

太阳多通道双折射滤光器*

王敬山¹, 艾国祥¹, 何凤宝², 邓元勇¹
毛伟军², 宋国峰¹, 张斌¹, 倪厚坤², 章海鹰², 叶祥明¹

1 中国科学院北京天文台 100080

2 中国科学院南京天文仪器研制中心 210042

摘要

太阳多通道望远镜是目前世界上规模最庞大、结构最复杂、功能最强的太阳观测仪器。其核心部分——多通道双折射滤光器, 包括九通道双折射滤光器、太阳全日面磁场滤光器和 $H\alpha$ 精细结构滤光器。它的投入使用, 使得三维(或多层次)太阳矢量磁场和视向速度场的同时测量成为现实, 这在太阳磁场和速度场的测量历史上是一个飞跃。本文分别描述这三台滤光器的光学设计、光谱调试方法及磁场、视向速度场的测量原理。

一. 引言

双折射滤光器在太阳的观测中起着非常重要的作用, 它是一种视面单色器, 利用它可以进行视面的太阳单色像、矢量磁场或视向速度场的观测。目前世界上形形色色的滤光器不下几十台, 包括万能滤光器, 都是单通道滤光器, 只能观测太阳上的一个层次, 不能同时利用不同的谱线来进行多层次的太阳观测。如果能同时在多条谱线上观测, 就可以得到太阳上各种现象的三维演化, 这必然会大大促进太阳物理的进展。多通道双折射滤光器的发明(艾, 胡, 1986a, 1986b, 1987), 就能实现这一目标。九通道双折射滤光器是世界上第一台多通道双折射滤光器, 它的每一个通道都是万能可调的, 谱线可以覆盖从 $3900\text{\AA} \sim 6600\text{\AA}$ 的可见光波段。利用偏振分束器及全反射棱镜, 把一束光分成九束光, 可同时获得九条谱线的信息。全日面双折射滤光器, 可以在二条谱线上工作, 在 5324\AA 线上测量全日面太阳磁场; 在 5576\AA 线上, 可测量全日面视向速度场。 $H\alpha$ 精细结构滤光器可以得到很好的 $H\alpha$ 精细结构资料。该系统共用了光学元件1679片, 见表1, 旋转件及步进电机69个, 恒温探测器多达20只, CCD接收器多达14只。

表1. 多通道滤光器光学元件数量统计

冰洲石	石英	M_gF_2	KD*P	偏振分束器	全反射棱镜	偏振片	干涉滤光片	玻璃
78	496	424	14	21	8	101	14	523
总计: 1679								

* 国家自然科学基金项目

本文在以下几节中分别讨论这三台滤光器的光学设计、调试方法及磁场、速度场的测量原理。

二. 九通道双折射滤光器

2.1 光学设计

九通道双折射滤光器是由头和体组成的多通道双折射滤光器(艾,胡,1987),分为九通道头和九通道体两部分,一束光进入九通道头后,被分成五束光,再进入九通道体,分成九束光出射出来,就得到了九个波长的单色像。(九通道头的光学设计图如图1,九通道体的光学设计图如图2a,2b)。

5172.699Å $\Delta \lambda \sim 0.092\text{Å}$	5247.063Å $\Delta \lambda \sim 0.048\text{Å}$	5250.211Å $\Delta \lambda \sim 0.048\text{Å}$
4685.750Å $\Delta \lambda \sim 0.462\text{Å}$	6302.511Å $\Delta \lambda \sim 0.092\text{Å}$	5576.106Å $\Delta \lambda \sim 0.057\text{Å}$
3968.468Å $\Delta \lambda \sim 2.424\text{Å}$	5875.989Å $\Delta \lambda \sim 0.079\text{Å}$	6562.808Å $\Delta \lambda \sim 0.106\text{Å}$

图3. 九通道滤光器工作波及透过带半宽

每个通道的工作波长及透过带半宽如图3所示,各晶体的设计参数列于表1中。除了5173 Å路,5247 Å路,5250 Å路中各有一个等付利叶系数晶体级外,其它各晶体级都采用Lyot或宽视场Lyot级的设计。每个晶体级中都用了消色差波长调节装置,因此每一个通道都是一台万能可调滤光器。

2.1.1 偏振片的研制

多通道滤光器中共需一百余片偏振片,其偏振度要求大于99.90%,透过率大于42%。我们采用的是美国Polaroid公司生产的HN系列偏振膜,该偏振膜的两边有一种CAB膜(Title,1976)。这种CAB膜起到保护易碎的偏振膜的作用,但是当光线通过时,会产生大量的杂散光。绝大部分的杂散光来源于偏振膜与CAB膜之间的区域,当CAB膜去除后,几乎所有的杂散光都可消除掉。

CAB膜溶于丙酮,丙酮溶液可在8小时内去除CAB膜。当CAB膜完全溶解后,应在清洁的丙酮溶液中清洗几次。然后,用干净毛巾将偏振膜擦洗干净。用两片K9保护玻璃胶合起来,在工作温度下固化,成品的偏振片就做成了。经测试,在可见光波段,其偏振度和透过率都满足我们的要求。

