

来华技术交流资料

(英国C. G. Wynne 教授)

英国皇家学会会员，伦敦大学帝国学院教授C. G. Wynne 于1977年10月20日到23日来长春光机所参观访问及进行学术活动。共进行学术报告两次，技术座谈两次。现将报告内容及座谈问答整理成三部份，以供参考。错误之处请指正。这三部分如下：

- 一、第一次学术报告：二级光谱校正问题；
- 二、第二次学术报告：特殊光学系统；
- 三、技术座谈问答；

参加座谈及技术整理的单位有大邑光电所，上海光机所，西安光机所，安徽光机所，上海技术物理所，长春光学精密机械学院，长春光机所等。

技术座谈小组

1977. 10. 27.

一、第一次学术报告·二级光谱校正问题

在传统的象差理论中，有关二级光谱校正问题存在一个错误结论，这是七十二年来首次发现的问题。这里所说的内容是近期的研究工作，很难说将来会有多大用处，也许有用，也许用处不大。首先谈一下理论发展的历史背景。

(一) 理论发尸的历史背景：

当设计一个普通消色差双胶合物镜时，若把红光和紫光的焦点校正到一起，则别的中间波长光的焦点位置就会比红光和紫光公共焦点位置更接近物镜，这种残留的焦点位置的差别就是所谓的二级光谱（图1所示）。

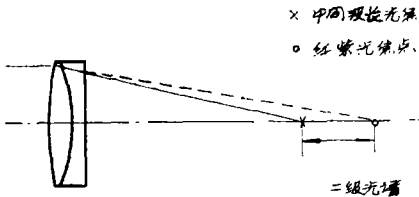


图1 普通消色差物镜的二级光谱

物镜的近轴焦点随波长的变化曲线作在图2，实线对应于普通消色差物镜，虚线对应于用特殊色散材料消色差物镜。造成二级光谱的原因是光学玻璃的色散 $\frac{dn}{d\lambda}$ 随波长变短而迅速增大。由于二级光谱的存在，往往使长焦距望远物镜、制板镜头的性能降低，有时高分辨复制物镜为减小二级光谱对分辨率的影响不得不加上滤光片。

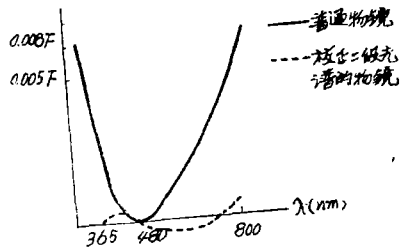


图2 普通物镜和校正二级光谱物镜的近轴焦点位置随波长变化的曲线

如果采用象 CaF_2 那样的特殊色散材料，可把二级光谱校正到图2虚线所示的那样。但是 CaF_2 晶体比较软，大块不易做，并且它的色散随温度变化大。对于用其它特

殊色散的玻璃在校正二级光谱性能上劣于 CaF_2 而优于普通玻璃，但大块的均匀性好的也不容易得到。因此采用特殊色散材料校正二级光谱常常有不便之处。然而为了校正密接薄透镜系统的二级光谱必须用特殊色散材料。

但是从1905年的 Schwaszchied 提出的初级色差理论开始到后来的光学书中以及西德肖特玻璃目录的说明中都认为：对于分离一定间距的薄透镜系统校正二级光谱同样也必须用特殊色散材料，用 p - v 图中在正常玻璃线上的两块普通玻璃不可能校正二级光谱。这一推论是错误的。下面以一个光学模型来说明。

(二) 由两种普通玻璃构成的二级光谱校正模型

为校正前面所谈的普通双胶合物镜的二级光谱，可在它物方的平行光束中加一个无焦系统（见图3）。为了避免跟其它象差的影响相混淆，此无焦系统对中间波长 480nm 的单色象差为0，初级轴向色差也为0。这校正器，由分开一定间距的两组双胶合透镜构成，（见图3），其中每组的外表面为平面，胶合面彼此相等，玻璃对相同，都是由 LaK_{31} （1.706/56）和 SF_8 （1.706/31.0）配对，但在两胶合透镜中材料彼此相反使用。这两种玻璃对 480nm 波长折射率相等，对于 400nm 波长它们的折射率差跟对于 700nm 波

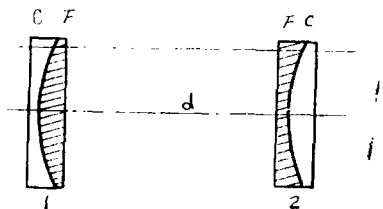


图3 两组元无焦的二级光谱校正器
C— LaK_{31} F— SF_8

长时的差等值反号。显然对波长 480nm ，因为 $n(c) = n(F) = 1.706$ ，所以 $k_1 = k_2 = 0$ ，总光焦度 $K_{480} = k_1 + k_2 - dk_1 k_2 = 0$ 。对于其它波长，单组光焦度 $k_1 = [n(F) - n(c)] \cdot \left(\frac{1}{r_{\text{胶合}}}\right) = -k_2 \neq 0$ ，所以总光焦度 $K_{\text{其它波长}} = dk_1^2 > 0$ 。再由于 $[n(F) - n(c)]_{700\text{nm}} = -[n(F) - n(c)]_{400\text{nm}}$ ，所以 $K_{700} = K_{400} = dk_1^2$ 。由此可见这校正器对中间波长 480nm 是无焦的，而对波长 400nm 和 700nm 具有相等的正光焦度 dk_1^2 。从而能产生跟普通双胶合消色差物镜相反符号的二级光谱值。通过控制胶合面半径 r 胶合和两组间距 d ，可调整校正器的二级光谱值使之抵消后面物镜的二级光谱，产生如图2曲线所示的焦点位置曲线。

又根据拉氏不变量 $H = nuh_s$ ，符号含义见下图4，因为在第二块校正元件上

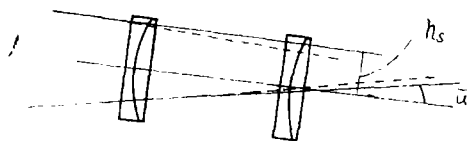


图4 二组元校正器倍率色差的产生

$(h_s)_{400\text{nm}} \neq (h_s)_{700\text{nm}}$ 对波长 400nm 和 700nm 的孔径光线高度不等，从而主光线的倾角 $(u)_{400} \neq (u)_{700}$ ，亦即二组元校正器有倍率色差，解决办法是增加一个跟上述两组元校正器，成镜对称的校正器，并且所有胶合面半径均增大一倍正中间两块合成一块，则得到如图5所示的 $\Sigma C_1 = 0$ ， $\Sigma C_{II} = 0$ 。有反号等值的二级光谱的三组元校正器。把校正器的玻璃互换一下位置，也可使三个波长的

