根据信息处理要求设计合适的滤波器. 例如, 当我们要突出高频信息时, 可在  $P_2$  平面光轴上放一半径为  $\rho$  的圆屏, 则

$$\sqrt{v_x^2 + v_y^2} < \frac{\rho}{\lambda f}$$

的信息 (即低频信息) 均被挡去, 使  $P_3$  面上高频信息非常丰富, 细节和突变部分就更清楚地显示出来. 常用的滤波器有以下三类:

(1) 振幅滤波器: 只改变空间频谱的振幅, 不改变位相. 上述光阑即属于振幅滤波器.

(2) 位相滤波器：由透明物体构成。不改变空间频谱的振幅，利用透明物体 ( $n > 1$ ) 的厚薄不匀改变频谱的位相。

(3) 全息滤波器：是利用全息技术制备的滤波器。它可以同时改变频谱的位相和振幅。后面讲到的“匹配滤波器”和“逆滤波器”都可以用傅里叶全息图得到。

## 二、遥感图象处理方法举例

### 1. 空间频谱分析

其基本光路如图1前半部分所示，即从光源到  $P_2$  面。将待测遥感图象  $g(x, y)$  放在  $P_1$  平面上，透镜后焦面的光强分布为  $|G(\nu_x, \nu_y)|^2$ ，称为  $g(x, y)$  的功率谱。功率谱能反映遥感图象的特征。这种方法曾用于研究云层的条痕和旋涡，测定海洋波的方向和周期<sup>[2]</sup>，以及分析各种地物<sup>[3]</sup>。

为了快速地进行定量的频谱分析，曾设计了一种光机混合系统(称为衍射图样取样机<sup>[4]</sup>)，其特点是在  $P_2$  面上放置专用环楔探测器(如图2所示)。探测器通常由 32 个环形光电元件和 32 个楔形光电元件组成。环形探测元件的输出反映了图象的空间频率分布，而楔形元件的输出则反映了频谱的方向性分布。64 个输出

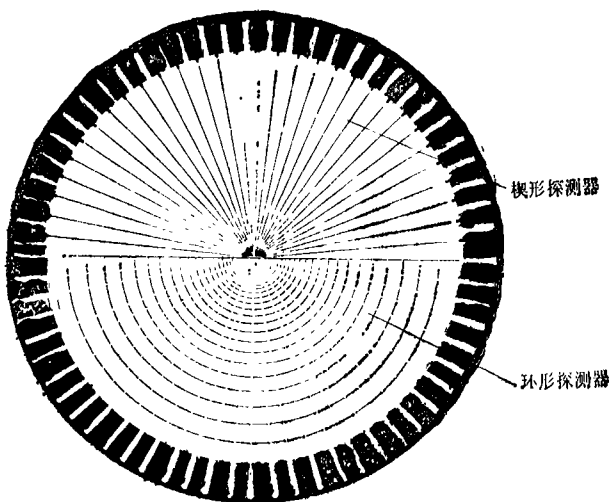


图2 环楔探测器

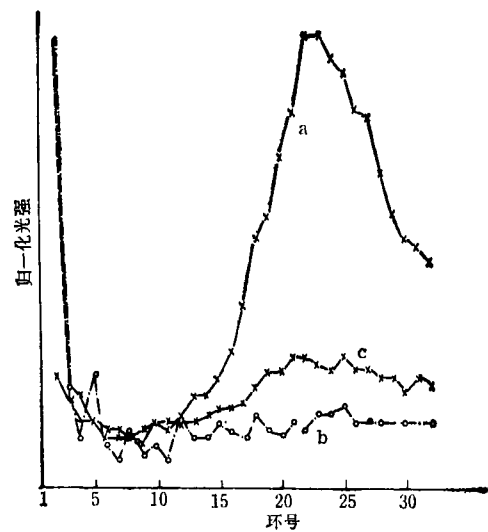


图3 太原幅几种岩土功率谱<sup>[5]</sup>  
(a) 黄土；(b) 灰岩；(c) 碎屑岩

分别经放大及模-数转换后输入计算机作数字运算。利用这种混合系统可以区别不同的自然地理区域和不同的岩性。图3显示了太原幅卫片几种岩土的功率谱，由于水系分布特点，黄土的花纹较细，因而在 23 环附近出现功率峰值，此频率相应于地面上每公里大约有三条支沟。而碎屑岩的高频成分则比黄土少得多，灰岩高频成分更少<sup>[5]</sup>。该仪器亦曾用来自动筛选航片，剔出有云层覆盖的无效航片。