2.1.2 消色差波片的研制

在物理光学仪器中,波片(包括1/2和1/4波片)是个极其重要的光学元件。一般来

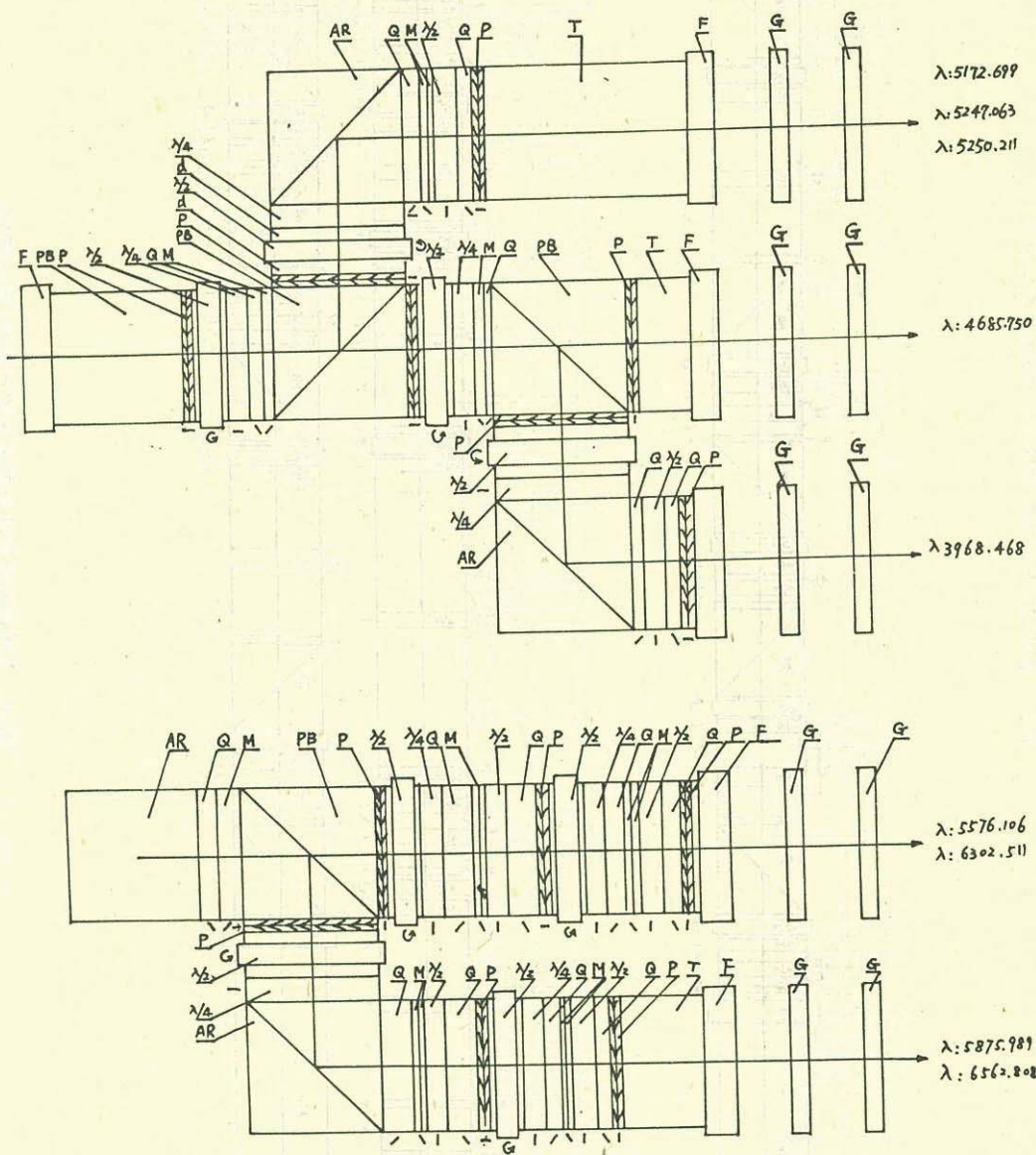


图1. 九通道双折射滤光器头光学示意图

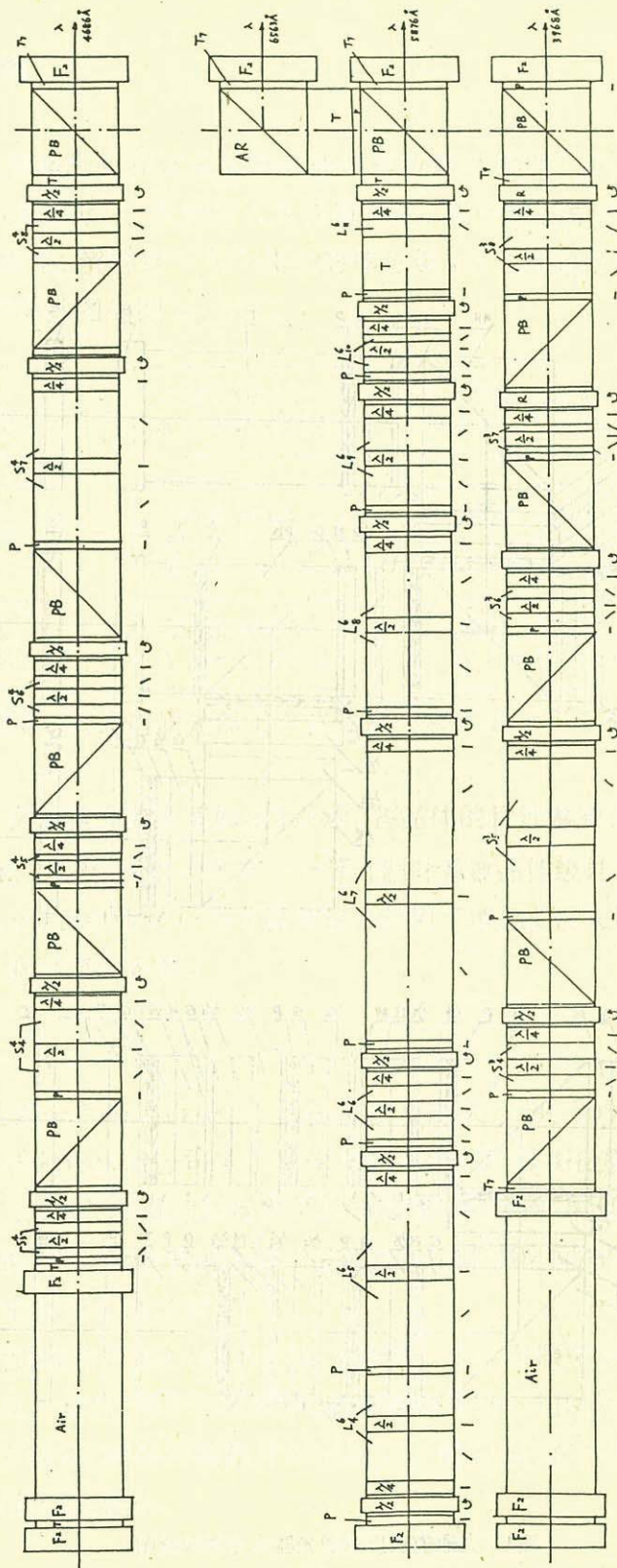


图 2a. 九通道双折射滤光器体光学示意图 (第一部分)

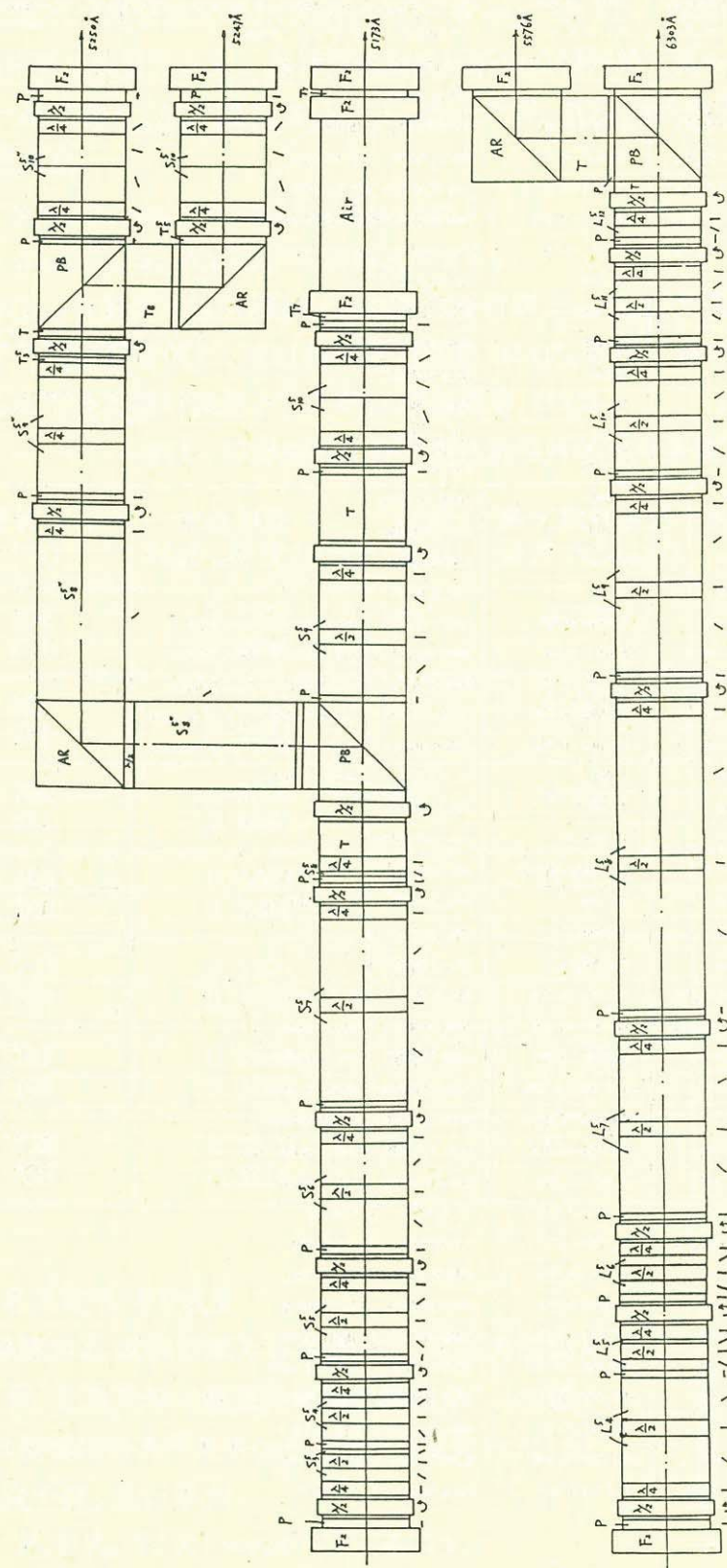


图2b. 九通道双折射滤光器体光学示意图(第二部分)