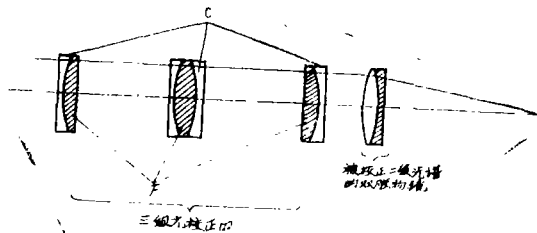


图5 三组元校正器

光校正到同一焦点位置，但曲线偏离幅度有所不同。

这种放在平行光束中的二级光谱校正器模型实际应用时会有问题的，例如美国的1米口径望远镜前加三组元校正器显然是太大了，若象图6所示那样放在会聚光束中，直径只需主物镜口径的1/4，也可达到类似的校正效果。如果不是校正现有物镜的二级光谱，而是重新设计，那么可把校正器跟物镜一起考虑，只需让前面物镜留一些色差，这样可以结构简单些。

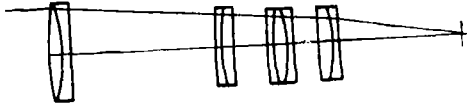


图6 放在现有望远物镜后的校正器

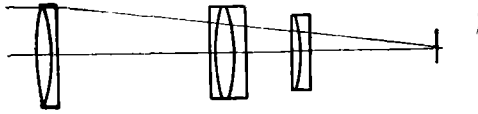


图7 物镜和校正器一起设计的系统

在三片照相物镜中，正好能校正七种初级象差，要把象质设计得更好，需复杂化，如果在复杂化中，把各部分的色差配置也考虑进去，例如象图8那样前组双胶合中正片用火石玻璃，也许二级光谱会得到改善。

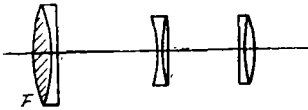


图8 在三片复杂化中考虑减小二级光谱

最后讲一下传统理论对分离系统校正二级光谱问题产生错误结论的原因。

(三) 传统理论产生错误结论的原因

以薄透镜系统为例作粗略分析。一个单薄透镜的光焦度 $k = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{l'} - \frac{1}{l}$ ，其中 l 和 l' 分别为物距和象距，

光焦度 k 代表光波通过透镜前后波面曲率的变化(见图9)。当波长变化时出射波面曲率随



图9 单透镜前后波面变化

之变化其变化量就是透镜光焦度的改变量 $\delta k = \frac{k \delta n}{n-1} = \frac{k}{v}$ ，其中 k 为光焦度， v 为阿贝数。由此可得，两波长的出射波面的偏差，即波色差为

$$\delta W = \frac{1}{2} h^2 (c_1 - c_2) = \frac{1}{2} h^2 \delta k = \frac{1}{2} \frac{h^2 k}{v} = \frac{1}{2} C_1$$

其中 c_1 和 c_2 为两波长出射波面的曲率， h 是透镜出瞳半径。(见图10)。

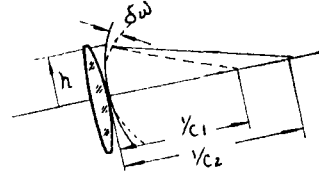


图10 波色差 δW

对于密接薄透镜组，因为前表面的象距等于相邻的后表面之物距，所以对应相消，最后得 $\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \Sigma k$ ，从而密接透镜的波色差为 $\delta W = \frac{1}{2} h^2 \Sigma \delta k = \frac{1}{2} h^2 \Sigma \frac{k}{v}$ 。对于分开一定间距的薄透镜系统的波色差，按传统的初级理论得 $\delta W = \frac{1}{2} \Sigma h^2 \delta k = \frac{1}{2} \Sigma \frac{h^2 \cdot k}{v}$ ，其中的各组上的孔径光线高度 h 是以平均波长按高斯光学公式算得。

现以两组分离的系统为例，(参看图11)。

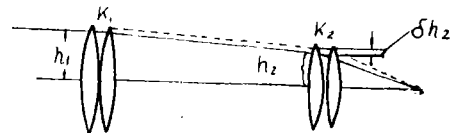


图11 两组分离系统，虚线和实线分别代表两不同波长的光线

对中间波长，用高斯光学公式而计算得： $h_2 = h_1 - d h_1 k_1 = h_1 (1 - d k_1)$ ，从而有初级轴

向色差的波差为 $\delta W = \frac{1}{2} h_1^2 \delta k_1 + \frac{1}{2} h_2^2 \delta k_2$ 。从这传统的波色差公式导致了分离系统校正二级光谱不能用普通玻璃的错误结论。从图11可见，错误产生的原因是过去讨论二级光谱时忽略了前组的色差对离得很远的后组初级色差的影响，也就是略去了 h_2 。随波长的变化量 $\delta h_2 = h_2 d \delta k_1 = h_2 d \frac{k_1}{v_1}$ ，当前组残留色

差越大，间距 d 越大，则影响就越大。二级光谱既然是描写轴向色差的色变化，就不能把色散的二次项 $h_2 \delta n^2$ 忽略。综上所述，用普通玻璃校正二级光谱的本质要求是：光学系统中的组元要分开到适当大的间隔，并且分离组的轴向色差不可单独校正，而必须分别有相当大的值。

二、第二次学术报告：特殊光学系统

我是学理科的，大学毕业后在工业部门工作了二十五年，从一九六〇年以后被邀请到帝国理工学院，因为我在工厂首先用自动设计且有成效。帝国理工学院在英国是光学方面较好的学校，英国现在各工厂里的技术人员大都是我的学生，我通过这些人一直和工业部门保持联系。我到帝国理工学院，主要是搞利用大计算机光学自动设计，逐步改进和完善程序，我们还研究象差理论。我们对工厂的光学设计只作指导工作，具体设计由工厂自己承担，但有些特殊要求的光学系统，需要试制的，由我们承担设计。