### 2. 空间滤波作图象增强

其光路如图1所示。当  $P_2$  平面上放上一定形状的光阑以挡住部分频谱时，通过部分的信息就得到增强，从而使  $P_3$  面上图象发生相应变化。图4中所列的是常用滤波器。根据图象处理要求，选择适当的滤波器。例如，要想突出图象中的精细结构及轮廓，应使用高通滤波器。

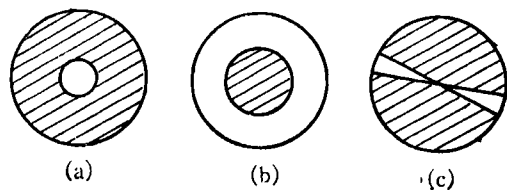


图4 各种振幅滤波器  
(a) 低通；(b) 高通；(c) 方向



(a) 滤波前



(b) 滤波后

图5 都安地区卫片的方向滤波处理

方向滤波在突出线性构造上有明显作用<sup>[6,7]</sup>。图5(a)是未经处理的都安地区幅卫片,(b)是经方向滤波后在西北 $20^\circ$ 方向上线性结构有明显的增强。

### 3. 图象识别

这种处理的目的是,从较复杂的遥感图象中检测某特定信号并确定其位置。技术关键是制备匹配滤波器。假设特定信号的振幅透过率为 $g(x,y)$ ,其空间频谱为 $G(\nu_x,\nu_y)$ 。例如,有一滤波器,其振幅透过率适为 $G(\nu_x,\nu_y)$ 的复数共轭 $G^*(\nu_x,\nu_y)$ ,则称此滤波器为 $g(x,y)$ 的匹配滤波器。其作用由图6显示。物平面 $P_1$ 上置待测样品,匹配滤波器 $G^*(\nu_x,\nu_y)$ 放在 $P_2$ 平面上。如果待测样品是 $g(x,y)$ ,经 $L_1$ 的变换,入射到 $P_2$ 上的波前为 $G(\nu_x,\nu_y)$ ,而滤波器的透过率是 $G^*(\nu_x,\nu_y)$ ,这意味着滤波器完全

抵消了 $G(\nu_x,\nu_y)$ 的波面弯曲,使透过 $P_2$ 的场是准平面波。等振幅平面波的傅里叶变换是 $\delta$ 函数,也就是说,经 $L_2$ 在 $P_3$ 面上会聚成一亮点。如果 $P_1$ 平面上样品不是 $g(x,y)$ ,而是 $h(x,y)$ ,则 $P_2$ 面上的频谱 $H(\nu_x,\nu_y)$ 与滤波器 $G^*(\nu_x,\nu_y)$ 相乘后,位相不能抵消, $P_3$ 面上将出现复杂的互相关图样,形成弥散的光斑,不出现集中的亮点。用此方法不仅能确定样品中是否存在信号 $g(x,y)$ ,而且还能根据亮点位置确定此信号在整个图象中的位置。

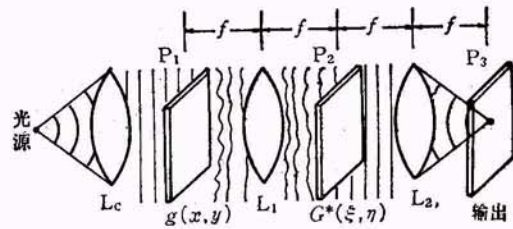


图6 图象识别的解释

制作匹配滤波器常用的方法是以 $g(x,y)$ 为样品制作一张傅里叶变换全息图。此全息图的负1级衍射即为 $G^*(\nu_x,\nu_y)\exp(-iax)$ ,即正好为匹配滤波函数乘一倾斜因子。也可以用数字计算方法,人工制备匹配滤波器。

图象识别方法,在影象制图中可用来确定两张图象之间的相对中心坐标和方向。例如,要确定某航片所摄地物的位置,可以用一张参考图象(与待测航片有重叠部分)制成匹配滤波器,根据待测航片滤波后 $P_3$ 面上亮点位置及出现亮点时航片放置取向,就可以知道该航片与参考图象的相对位置。此种光学相关技术和计算机的结合可用于遥感导航,即以飞行目标制成匹配滤波器,而用相关技术实时地确定飞机与目标的相对位置<sup>[8]</sup>。在气象卫星中也用此方法追踪云层的运动,从而能为研究气候变化提供有用的信息<sup>[9]</sup>。

### 4. 光学方法去模糊

遥感图象在摄取过程中由于传感器的平移、离焦以及大气的扰动等因素会导致象质的下降和图象的模糊。这种作用在一定条件下可以用摄影系统的传递函数 $B(\nu_x,\nu_y)$ 来描述。