表2. 九通道滤光器各晶体级设计参数

No.	材料	厚度 (mm)	延迟级数 (Wavelength A)	视场状况	
头	S ₁	Q+M _n F ₂	3.901-0.259	86.03(3968), 71.00(4686), 63.52(5173), 62.52(5247), 62.48(5250)	窄
	S ₂	Q+M _n F ₂	8.8-1.3	127.0(5173), 125.0(5247, 5250)	宽
	S ₃	Q+M _n F ₂	1.86-0.13	43.0(3968), 35.5(4686)	窄
	S ₄	Q	7.17	172.0(3968)	宽
	L ₁	Q+M _n F ₂	-4.593+6.856	70.0(5576), 66.5(5876), 62.0(6303), 59.5(6563)	窄
	L ₂	Q+M _n F ₂	17.414-0.137	288.0(5576), 252.0(6303)	宽
	L ₃	Q+M _n F ₂	10.089-1.047	144.0(5576), 126.0(6303)	宽
	L ₄	Q+M _n F ₂	17.563-0.272	266.0(5876), 236.0(6563)	宽
	L ₅	Q+M _n F ₂	8.781-0.136	133.0(5876), 118.0(6563)	宽
体	S ₅	Q	14.323	344.0(3968)	宽
	S ₆	Q	57.208	1376.0(3968)	宽
	S ₇	C	10.909	5066.0(3968)	宽
	S ₈	C	5.454	2543.0(3968)	宽
	S ₉	Q	28.604	688.0(3968)	宽
	S ₁₀	Q	7.156	142.0(4686)	宽
	S ₁₁	Q	28.622	568.0(4686)	宽
	S ₁₂	C	5.658	21427.0(4686)	宽
	S ₁₃	C	11.314	4293.0(4686)	宽
	S ₁₄	Q	57.245	1136.0(4686)	宽
	S ₁₅	Q	14.32	284.0(4686)	宽
	S ₁₆	C+Q	-4.314+0.228	1462.5(5173), 1438.5(5247), 1437.5(5250)	宽
	S ₁₇	C+Q	-8.656-0.197	2924.5(5173), 2876.5(5247), 2874.5(5250)	宽
	S ₁₈	C+Q	-17.282+0.259	5849.5(5173), 5753.5(5247), 5749.5(5250)	宽
	S ₁₉	C+Q	-34.592-0.135	11698.5(5173), 11506.5(5247), 11498.5(5250)	宽
	S ₂₀	C+Q	-69.184-0.270	23397.0(5173), 23013.0(5247), 22997.0(5250)	宽
	S ₂₁	Q	1.801	32.0(5173), 31.5(5247, 5250)	窄
	S ₂₂	Q	42.891	762.0(5173)	宽
	S ₂₃	Q	14.297×2	254.0×2(5173)	宽
	S ₂₄	C+Q	-138.336+0.1146	46026.5(5247), 45994.5(5250)	宽
	S ₂₅	Q	43.146	754.5(5247), 754.0(5250)	宽
	S ₂₆	Q	14.306×2	250.0×2(5250)	宽
	S ₂₇	Q	14.296×2	250.0×2(5247)	宽
	L ₆	Q+M _n F ₂	35.126-0.544	532.0(5876), 472.0(6563)	宽
	L ₇	Q+M _n F ₂	68.304+0.462	1065.0(5876), 945.0(6563)	宽
	L ₈	C+Q	-14.016-0.118	4095.5(5876), 3619.5(6563)	宽
	L ₉	C+Q	-112.069+0.265	32764.5(5876), 28966.5(6563)	宽
	L ₁₀	C+Q	-56.066-0.473	16382.0(5876), 14478.0(6563)	宽
	L ₁₁	C+Q	-28.033-0.236	8191.0(5876), 7239.0(6563)	宽
	L ₁₂	C+Q	-6.977+0.546	2048.0(5876), 1810.0(6563)	宽
	L ₁₃	Q+M _n F ₂	-3.164+4.106	33.5(5876), 30.0(6563)	窄
	L ₁₄	Q+M _n F ₂	34.828+0.274	576.0(5576), 504.0(6303)	宽
L ₁₅	C+Q	-3.592+0.104	1116.0(5576), 972.0(6303)	宽	
L ₁₆	C+Q	-7.182+0.208	2231.5(5576), 1943.5(6303)	宽	
L ₁₇	C+Q	-57.518+0.534	17851.5(5576), 15547.5(6303)	宽	
L ₁₈	C+Q	-115.093-0.062	35702.5(5576), 31094.5(6303)	宽	
L ₁₉	C+Q	-57.518+0.534	17851.5(5576), 15547.5(6303)	宽	
L ₂₀	C+Q	-28.788-0.298	8925.5(5576), 7773.5(6303)	宽	
L ₂₁	C+Q	-14.365+0.416	4463.0(5576), 3887.0(6303)	宽	
L ₂₂	Q+M _n F ₂	2.177+0.017	36.0(5576), 31.5(6303)	窄	

讲, 它的位相延迟是波长和温度的函数。为了使滤光器在很宽的光谱范围内都适用, 要求波片是消色差的(也就是说, 波片的位相延迟随波长的变化不大)。消色差波片的设计一般分为两大类: 一类是由不同种双折射晶体构成的“晶体波片”, 另一类是由同种材料构成的“组合波片”(Title, 1975; Wang, et al., 1993a)。在多通道滤光器中采用晶体波片的设计方案。晶体消色差波片的构成材料是天然水晶和人造 MgF_2 晶体。若设一晶体波片, 对于波长为 λ_1, λ_2 的光来讲, 其位相延迟为 $n=1/2$ 或 $1/4$, 则有以下方程成立:

$$\mu_Q(\lambda_1)d_Q + \mu_{MgF_2}(\lambda_1)d_{MgF_2} = n\lambda_1 \quad (2.1)$$

$$\mu_Q(\lambda_2)d_Q + \mu_{MgF_2}(\lambda_2)d_{MgF_2} = n\lambda_2 \quad (2.2)$$

其中 μ_Q, μ_{MgF_2} 分别为水晶和 MgF_2 晶体的双折射率, d_Q, d_{MgF_2} 分别为水晶和 MgF_2 的厚度。对于不同的设计波长, 可以得不同的水晶、 MgF_2 厚度。设计参数如表3所示, 实测位相延迟的最大相对误差小于3.0%(邓元勇等, 1993)。

表3. 多通道滤光器中消色差波片的设计参数

设计波长 λ_1, λ_2 (Å)	水晶厚度 MgF_2 厚度 (mm)	位相延迟	最大相对延迟 误差 $\Delta r_{max}/r$	光谱的使用范围 $\Delta \lambda$ (Å)
5576.106 6562.808	0.7962 0.6394	180°	0.0245	~1800
5250.211 6302.511	0.6836 0.5532	180°	0.0056	~1700
4685.750 6302.511	0.5714 0.4660	180°	0.0262	~2200
3968.468 4685.750	0.3666 0.3061	180°	0.0123	~1100
4226.728 6173.339	0.4404 0.3638	180°	0.0157	~1400
5324.182 5576.106	0.5682 0.4630	180°	0.0018	~650
4226.728 6173.339	0.2579 0.2116	90°	0.0157	~2400

2.1.3 消色差波长调节装置

当一厚度为 d , 双折射率为 μ 的晶体 b , 放在两偏振片 P_1 与 P_2 之间, 且其光轴与偏振片的偏振轴成 45° , 如图4所示。那么振幅相同的寻常光(o光)和非寻常光(e光)便会产生偏振干涉, 透过率为:

$$P_1 \parallel P_2: T(\lambda) = \cos^2(\pi \mu d / \lambda),$$

波长 $\lambda = \mu d / n$ 时, $n=1, 2, 3, \dots$, 透过率为极大。

$$P_1 \perp P_2: T(\lambda) = \sin^2(\pi \mu d / \lambda),$$

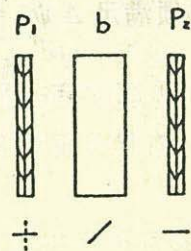


图4. 滤光器的简单级

波长 $\lambda = \mu d / (n + 1/2)$ 时, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, 透过率为极大, 这就是最简单的 Lyot 级结构。

为了能使不同波长的光极大地通过, 可在图 4 中加上波长调节装置。一般来讲, 有以下三种类型 (如图 5 所示):

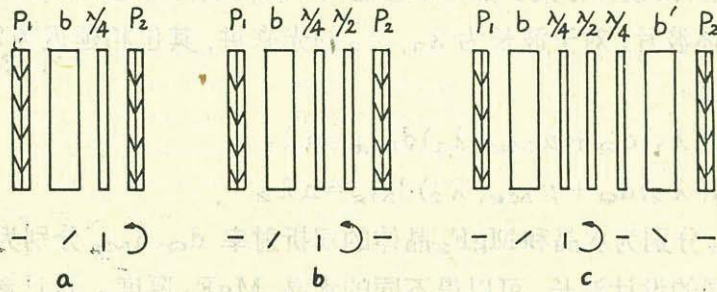


图 5. 三种波长调节装置

① 旋转偏振片型, 图 5(a), 透过率为 $T(\lambda) = \cos^2(\pi \mu d / \lambda + \psi)$, ψ 为偏振片的旋转角度, 其周期为 π ;

② 旋转 $1/2$ 波片型, 图 5(b), 透过率为 $T(\lambda) = \cos^2(\pi \mu d / \lambda + 2\psi)$, ψ 为 $1/2$ 波片的旋转角度, 其周期为 $\pi/2$;

③ 宽视场旋转 $1/2$ 波片型, 图 5(c), 透过率为 $T(\lambda) = \cos^2(\pi \mu d / \lambda + 2\psi)$, ψ 为 $1/2$ 波片的旋转角度, 其周期为 $\pi/2$ 。

如果其中的波片是消色差的, 那么在消色差的光谱范围内, 这一晶体级就是万能可调的, 那么这种波长调节装置, 就是消色差波长调节装置。

以上这三种调节波长的方法对 Lyot 级, Evans 级都适用, 但对等付利叶系数滤光器 (或 Solc 滤光器) 不能适用 (Wang, et al., 1993b)。等付利叶系数滤光器是在两偏振片之间放置数片等厚晶片组成, 相互之间的晶轴成一定规律地排列。只要将每片晶片分成两片 (两片厚度不一定相等!), 在其中间加上 $\lambda/4 +$ 旋转 $\lambda/2 + \lambda/4$ (两 $\lambda/4$ 光轴平行, 并与晶体光轴成 45°), 就得到了等付利叶系数滤光器中的波长调节装置。在九通道滤光器中, 有三级二片型的等付利叶系数级, 其波长调节装置如图 6 所示。当 $\psi_1 - \psi_2 = \alpha_1 - \alpha_2$ 时, 透过率为:

$$T(\lambda) = \{\sin^2 2\alpha_1 \cos[\delta - 2(\psi_1 + \psi_2)] + \cos^2 2\alpha_2\}^2 \quad (2.3)$$