下面我要介绍的就是这种特殊要求的光学系统，这些工作是最近我参加研究的工作。

在天文工作中，象变换管的出现起很重要作用，它可以用短的曝光时间拍摄弱星。

现在英国格林威治天文台的 2.5 米天文望远镜，在大气抖动为一弧秒的条件下，星象的光斑被扩散成 37 微米，而如果不考虑大气抖动，则在 $f/3$ 的主焦点上的衍射盘只有 3 微米，因此大气抖动使光斑扩大 12 倍。

如果我们用很短的曝光时间进行拍摄，则在这个曝光时间内可以冻结大气抖动，比如用象变换管可以用 1/50 秒的曝光时间拍摄弱星，这时在象面上得到的星象呈现斑点图样，这个斑点图样的每一个斑点对应于理想

成象的星象。由于大气抖动，这些斑点图样随时间在变化，所以测量不准星的角直径，这是天文学中存在的严重问题。

为了解决大气抖动问题，采用斑点干涉法，利用 1/50 秒曝光时间拍摄一系列的斑点图样，比如一个晚上可以拍摄几百张斑点图样，然后把这样获得的信息经过傅里叶变换处理，最后得到干涉条纹，从干涉条纹的宽度测定两个星之间的角距离，而从干涉条纹的方向测定该两个星的方位。

为了作这样的信息处理，光学系统必须校正放大率色差，否则每一个斑点由于放大率色差成为按光谱分开的线条状，这就无法进行傅里叶变换的处理，为此要加滤光片，用单色光拍摄斑点图样，但这样作法能量损失大。所以天文台希望我解决这个放大率色差问题，如果解决这个问题，则可以不要滤光片，因此能对弱星进行观测。这时放大率色差是随时间由于大气抖动而变的，因此要解决可变的放大率色差校正，这是给光学部门提出来的特殊要求。

当用这种技术时把望远镜第一焦点利用转象系统放大 30 倍后用象变换管接收，如图 1 所示。这时在 30 倍转象系统的平行光束中放置无光焦度的校正板，可以校正二级光谱的同时校正放大率色差。无光焦度校正板是由等折射率不等色散的正负透镜胶合的

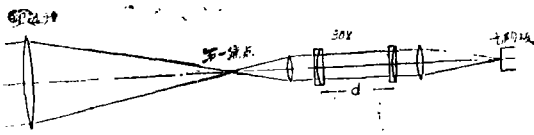


图 1

块平板组成，这两块平板的胶合面半径相等并玻璃互换，如图 2 所示。由于等折射率胶

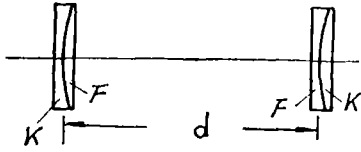


图 2

合，对这个中心波长，平行光不偏折地通过，而轴向色差是前后平板相互抵消。这时产生负的二级光谱，因为对中心波长以外的光这两块平板组合的光焦度总是正的。这个负的二级光谱和30倍转象系统的正的二级光谱相抵消。另外这两块平板组合的系统还产生放大率色差，这个量和两块平板间距 d 有关，因此通过调整这两块平板间距来实现放大率色差的调整。这时使用完全普通的玻璃，这是我最近研究的成果。我出国前已送交工厂加工去了，回国后能听到实际应用的消息。

在光学信息处理中用傅里叶变换镜头。

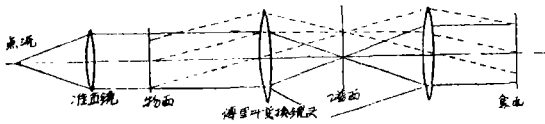


图 3

图 3 中表示了相干光学信息处理系统。把被处理的透明片放在傅里叶变换镜头的前焦面的物面位置，用单色平行光照明，则在傅里叶变换镜头的后焦面上产生该图象的空间频谱，在这个谱面上放置空间滤波器，滤去不必要的频谱，然后再利用另一个傅里叶变换镜头作傅里叶逆变换，在像面上得到所希望得到的象。为了实现傅里叶变换运算，对傅里叶变换镜头提出特殊的成象要求。

傅里叶变换镜头要求对无限远成象，光

栏放在前焦面，并且要求同时校正物面象差和光栏象差，这就要求这个镜头正反两个方向的光线都要成象质量好，这在一般的光学系统中是不能满足的。

关于傅里叶变换镜头 Blandford 曾设计了如图 4 形成的傅里叶变换镜头。这个傅里叶

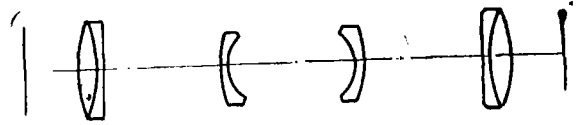


图 4

变换镜头采用对称型，所以对正反两个方向的光线具有相同的成象质量。由于消色差，可用不同波长的激光，如 4880 埃和 6328 埃。这时对色差的要求是各个波长单独校正好象差就可以，不要求同时校正，因为实际应用时象面和物面位置对不同的激光波长随时进行调整。这个系统的缺点是物面到镜头的距离近，对引进倾斜的参考光束时受到限制，另外镜片表面反射引起的杂光和灰尘引起的斑纹的影响大，价格也贵。这个镜头焦距为 1 米，物面和光瞳直径为 60 毫米， $f/16.67$ ，波长为 6328 埃时总的波象差小于 $\lambda/8$ ，价格二千英镑。

我采用了简单的傅里叶变换镜头达到上述镜头的成象质量。

先考虑一倍成象系统，如图 5 所示。

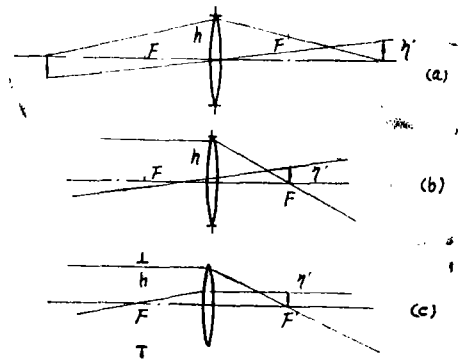


图 5

在图 5 (a) 中光栏在透镜上，物象关系是 -1 倍成象关系。这时我们用 S_1, S_2, S^* ,

S_{IV}, S_{V} 表示物面象差的 *Seidel* 系数, $\overline{S}_I, \overline{S}_{II}, \overline{S}_{III}, \overline{S}_{IV}, \overline{S}_V$ 表示光栏象差的 *Seidel* 系数。然后把物体移到无限远处, 光栏还放在透镜上, 如图 5 (b), 这时相应的象差系数用 $S_i, S_{ii}, S_{iii}, S_{iv}, S_v$ 表示。最后把光栏移到前焦点上, 如图 5 (c), 这时相应的象差系数用 $S_i^{\cdot}, S_{ii}^{\cdot}, S_{iii}^{\cdot}, S_{iv}^{\cdot}, S_v^{\cdot}$ 表示。根据物面移动和光栏移动时象差的变化关系可以把 $S_i^{\cdot}, S_{ii}^{\cdot}, S_{iii}^{\cdot}, S_{iv}^{\cdot}, S_v^{\cdot}$ 表示成 $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$, 比如