如果原来场景  $g(x, y)$  的频谱为  $G(v_x, v_y)$ , 通过传感器所获得图象  $g'(x, y)$  的频谱为  $G'(v_x, v_y)$ . 两个频谱谱比即为传递函数  $B(v_x, v_y)$ , 即

$$G'(v_x, v_y) = G(v_x, v_y) \cdot B(v_x, v_y). \quad (6)$$

根据上面关系式, 就可以将图象  $g'(x, y)$  恢复到原来的场景  $g(x, y)$ . 其光路仍如图 1 所示: 将  $P_1$  面上放置  $g'(x, y)$ , 经  $L_1$  变换为  $G'(v_x, v_y)$ . 在  $P_2$  面上放上逆滤波器  $1/B(v_x, v_y)$ , 则透过  $P_2$  的场为

$$G'(v_x, v_y) \cdot \frac{1}{B(v_x, v_y)}.$$

由(6)式可知这就是原来场景的频谱, 由  $L_2$  再作一次变换就得到原来的场景  $g(x, y)$ . 这种处理本质上是利用光学方法作传递函数的补偿.

逆滤波器  $1/B(v_x, v_y)$  的制备方法亦有两种: 用全息照相方法; 用计算机进行数字运算.

### 5. 白光信息处理与彩色频率编码

近年来, 白光信息处理系统引起人们的注意. 这种处理不同于一般非相干光处理, 它的理论基础仍然是傅里叶光学. 在光路上亦与图 1 相似, 只是用一白光点光源以代替激光点光源. 其优点是白光源中包含多种波长, 可以显示各种颜色. 人眼对颜色鉴别能力很强. 以颜色对不同信息编码, 可以显示单色图象无法检出的信息, 从而显著提高人们对遥感图象的判读能力. 此外, 白光比激光的相干噪声小.

空间频率和密度的彩色编码是白光信息处理应用在遥感上的重要例子.

空间频率彩色编码系统本质上是一种多通道的滤波系统, 除了采用白光点光源外, 还用彩色滤波器(图 7)代替图 4 的振幅滤波器. 例如,

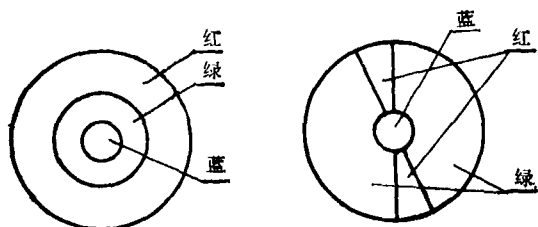


图 7 彩色滤波器  
(a) 环状; (b) 扇状

在  $P_2$  面上放一彩色环状滤波器[如图 7(a)]后, 在象平面  $P_3$  上高、中、低频信息就分别以红、绿、蓝编码形式出现, 象面上以各种混合色反映图象中各部分的空间频谱分布. 卫片中各种岩石的空间频谱不一样, 经此法处理后, 就显示出不同的颜色, 极有利于判读.

### 6. 光密度彩色编码

人眼对黑白图片上光密度的鉴别能力只有几十级, 但对彩色的鉴别能力达上千种. 故以彩色对光密度编码, 可以增加人眼对光密度的辨别能力. 近十年来, 曾应用多种方法实现光密度彩色编码, 例如光栅调制法<sup>[10]</sup>、半色调屏法<sup>[11]</sup>、散斑法和维格特效应法等等.

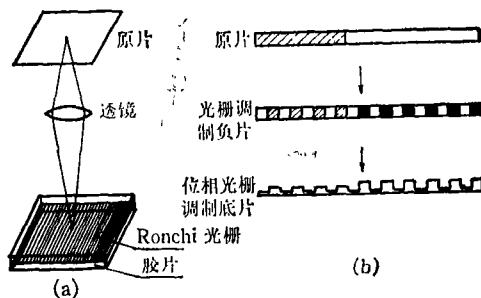


图 8 位相调制光密度彩色编码  
(a) 光路; (b) 处理过程示意图

近几年来, 由郭履容等人<sup>[12]</sup>提出的用位相调制实现彩色编码方法, 在遥感图象等方面收到较好效果. 这方法的基本步骤是: 先将待处理原片在放大机上成象, 象面的感光底片上压一块 Ronchi 光栅[光路见图 8(a)], 这样便得到光栅调制的黑白负片. 此负片经漂白处理后, 乳剂中黑色的银原子氧化为透明银盐, 振幅透过率变为 1, 但厚度周期性变化, 成为位相光栅[图 8(b)]. 原图光密度较小处相应的光栅较深. 将此位相光栅调制的图片放在以白光光源照明的  $4f$  系统的物平面  $P_1$  上. 光栅经  $L_1$  变换, 在  $P_2$  平面上形成  $0, \pm 1, \pm 2, \dots$  等衍射点. 在  $P_2$  平面上沿光栅方向放一窄缝, 只让某一级衍射(例如 0 级或  $\pm 1$  级)通过. 由于位相光栅的衍射效率是光栅程差和光波波长的函数, 因而  $P_3$  面上将出现复杂的彩色, 反映了位相光栅调制的深度, 归根结底反映了原片的光密度分