其中 $\delta = \pi \mu (\lambda) d / \lambda$, $\alpha_1 = 62^\circ 38'$, $\alpha_2 = 27^\circ 22'$, ψ_1 和 ψ_2 分别是第一片、第二片旋转 $1/2$ 波片的旋转角度, 其周期为 π 。当等付利叶系数滤光器的透过带移动时, 必须满足 $\Delta \psi_1 = \Delta \psi_2$, $2(\Delta \psi_1 + \Delta \psi_2)$ 就是所移动的位相差。

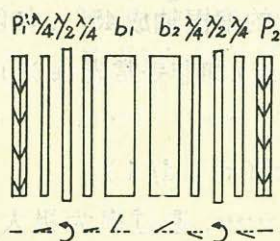


图 6. 等付利叶系数滤光器中波长调节装置

2.1.4 组合级的设计及检测(王敬山, 毛伟军等, 1995)

在九通道滤光器中,有许多晶体级必须使得两个波长或多个波长的光能同时通过。考虑到晶体的双折射率不能精确地确定,这些组合级只能按照以一种晶体为主,再用另一种薄晶体(两片薄晶片相减)来补偿的原理设计的,薄晶体的延迟级数很小,通过改变其厚度,就能使得整个晶体级的延迟级数为整数或半整数。

组合级有两类,一种是水晶(厚)+MgF₂(薄),另一类是冰洲石(厚)+水晶(薄)。当将两种晶体抛光好后,用两种光(波长为 λ_1 和 λ_2)来检测,得到的延迟为 N_1+n_1 和 N_2+n_2 (其中 N_1, N_2 为整数或半整数, n_1, n_2 为小数)。因为每个晶体级中都有消色差的波长调节装置,只要改变薄晶体的厚度 Δd_2 ,使整个晶体级延迟级数的尾数(小数)在两个波长上相等即可,亦即,

$$n_1 - \Delta n_1 = n_2 - \Delta n_2 \quad (2.4)$$

其中 $\Delta n_i = \mu_2(\lambda_i) \Delta d_2 / \lambda_i, i=1, 2$,

则可得

$$\Delta d_2 = \frac{(n_2 - n_1) \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 \mu_2(\lambda_2) - \lambda_2 \mu_2(\lambda_1)} \quad (2.5)$$

也就是说,只要将 d_2 减薄 Δd_2 ,那么这一组合级就满足要求了。

2.1.5 可调双折射滤光器中晶轴方向排列的确定

在多通道双折射滤光器中的每一个晶体级中,都采用了消色差波长调节装置,因此,每一个通道都是一个万能可调的滤光器。从历史上看,在滤光器的设计、装配和调试中,最困扰人们且最易出错的,就是晶体、波片等元件的晶轴方向排列问题。多通道滤光器包含的晶体元件多达千片,可调级近百个,如果元件的晶轴方向的排列出现一点问题,就会造成极大的困难,因此对元件的晶轴方向排列的规律进行了普遍的探讨。在多通道滤光器的研制过程中,我们找到滤光器的三个普遍规律(王敬山等, 1991):

(1) 透过带的调节方向(红移或紫移)与晶体级中偏振片的取向无关。

(2) 旋转等效性:以光线传播方向为旋转轴,将光路中的各个元件旋转任意相同的角度,光路的状态都是等效的。

(3) 可逆等效性:入射光的传播方向不变,而使整个光路倒转180°,则与倒转前的光路状态等效。

基于以上三个规律,我们得到了“符号相乘法则”:1/4波片与和它靠近的双折射晶体快轴间的方位角、1/2波片的旋转角、位相差的变化,三者的正负号遵从符号相乘规则,见表4。

根据“符号相乘法则”,可以统一地确定晶轴方向的排列,使得当所有旋转1/2波片向某一个方向旋转时,各晶体级的波带统一地向同一方向移动(红移或紫移),这在滤光器的光谱调试、透过波带的移动等方面,非常方便。在九通道滤光器中,旋转

1/2波片是由步进电机来驱动的,我们约定当电机走“+”步时,各晶体级的透过波带向长波方向移动(红移),当电机走“-”时,各透过波带向短波方向移动(紫移)。我们就是按照这一约定,并根据“符号相乘法则”来确定九通道滤光器中晶轴方向的排列的。

表4. 波长调节方向与各元件方向排列之间的关系

$\lambda/4$ 与其靠近的晶体快轴间的方位角	$\lambda/2$ 的旋转角	位相差的变化	波带调节方向
+	+	+	红移
+	-	-	紫移
-	+	-	紫移
-	-	+	红移

2.1.6 九通道滤光器的透过率

对于4686Å, 3968Å, 6303Å(5576Å), 6563Å(5876Å)路, 透过率公式:

$$T(\lambda) = \prod_{i=1}^N \cos^2 \left[\frac{\mu_i(\lambda)d_i}{\lambda} + 2\psi_i \right] \quad (2.6)$$

其中 ψ_i 是波长调节装置中旋转1/2波片的旋转角度, 4686Å: N=8, 3968Å: N=5, 6303Å: N=12, 6563Å: N=11。

对于5173Å, 5247Å, 5250Å三个通道, 透过率公式:

$$T(\lambda) = \left\{ \prod_{i=3}^N \cos^2 \left[\frac{\mu_i(\lambda)d_i}{\lambda} + 2\psi_i \right] \right\} \cdot \left\{ \sin^2 2\alpha_1 \cos^2 \left[\frac{\mu(\lambda)d}{\lambda} + 2(\varphi_1 + \varphi_2) \right] + \cos^2 2\alpha_2 \right\}^2 \cdot \left\{ \prod_{j=1}^3 \cos^2 \left[\frac{\mu_j(\lambda)d_j}{\lambda} + 2\psi_j \right] \right\} \quad (2.7)$$

对于5173Å: N=10, 5247Å和5250Å: N=11。

2.1.7 宽视场KD*P调制器

KD*P调制器作为磁分析器,是双折射滤光器中非常重要的组成部分。当加上方波交流电压时,它是 $\pm 1/4$ 波片。这种设计方案如图7示,两块KD*P晶体分别加正、负电压,使其成为 $+\lambda/8$ 和 $-\lambda/8$,中间为一消色差 $\lambda/2$,这样便可得到 $+$ 或 $-\lambda/4$,然而KD*P晶体的厚度不能太厚(小于1.5mm),否则会有较大的位相延迟误差。但把KD*P晶体加工得很薄是很困难的。为此又设计了另一种宽视场KD*P调制器(如图8)。第一和第四块KD*P厚度为2.34mm,各加正负电压,成为 $\pm \lambda/4$;第二和第三块KD*P厚度为1.63mm,各加正负电压,成为 $+\lambda/8$,这样位相延迟的相对误差可控制在3.0%以内。

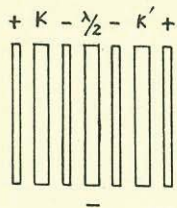


图7. 宽视场KD*P调制器

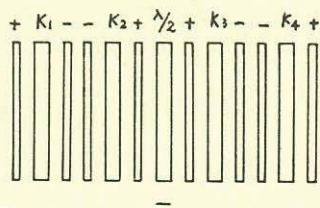


图8. 宽视场KD*P调制器的另一种设计

2.2 滤光器的光谱调试方法及部分结果

为了使滤光器每个通道的透过带确切地在某一Fraunhofer线上, 必须先光谱仪中进行光谱调试。首先在CCD监视器上找到某一太阳谱线, 记下该谱线在监视器上的位置, 然后把滤光器放置在狭缝前面。转动这一通道的所有步进电机, 使各晶体级的透过极大轮廓在相同的位置上, 再通过计算离太阳谱线的距离, 把透过带逐步移到太阳谱线的线心, 这样可得到滤光器在每个太阳谱线附近的透过带轮廓, 这种方法的光谱精度可达到 $0.01\text{\AA} \sim 0.02\text{\AA}$ 。旋转 $\lambda/2$ 旋转一周, 步进电机的步数为43200步, Lyot级旋转 $\lambda/2$ 的周期为 $10800(\pi/2)$ 步。对于等付里叶系数晶体级, 旋转 $\lambda/2$ 的周期为 $21600(\pi)$ 。如图9a, b, c, d, e, f, g, h所示, 是用微机采下来的谱线轮廓, 由于滤光器的光谱分辨率很高(大部分通道透过带半宽 $\sim 0.05\text{\AA}$ 左右), 透过率较低, 致使噪音过大。另外, CCD对某些谱线(特别是靠近紫区的谱线)灵敏度太低(宋国峰等, 鉴定报告), 也使信噪比降低。九通道滤光器的透过率见表5(不加干涉滤光片)。

表5. 九通道滤光器各通道的透过率

波长	6562.808	6302.511	5875.989	5576.106	5250.211 5247.063	5173.699	4686.750	3968.468
透过率%	~ 7.0	~ 6.0	~ 5.5	~ 5.0	~ 3.0	~ 6.0	~ 12.0	~ 20.0