$$S_i^{\cdot} = S_I - (h/\eta)4S_{II} + (h/2\eta)^2 H^2 (3K + 2P)$$

$$S_{ii}^{\cdot} = -S_{II} - H^2 K (h/4\eta) + (\eta/h)S_I$$

$$S_{iii}^{\cdot} = (\eta/h)^2 S_I - H^2 (\frac{1}{2}P + K/4)$$

其中, h 是透镜上的轴上光线的入射高度,

η 是后焦点上的象高,

H 是拉氏不变量,

K 是光焦度,

P 是 *Petzval* 场曲。

根据 $S_{ii}^{\cdot} = \overleftarrow{S}_{ii}^{\cdot} = 0$ (箭头表示正反方向追光线), 求解可得

$$S_{II} = 0$$

$$S_I = (h/\eta)H^2 K/4$$

这时得到如下结果

$$\overrightarrow{S_i^{\cdot}} = \overleftarrow{S_i^{\cdot}} = (h/\eta)^2 H^2 (K + \frac{1}{2}P)$$

$$\overrightarrow{S_{iii}^{\cdot}} = \overleftarrow{S_{iii}^{\cdot}} = 0$$

$$\overrightarrow{S_{iv}^{\cdot}} = \overleftarrow{S_{iv}^{\cdot}} = -\frac{1}{2}H^2 P$$

最后式表示弧矢和子午场曲相等并且符号相反, 这就是因为系统没有校正 *Petzval* 和, 因而存在一定的场曲, 而慧差却得到校正的傅里叶变换镜头的最佳校正状态我用单片透镜设计了焦距 1 米, $f/17$ 的傅里叶变换镜头, 结果 $S_i^{\cdot} = 0.05\lambda$, 其他象差都校正到衍射极限以内。这时用高折射率玻璃可以降低 S_{IV} , 并把一个面修成非球面可以校正剩余球差。如图 6 示。

为了提高相对孔径, 我用两个 $n=1.7$ 的平凸透镜作到焦距 1 米, $f/12$ 的傅里叶

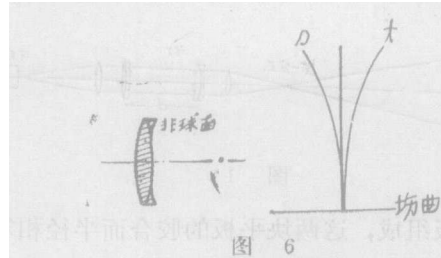


图 6

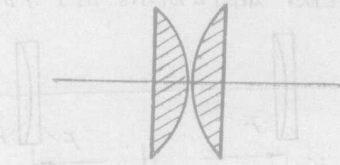


图 7

变换镜头, 如图 7 所示。这个镜头只花 60 英镑, 也达到 *Blandford* 的二个英镑的镜头的性能, 比如当 $f/17$ 时 $S_i^{\cdot} = 0.07\lambda$, 对于波长 4880 埃的光空间频率作到 60 对线/毫米。当要求进一步提高相对孔径时, 需要两片分离, 这时根据 $\overrightarrow{S_i^{\cdot}} = \overleftarrow{S_i^{\cdot}} = 0, \overrightarrow{S_{ii}^{\cdot}} = \overleftarrow{S_{ii}^{\cdot}} = 0, \overrightarrow{S_{iii}^{\cdot}} = \overleftarrow{S_{iii}^{\cdot}} = 0$ 的要求需要负的 \overline{S}_I 值, 因此离开光栏较远处放负组透镜为有利, 如图 8 所示。这个系统可以

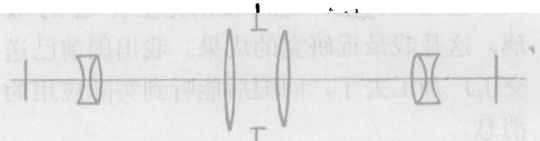


图 8

作到 $f=1$ 米, $f/4 \sim f/5$ 相对孔径。中间的两个正透镜可能简化成一个正的双胶合组, 如图 9 所示。

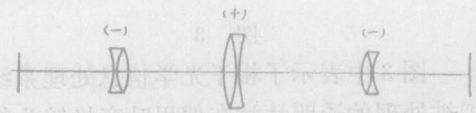


图 9

在高能物理研究中用气泡室, 气泡室是密封的容器, 容器内充液氢, 利用活塞控制气泡室的体积, 气泡室外围是产生磁场的磁性体。当气泡室的体积增大时, 被加速的带电高能粒子进到气泡室, 在带电粒子周围形成气泡, 这样, 气泡显示出带电粒子在外加磁场中运动的轨迹, 利用照相机可以拍摄

这个气泡组成的带电粒子运动的轨迹，以此研究基本粒子的性质。

现在气泡室的尺寸变得很大，如1米~7米范围，为了照明这么大的气泡室，采用反光照明法，在气泡室内壁排列高折射率的玻璃球陈列，利用返回的光照明气泡室，由于液氢的折射率为1.09，气泡可以散射光，如图10所示。

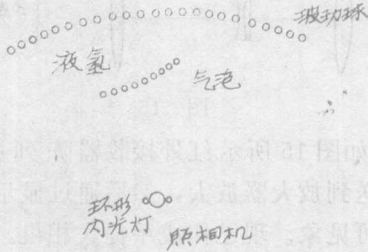


图 10

由于粒子运动轨迹是三维的，为了拍摄立体像，用两个互相具有重迭部份的两个相机同时拍摄气泡室。

通过拍摄大量照片发现新的规律。

用在这种特殊系统中的照相物镜的特点是视场角特别大。由于必须有重迭部分，一般视场角为 $\pm 50^\circ \sim \pm 70^\circ$ 范围。另外要求有一定的景深范围，相对孔径不大，一般在 $f/8 \sim f/16$ 内，所用的光谱范围窄，相机的分辨力应和所用的照相底片的分辨力相匹配。