布。这种方法的特点是灵敏度高,色彩鲜艳,而且制备工序较简便,在遥感图象处理上应用较广泛。

### 7. 光学-数字混合处理<sup>[13]</sup>

将光学方法和数字计算机的方法结合起来进行图象处理的基本原理可用图9中方框图表示。此图上半部是光学系统,下半部则表示数字计算系统。 $P_1$ 为输入面, $P_2$ 则为频谱面。由频谱面上取得的功率谱数据可以输入计算机进行处理分析,这就是前面所介绍的空间频谱分

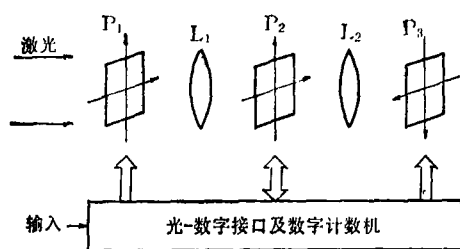


图9 混合处理示意图

析仪。 $P_3$ 是象平面。当 $P_2$ 平面上放了振幅滤波器或匹配滤波器时, $P_3$ 面上的图象或相关图数据也可输入计算机进行处理。上面所说的两类混合计算机基本上都是由光学系统作前处理,然后将处理结果输入计算机再作数字处理。更复杂的系统则由数字计算机反过来控制光学系统的物面 $P_1$ 和滤波面 $P_2$ 上信号,因此在 $P_1$ 或 $P_2$ 平面上必须有实时的和可重复使用的电光元

件。前面所介绍的一些相关技术的应用属于此类型混合系统<sup>[8,9]</sup>。这种系统技术上较复杂,但也是最有发展前途的。

以上是相干光图象处理的一些例子。此外,象合成孔径侧视雷达的数据处理<sup>[14]</sup>也是相干光图象处理中有成效的一个方面,全息体视模型<sup>[15]</sup>对照相测量学也很有用,限于篇幅,不详述。

### 参 考 文 献

- [1] J. W. 顾德门著,詹达三等译,傅里叶光学导论,科学出版社,(1976)。
- [2] 张风林,光学学报,1-6(1981),569。
- [3] G. Lendaris et al., *Proc. IEEE*, 58 (1970), 198。
- [4] S. H. Lee, *Optical Information Processing (Topics in Applied Physics Vol. 48)*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, (1981), 184。
- [5] 朱世嘉等,科学通报,28-21(1983),1329。
- [6] A. Bauer et al., *J. Glaciol*, 6-48 (1967), 781。
- [7] R. Chevallier et al., *Photogrammetria*, 26(1970), 17。
- [8] D. Casasent et al., *Appl. Opt.*, 18(1979), 3307。
- [9] A. Vander Lugt, *Proc. IEEE*, 62 (1974), 1300。
- [10] 梁秀慧等,应用激光,3-2(1983),17。
- [11] 张洪钧,激光,5-6(1978),44。
- [12] 郭履容,光学学报,4-1(1984),145。
- [13] S. H. Lee, *Optical Information Processing (Topics in Applied Physics Vol. 48)*, Springer-Verlag, (1981), 181。
- [14] L. J. Cutrona et al., *Proc. IEEE*, 54 (1966), 1026。
- [15] H. J. Caulfield, *Handbook of Optical Holography*, Academic Press, (1979), 626。

(上接第123页)

生说明了什么问题呢?按照 Peratt 的看法,它表明磁力也许比天文学家原先猜想的更为重要。迄今理论工作者能够想象到的物质和能量的密集均是通过引力来完成的,然而现在很清楚,磁力能够把物质和能量挤压在一起形成这些涡旋状纤维。这表明的确有一种全然不同的过程在起作用。Peratt 利用洛斯·阿拉莫斯实验室的超级计算机通过模拟碰撞中的气云构成

出了一种磁力怎样在宇宙尺度上相互作用的模型。在他的模型中的确也会形成磁涡旋,“出现了看起来象旋涡星系那样的结构,而其余的看起来象类星体或活动星系核。看来,单单是万有引力并不能使宇宙成为今天这种情况。使宇宙成为今天这种状况的,看来还有磁力在起作用”。

(黄光良译自 Science Digest 1985年7月号)