将滤光器放入望远镜后, 还需用光电倍增管细调。光电倍增管作为接收器, 调动每个通道的所有电机, 使滤光器的光亮达到极小, 这样就把每个通道的透过带都调到了太阳谱线的线心, 这样达到的精度高于千分之五。

2.3 磁场的测量方法及部分结果

将KD*P调制器放在滤光器的最前端。加上方波电压时, 它是正 $1/4$ 波片($+45^\circ$)或负 $1/4$ 波片(-45°), 左旋光或右旋光通过它后, 便变成线偏振光。因为滤光器的最前面是一偏振片, 所以当KD*P调制时, 总是只有一种圆偏振光(左旋或右旋)被允许通过。根据塞曼效应, 纵向磁场使谱线分裂成左旋和右旋圆偏振光, 这两种波长相差 $\Delta\lambda_H$ 。当KD*P上的电压为正时, 只有左旋

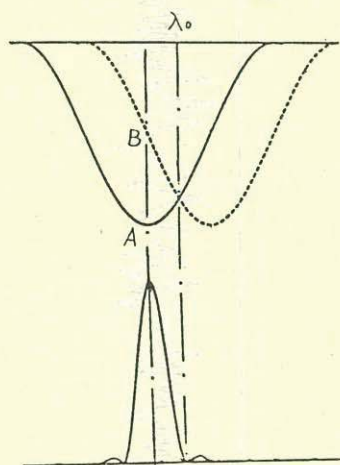


图10. 九通道滤光器测量纵向磁场原理示意图

Relative Intensity

2266

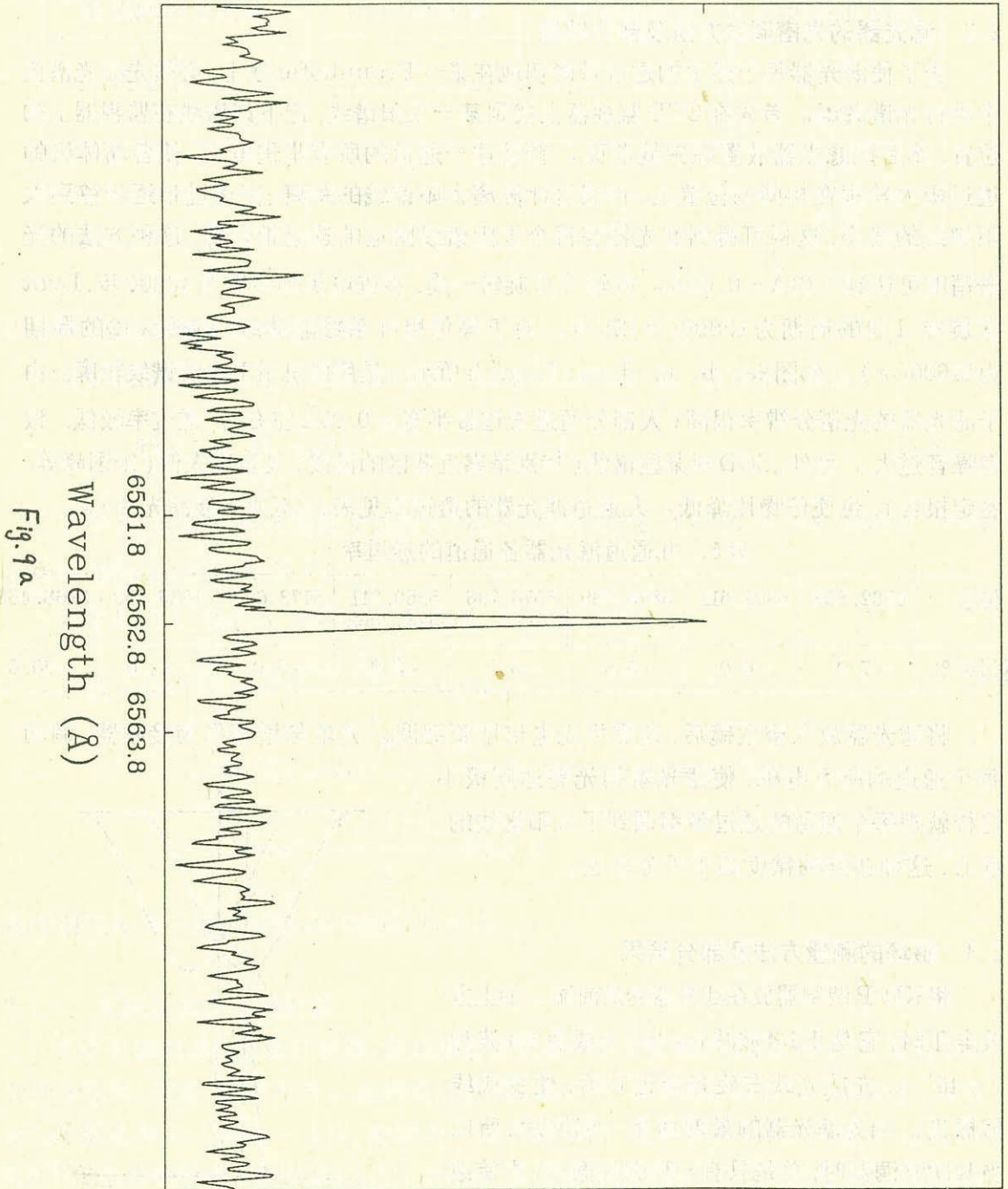
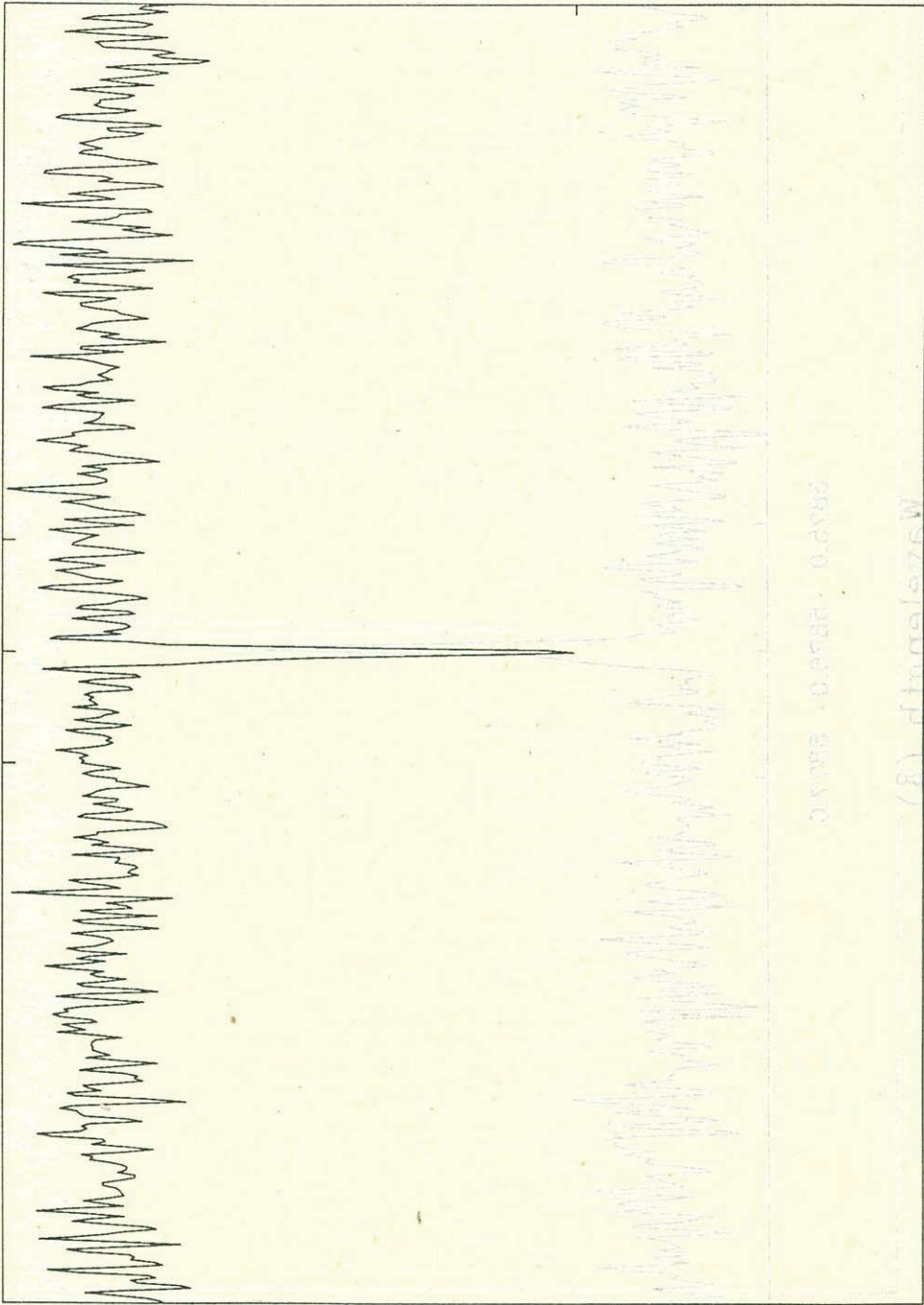