我曾给法国—苏联高能物理实验室作过泡室设计。焦距为5厘米，视场角为 $\pm 50^\circ$ ，如图11所示。

由于泡室外边有很厚的磁性体包围，照相机通过转象系统把第一次成的像转到外边，在第一象面处放场镜把照相机的光瞳成

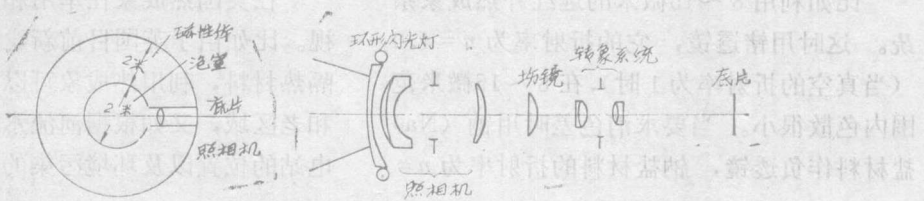


图 11

象到转象系统的中间，这个系统的原先设计由于高级象散很大，有一个带区象模糊，要求在原先的结构尺寸的基础上改进成象质量，这样在很多条件限制下进行修改，这些都是对光学设计的特殊要求。

在大视场照相物镜设计中应注意的问题是视场边缘光能量衰减的问题。如果系统校正畸变，光能按 $\cos^4 \omega$ 下降。然而如果给一定的光阑慧差，允许有一定正畸变，则这个问题有所改善。但这时引进畸变，影响轨迹的判读，因此判读时要作修正。另一个问题是如果不采用象方远心光路，则底片的不平度引进畸变，所以现在设计的泡室系统采用象方远心光路。如图12所示。

由于利用超导材料，磁性体的厚度变薄，底片可以送到里边去，故不用两次成象。

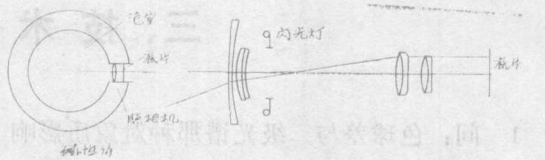


图 12

近年来超声成象系统被重视。由于医用 x -光照对人体有害，很多的医生不希望用 x -光照相，而超声波在这方面显得优越。

由于人体的肌肉类似于透过超声波的水而骨骼对超声波起散射作用，因此利用超声波可以作医学诊断。

设计超声成象系统时我们把水的折射率定为1，其他折射率都相对于水而言。

声透镜的材料有金属和合成橡胶等，其相对于水的折射率为0.25~2的范围内。

设计声透镜系统时光学领域的象差理论照样可以用。但设计声透镜系统时透镜尽量要薄，片数尽量要少。由于声透镜材料的折射率变化范围大，设计容易，比如一块橡胶负透镜，其折射率为 $n = 0.25$ ，有正的光焦距并单块透镜可以校正球差。如图13所示。

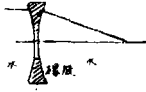


图 13

另外，由于声波长为 $1 \sim 2$ 厘米量级，四分之一波长也有几毫米，这样声透镜的加工要求是很低的，一般用压铸的方法加工透镜。

在遥感技术中利用大气的红外窗口进行热成像的技术是很重要的。它可以识别温度差为 1 度的物体。

比如利用 $8 \sim 15$ 微米的远红外热成像系统。这时用锗透镜，它的折射率为 $n = 4.0$ （当真空的折射率为 1 时），在 $8 \sim 15$ 微米范围内色散很小。当要求消色差时用钠（Na）盐材料作负透镜，钠盐材料的折射率为 $n =$

1.6 ，色散大。这时负透镜有很小的光焦距就可以消色差，如图14所示。

如当作成三片形式时，相对孔径可作到

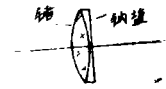


图 14

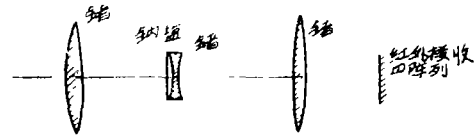


图 15

$f/1$ ，如图15所示红外接收器阵列把接收信号送到放大器放大，然后通过显示系统转换成可见象。现已作成手提式相机。

用锗透镜时由于折射率高，表面的反射严重，应该镀抗反射膜。

在英国热成像在军用和民用上都很重视。比如由于英国目前新建的房子屋顶采用隔热材料，利用热成像可以识别新建的区域和老区域，又如根据河流水温的变化发现水电站的位置以及环境污染的调查等。

三、技术座谈问答

1 问：色球差与二级光谱那种对象质影响大？

答：色球差与二级光谱这两者，那一种对象质影响大；这两者影响是不一样的，二级光谱对近轴位置有影响。而色球差影响整个孔径，对于不同的用途要求是不一样的，如制板镜头是高对比、高分辨率、小相对孔径，故要求要很好的校正二级光谱，彩色电视镜头由于接收器分辨率低，孔径大，故色球差是主要矛盾，这两者在系统设计中可用空气间隙和其它参数合理调整，即能得到二级光谱和色球差都较为满意结果。

2 问：在英国光学公差是怎么制定的

答：在现在有计算机条件下，最好办法是我们先改变透镜表面半径 r 和厚度 d ，然后通过光学追迹看象差变化，为制定偏心公差，我们编了一个偏心公差程序。

我以为制定公差最好办法是首先了解生产厂现有的半径数据和玻璃数据，再用程序最优化一下，算出需要的空气间隔 d 的数值，这样我们就可告诉他们 d 的调正范围及偏心数值了。

当然，在工业部门公差制定又是另一回事了，主要取决于工厂的生产成本，所以这并非设计人员的事，而是工厂经理的事，比如，要求 $d = \pm 0.1mm$ ，它的成品率为 60% ，

而要求 $d = \pm 0.05mm$ 则它的成品率提高到 80%，比较两者就知，前者成品率低，但成本也低，而后者虽成品率高但成本也高了。所以这两者要权衡一下，统一考虑。

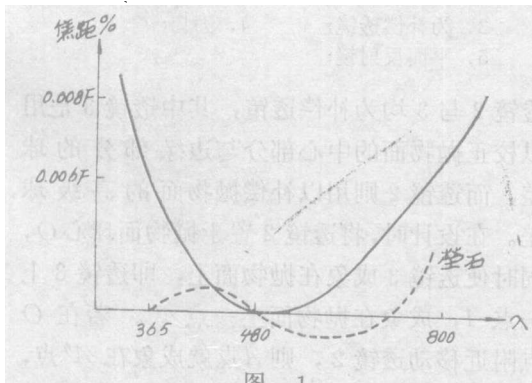
3 问：我想用您所说的理论，做一个 $f = 3m$ ，相对孔径为 $1/10$ 的平行光管，二级光谱能否校正到焦深范围？

答：这问题难以说出肯定回答，成功与否主要取决于视场的大小和色球差有多严重，结构参数的增加色球差可好些，需要做试验。

4 问：用于校正二级光谱的特殊色散性能的光学玻璃有哪些？它们的性能如何？

答：德国肖特厂的 FK50 和 FK51 它的色散性能很象萤石，但是这种玻璃的尺寸做不大，均匀性也比较差，耐酸性也不好，温度膨胀系数也大。

另外，还有德国肖特厂的火石玻璃。KzF。这种玻璃对从红到绿的波段很好。但对兰紫色不好。它常被用于航摄影头中。因为兰紫色的散射大。我们要加一块滤光片，把兰紫光滤去。但这种玻璃不能象萤石那样，有三个交点（如图 1），而只能使曲线变平。它的化学稳定性也不好。所以这些玻璃在一般情况下是尽量不用。只有在特殊情况下才使用这些玻璃。如在航摄影物镜中，希望性能越高越好，并用滤光片滤去兰紫光，这时我们才用 KzF 玻璃。



5 问：请介绍大型天文望远镜的主镜材料。

答：在大型天文望远镜中必须注意温度变化引起的镜面材料和镜筒材料的变形问题，尤其是温度变化引起的镜面的不均匀的局部变形直接影响成象质量，应该尽可能消除这种因素。如果镜面是均匀变形，则只引起像点位置的移动，而象质不变坏，这时可以选择适当的象面位置进行观测，补偿温度变化引起的镜面变形问题。在天文台一般根据天气预报，选择温度变化小的时间进行观测，当天气变化大的时间按排光谱工作等成象要求不高的工作，这些都是由于温度变化引起镜面材料变形，得不到好的象质之故。因此，大型天文望远镜用的材料尽量选择温度引起的热膨胀系数较小的材料。

如美国 5 米望远镜抛物面镜用了派洛克斯玻璃，Kitt Peak 国家天文台的 4 米望远镜用 SiO_2 材料。另外，Cervit Zarodar 玻璃在一定的温度范围内膨胀是波浪式的，几乎认为不变，而在过了这一范围，就变化较快，这种玻璃在一定温度范围内使用可认为零膨胀系数玻璃，适合作为大型天文望远镜主镜材料，如英国在大西洋新建的 4.2 米望远镜用此材料。

6 问：大型天文望远镜主镜的面形要求如何？

答：在大型天文望远镜中分辨率是由大气抖动决定的，如大气抖动为一弧秒时，大气抖动引起的象点扩散就比望远镜的理想衍射盘大 5 倍以上，而一般用刀口仪检验大镜面的精度为波长的几十分之一的量级，所以用刀口法检验大镜面的质量就完全满足使用要求，不会由于镜面的面形不好影响分辨率。

7 问：请介绍在大型天文望远镜摄谱仪中用几块小光栅拼起来作大块光栅的情况。

答：图 2 表示天文望远镜摄谱仪示意图。

图中 L_1 是天文望远镜，在望远镜象面上放置狭缝 S ，其狭缝宽度等于星象大小，以便消除杂光， L_2 为摄谱仪的准直物镜，

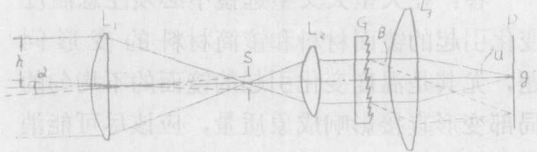


图2 大望远镜摄谱仪光学系统示意图

G 为衍射光栅, L_3 为摄谱仪的照相物镜, P 为接收器 (底片或者是象度换管)。

在天文摄谱中目标是微弱的星光, 望远镜所成的一颗星的象是一个小的扩散圆盘, 其直径决定于大气条件, 在良好的条件下, 这个“可见圆盘”的角直径为一弧秒, 而星体在接收器面上所成的象的尺寸应该和接收器的分辨单元相匹配。若 F 为整个系统的焦距, α 为大气决定的角直径, 则象斑直径为 $F\alpha$, 为了和一个分辨单元为 g 的接收器相匹配, 要求

$$F\alpha = g$$

并且整个系统的焦距决定于望远镜的口径 $2h$ 和照相机的孔径角 u , 即 $F = h/u$ 。因此要求

$$u = \frac{h}{F} = \frac{h\alpha}{g}$$

这样, 当望远镜的口径 $2h$ 、大气抖动条件 α 、接收器的最小分辨单元 g 决定后, 照相机的孔径角 u 是给定的。

另一方面, 由于光栅的色散角 β 一定的条件下, 要得到足够的光谱分辨率, 就必须使照相物镜 L_3 有足够长的焦距 F_3 。因此, 照相物镜的轴上点口径 $2h_3 = F_3 u$ 也相应地变大, 这个口径等于光栅的尺寸。这样在大型天文望远镜摄谱仪的光栅尺寸就要相当大。目前单块光栅最大尺寸是 300 毫米。为了加大光栅尺寸, 可以采用几块光栅拼起来使用的方法, 如图 3 所示。这时光栅的总的