Fig. 9a

Relative Intensity

1550



Wavelength (Å)

6301.5 6302.5 6303.5

Fig. 9 b

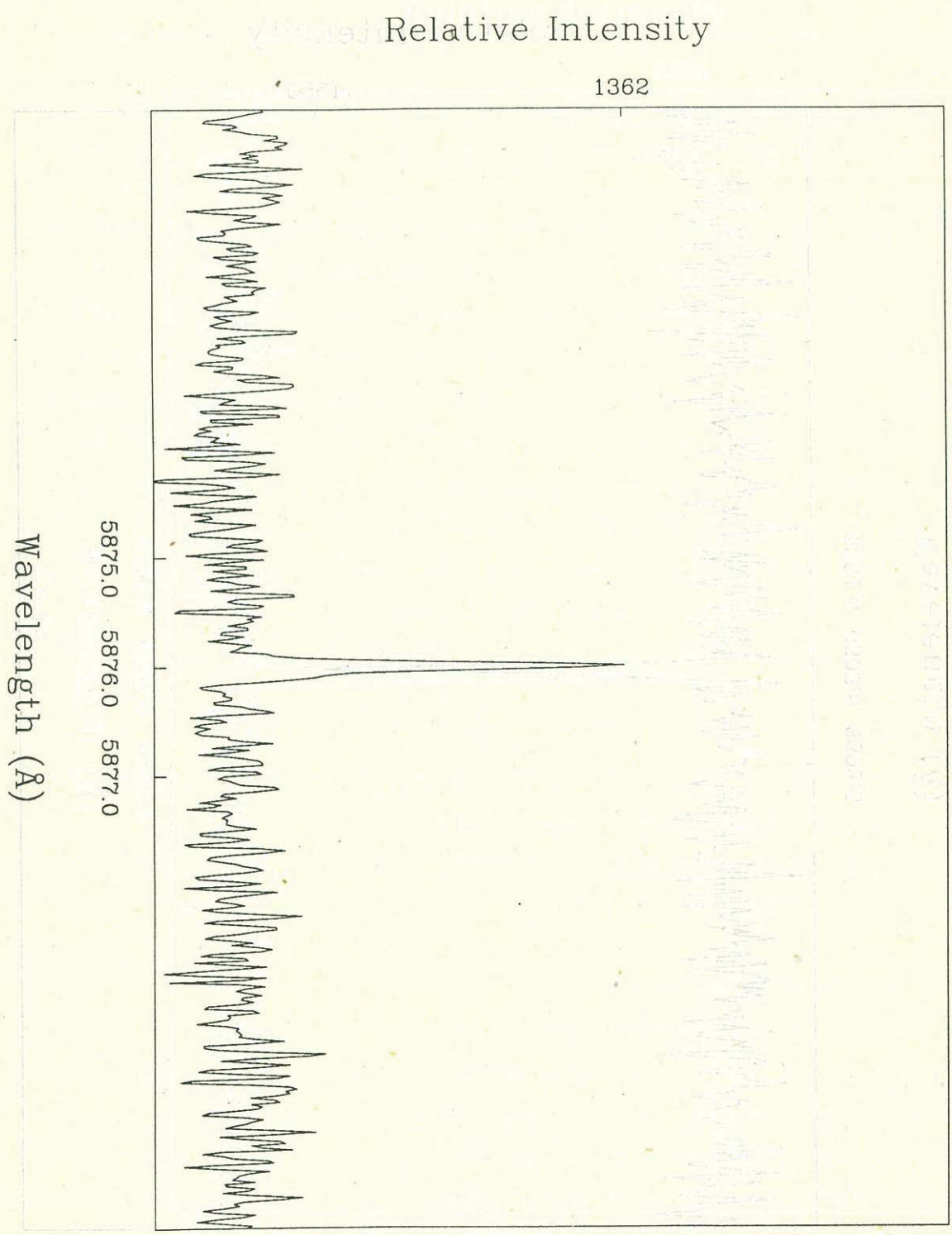
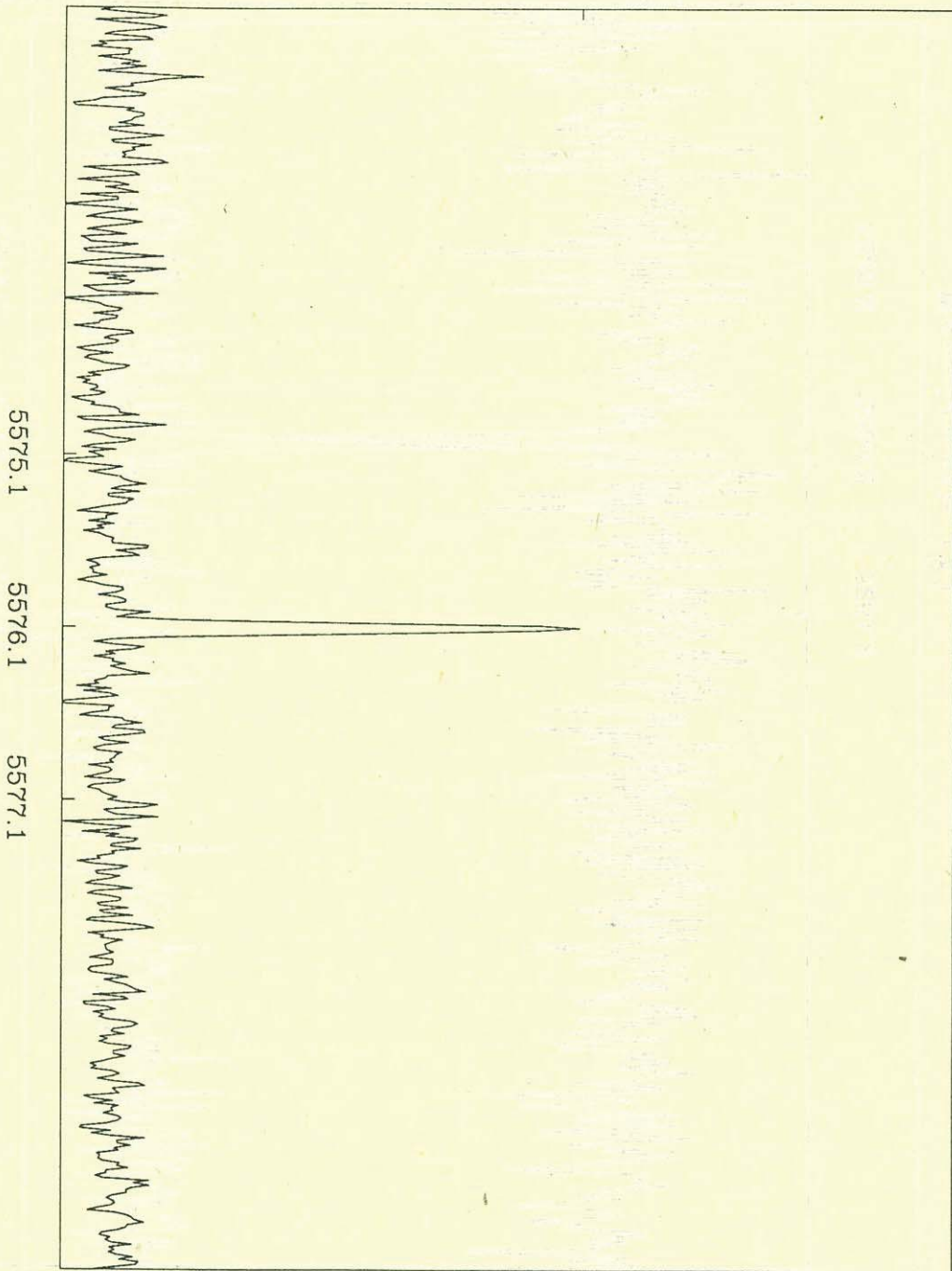