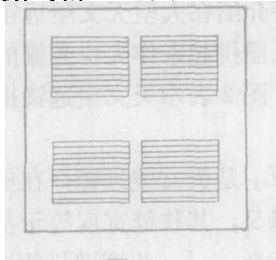


图 3

分辨本领还是由单块光栅的分辨本领所决定, 在几块小光栅拼起来的位置对准有一些误差也不太影响整个光栅的分辨本领。

8 问: 大望远镜主镜一抛物面的检验方法

答: 1. 在望远镜口径不大的情况下, 可采用自准直方法检验。如图 4 所示, 将刀口仪置于抛物面焦点 O , 这样可观察阴影图来修磨抛物面。

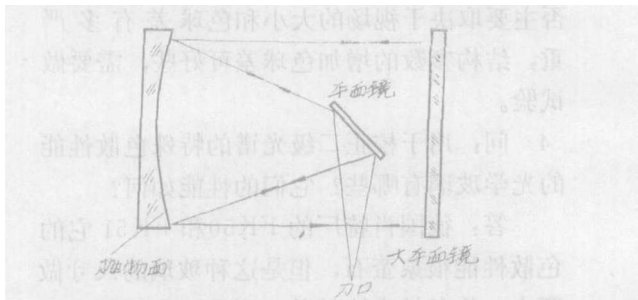


图 4

2. 在望远镜口径较大或无大平面镜的情况下, 可采用透镜补偿检验。如图 5 所示,

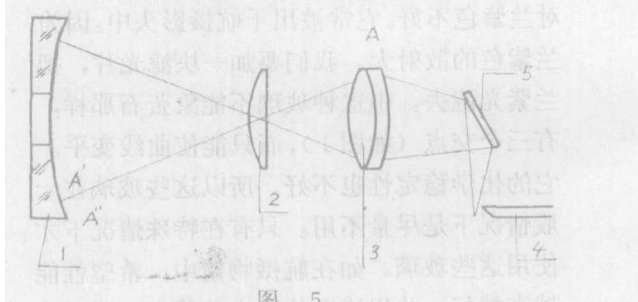


图 5

图 5 中:

- 1. 为抛物面元镜; 2. 为补偿透镜;
- 3. 为补偿透镜; 4. 刀口;
- 5. 平面反射镜;

透镜 2 与 3 均为补偿透镜, 其中透镜 3 是用以校正抛物面的中心部分与边缘部分的球差, 而透镜 2 则用以补偿抛物面的高级球差。在设计时, 将透镜 2 置于抛物面球心 O , 同时使透镜 3 成象在抛物面上, 即透镜 3 上一点 A , 成象在抛物面上一点 A' 。若在 O 点附近移动透镜 2, 则 A 点就成象在 A'' 点, $A'A''$ 就是要求补偿的高级球差。

温教授说: 这是一种很实用的检验方法。在美国用来检验过大口径的, 相对孔径

为 $D/f = 1:3$ 的抛物面镜。在加工过程中，每检验一次只需几分钟。这种补偿透镜计算时要准确。要另外用一种方法来校正。

若抛物面的相对孔径大，如 $D/f' = 1:1.5$ ，则补偿透镜 3 可用二块单透镜分离，这样以利于减少高级球差。

若是 $R、C$ 系统，则主镜为双曲面。则修补透镜 3 可用一双胶合物镜，以利于校正系统球差。

3. 哈德曼法

如图 6，在主镜前放一哈德曼光阑，并

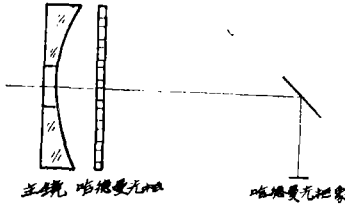


图 6

测量其哈德曼光阑象。将光阑象测得的数据通入计算机。通过计算就可得到抛物面镜面形状。如不满足要求，则再进行抛光。但用这种方法控制抛光所得出的镜面形状与哈德曼检验得到的镜面形状有一点小误差，取不同的哈德曼光阑孔形状，误差可以不一样，其原因在于用哈德曼检验得出的结果是每一点镜面的斜率。从图 7 可见，取不同的光阑孔时， A 点与 A' 点的斜率不一致。

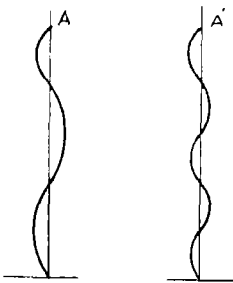


图 7

温教授还简单讲述了第二反射焦点的检查方法。如图 8 所示：1 为双曲面；2 是基本上同心的二个球面。 $F_1、F_2$ 是双曲面 1 的

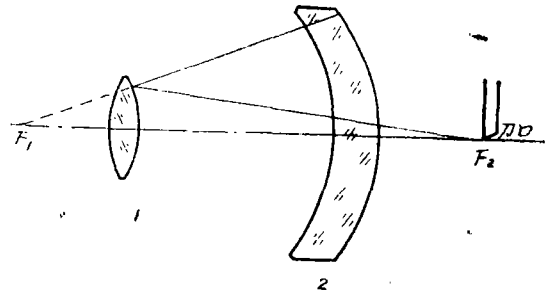


图 8

二个焦点。将刀口放在 F_2 处，可观察双曲面 1 的阴影图。当双曲面存在球差时，可用移动透镜 2，改变焦点位置，来补偿产生的球差，再次进行修磨双曲面 1，直到用刀口观察时得到均匀的阴影图。

对于 RC 系统，次镜并不是严格的双曲面。焦点也不在几何交点上，但偏离量很小，故还可用双曲面方法检验。

9 问：在你进行自动设计的时候，初始结构是怎样选择的？是靠人来选择的呢？还是用机器来选择？是一开始就由人给出一个比较好的初始结构呢？还是先给出一个比较简单的结构，比如几个平板，然后再由电子计算机来选择初始结构？

答：这是一个大的问题。在英国有一句谚语：“如果问题提得不适当的话，那么回答也是不能满意的。”就是说如果你对计算机提出的问题超过了它的解决能力，那么它给你的解答也是不能令你满意的。对于自动设计，我的理解应当是“最优化校正”。下面他举了几个三片和四片透镜的例子，说明为了满足不同的消象差和使用要求，应当怎样选择光学系统的初始结构。如果在这种情况给出的是几个平板的话，那么透镜向什么方向弯曲完全是偶然的。因此，很难得到一个很好的初始结构。我在设计镜头时，总是根据我的经验选择最好的初始结构。对于我过去没有做过的镜头，比如富利叶镜头，我也是尽量按照我的经验选择我认为最好的初始结构。

10 问：自动设计已进入实用化阶段，今后

在自动设计方面还有什么工作可做?

答:我也不知道今后还要做些什么工作。我对编程并不感兴趣,对使用程序和设计新的光学系统感兴趣,以便提高效率,降低成本。大学里使用计算机不用花钱,工业部门使用计算机是要花钱的。因此,在使用计算机时要尽量多动脑筋,进行分析,只有必要时才上计算机计算。

我的自动设计程序已经比较完整,效率也比较高,进一步提高没有多大必要。过去在编写程序时常常发生一些违背边界条件的问题,因此曾对程序作过多次改进。程序每次大的改进之后成为一个新的文本。从60年出来第一个文本,到现在已发展到文本14。现在程序的特点是分成几个标准块,已经积累化,如图9所示。改动时很方便,有新的要求,加一段程序即可。



图 9

我们设计组有一个年轻的女同志,她是学数学的,从60年开始编自动设计程序。她编程序的技术很高,在编程序时挖尽心思,节约机器时间,提高效率,哪怕是提高百分之几。因此,她编的程序效率高,适应性强。

11 问:在英国光学设计方面做那些研究工作?

答:英国开光学设计交流会,由我召集,一年一次。在英国搞光学设计的人总数有40~50人,包括在工业部门工作的,而且多数人在工业部门。主要做一些新系统的设计工作。他们工作的内容和在程序方面小的改动都告诉我。

光学工业英国并不是很大的,市面上出售的望远镜,照相机等光学仪器,在英国不怎么生产,日本产品比英国便宜。这方面中国参加竞争可能更好。主要的新发展还是用

在军事工业方面,我自己并不更多地卷入军事研究中,大学工作设计的光学仪器是公开的,没什么保密的,我用的参考文章都给学生看,这很重要,军事上不能交流,不方便。

新研究工作,主要在帝国理工学院进行,如超声波等,目前有一个课题,一是关于自动设计中直接最优化 OTF ,有个研究生在工作,工作很成功。但用机器时间较多,因此,只在特殊情况下,如真正成像质量高的,或在设计最后阶段用于精细校正,在开始时用几何像差或波像差。当前主要解决用直接优化 OTF 如何减少时间问题;另一是在像面上得到最好成像质量,想法把所有像差校正到零,可获得高调制度的系统;对于有一些用途调制度低些,离焦大些,有意的引入一些像差。对一定的频率标 OTF ,像面质量好时离焦传函曲线如图10中曲线①如果有意识的在最佳焦面降低调制度,使焦深加宽也是有用的,如图中曲线②,总之,所有新的研究工作,都是为某些任务而工作的。

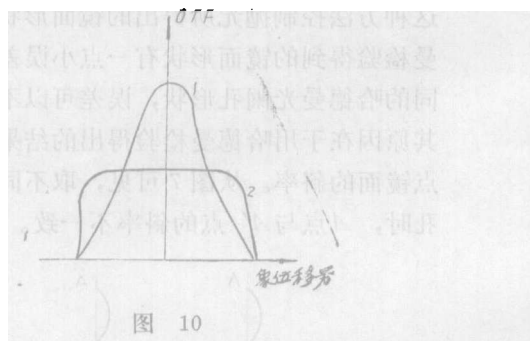


图 10

12 问:国外开展自适应光学工作有什么进展?

答:这个问题,有的,我是不清楚的。

有一个工作,用调节两块反射镜的不同距离,补偿大气抖动的影响,来测量星体的直径。在意大利有一个朋友 *Twiss* 在这方面开展很多工作。

问题的关键在于测量大气抖动的频率。但在大型望远镜上做这方面工作是不容易的。
(下转21页)

可以看出来,尤其是拍摄格子板的话,看得就最明显。将格子板放在50倍焦距的位置,对拍出的底片测出直线的弯度,就可以知道镜头的畸变大小,可以和按物距无限远计算出来的畸变值进行比较。当镜头光栏球差大时,(广角物镜和变焦距物镜的短焦部分往往如此),畸变随物距改变而改变。拍出的片子清晰,但变形大,这多半是设计本身畸变大的原故,和加工装调无关,也无法可想。畸变达到6~8%,只要拍摄的画面不是单调的水平或垂直线条(比如廊柱),造成的变形也是不致引起观众注意的。广角镜头畸变很难校正,常常达到6%左右。使用时加点注意也还是可以的。假若是 r 、 d 、 n 等参数的改变使畸变增大,那么其他象差也当然不好, (S_V 的面分布与 S_I, S_{IV} 有关),拍出的片子

清晰度也不会好。这时清晰度是主要问题,往往不会去注意畸变大小。按照前面讲过的方法,找出象差大的原因并加校正,清晰度好了,畸变也就和设计结果一致了。镜头由于存在偏心组元,也会使畸变改变。甚至几个组元都有不同程度的偏心,它们可能互相补偿了中心彗差(许多镜头就是用调整某个镜片的偏心来补偿其余组元造成的中心彗差以保证视场中心的象质),但是这时仍会产生不对称畸变。不过这种畸变的改变是高级小量,对于畸变要求很严的镜头,比如航测镜头,是应当注意的,但是对于一般摄影物镜就没有多大影响。

以上分析讨论不一定完全正确,提出的诊断方法也不一定最好,仅供大家参考。

(上接第12页)

13 问:对于红外成象系统,如何检查它们的成象质量?

答:锗材料是不透可见光的,现在直径可以做到150mm。由于红外系统不透过可见光,就给成象质量的检查造成了困难。在英国,一般是用一个泰曼干涉仪,产生干涉条纹,这种条纹是比较粗的。例如对 10μ 的波长,用一个变象管把红外辐射转换成紫外光,再把紫外光投射到萤光屏上进行观察,来检查系统的成象情况。

14 问:上午讲到的检查热成象系统的面列阵探测器,一共有多少个单元?几何尺寸怎样?目前面列阵探测器的水平如何?

答:上午讲到的面列阵探测器,是什么元件,记不得了,它有100个单元,每个单元 40μ 大概是硅光二极管吧!

我有一个加里福尼亚的美国朋友,前不久写信告诉我,在他们准备制作的天文,摄谱仪,将采用一个 1200×1200 个单元的面列阵探测器,大约由150万个元件组成,每个元件大小为 $15\mu \times 15\mu$ 。两面贴有玻璃,敏感波长为 $4500 \sim 8000 \text{ \AA}$ 。该探测器要用致冷装置。大概在我回去以后,这台仪器就有消息了。

15 问:对于波长几十 μ 到几百 μ 的情况,你们正在进行那些工作?

答:对于几十 μ 到几百 μ 的波长,须用热探测器探测。帝国理工学院物理系天文光学实验室,在RING教授的领导下,在进行这方面的工作,该实验室有的年轻人工作十分努力,他们很热情,乐于助人,你们有问题可以写信同他们联系。