Fig. 9c

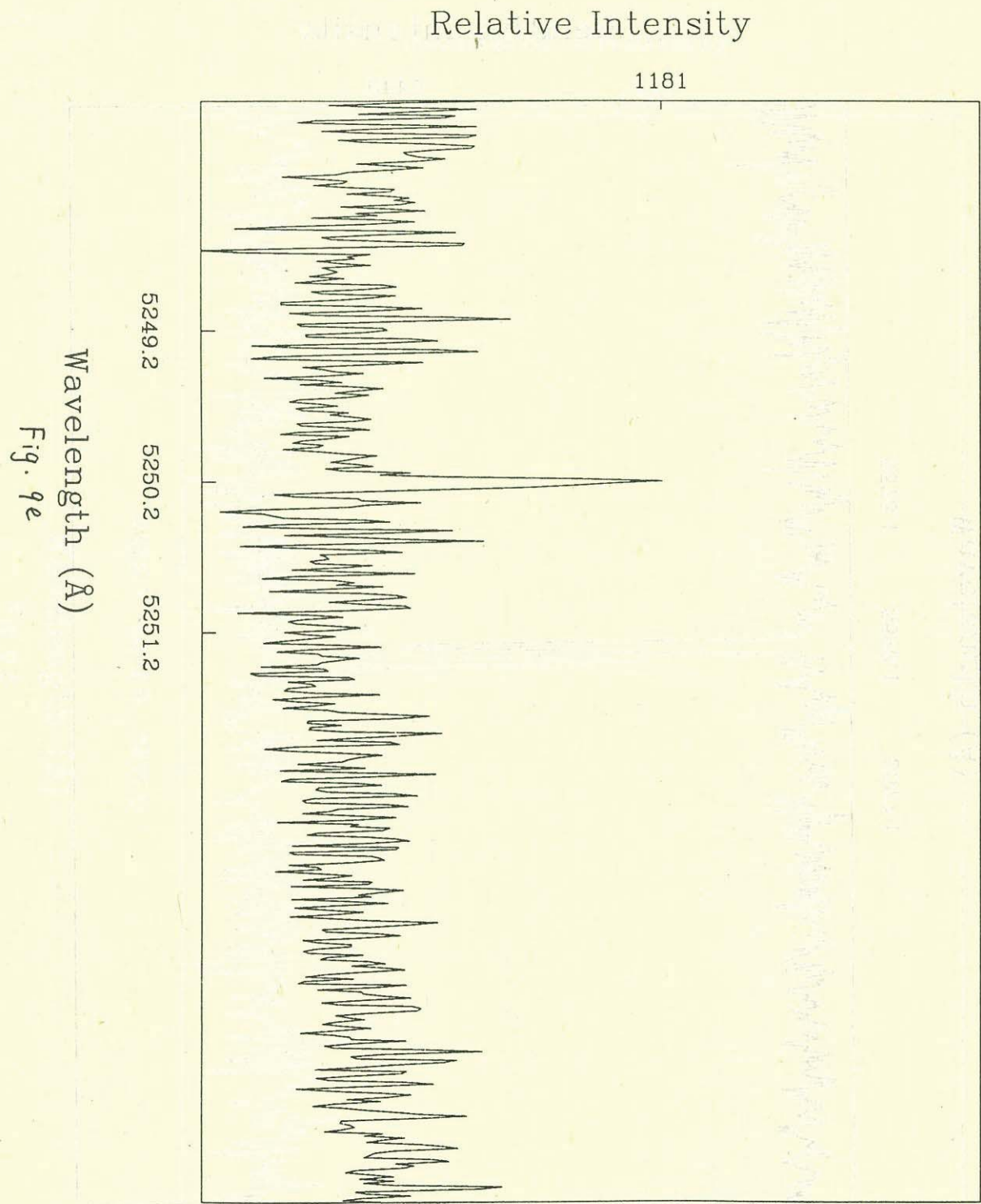
Relative Intensity

1448



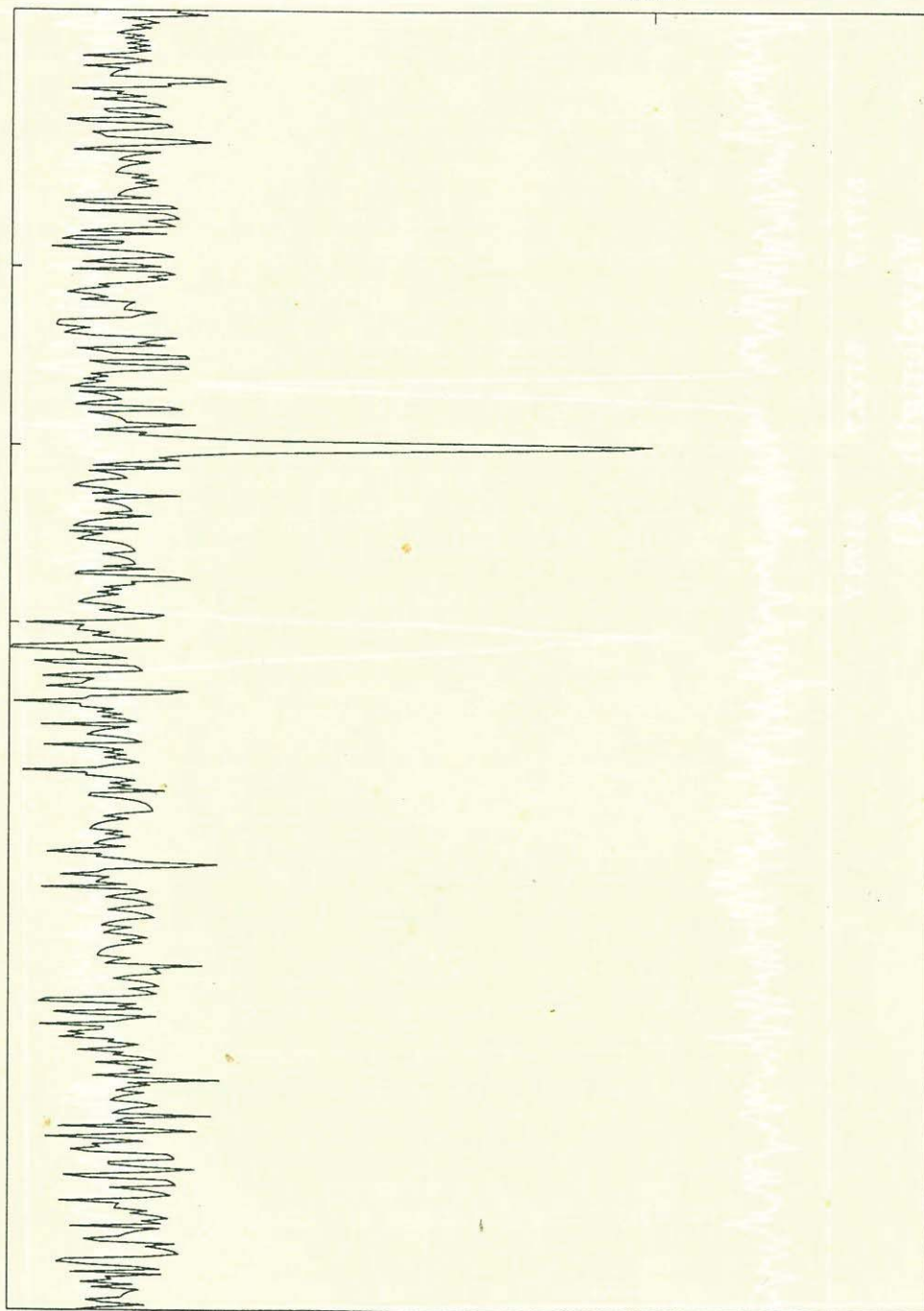
Wavelength (Å)

Fig. 9d



Relative Intensity

2437



Wavelength (Å)

5246.0

5247.0

5248.0

Fig. 9f

Relative Intensity

2740

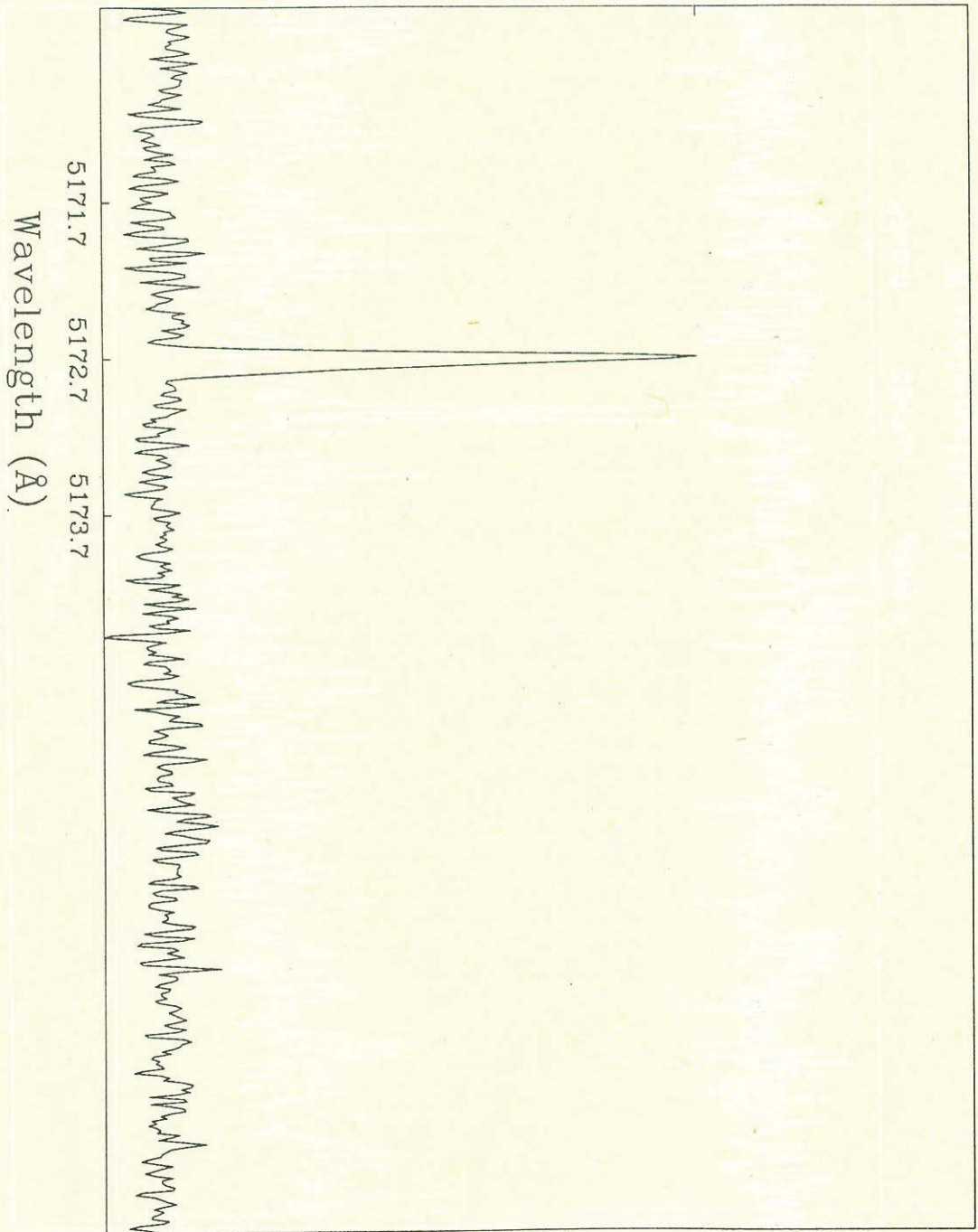
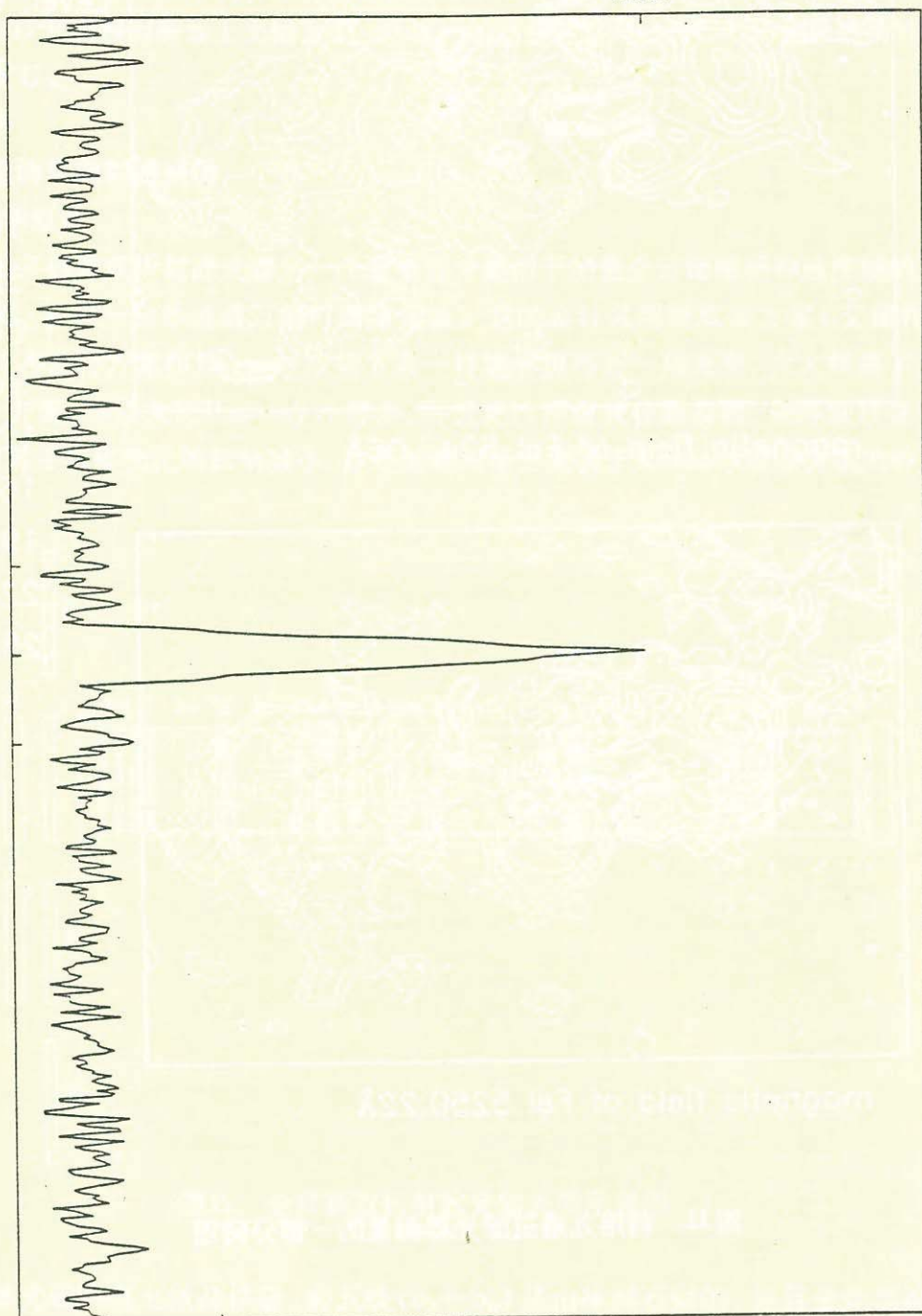


Fig. 99

Relative Intensity

2430

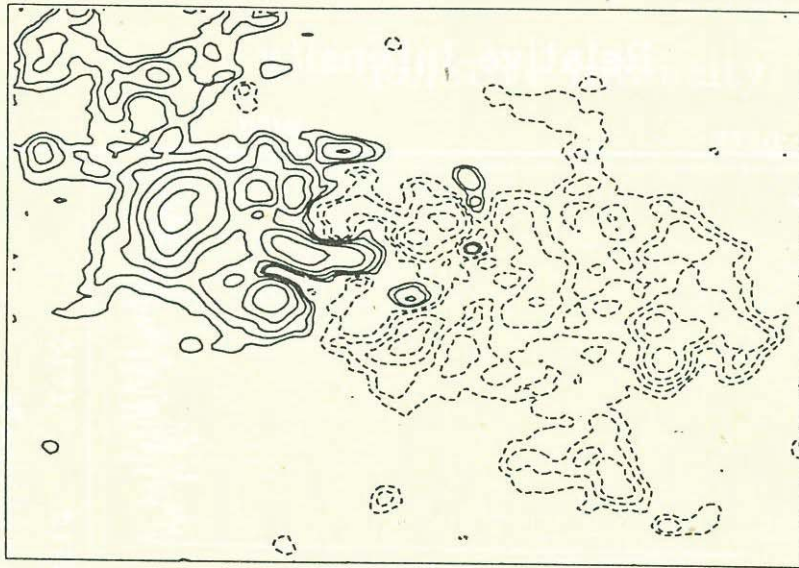


4684.7 4685.7 4686.7

Wavelength (Å)

Fig. 9h

02:41, May-15, 1995



magnetic field of Fe I 5247.06 Å

Level: Gauss

20

40

80

160

320

640

960

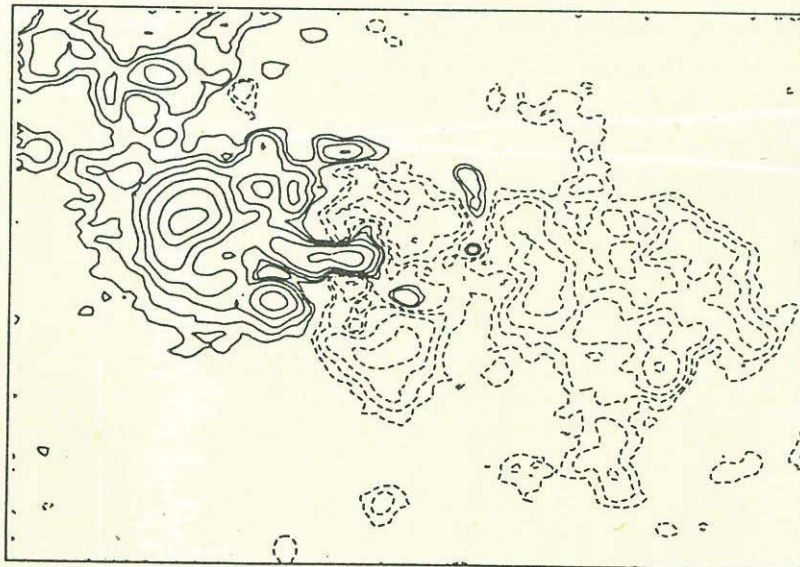
1280

1600

1920

2240

2560



magnetic field of Fe I 5250.22 Å

图 11. 利用九通道滤光器测量的一部分磁图

光被通过, CCD接收的光强度为 I_A ; 当 KD^*P 上的电压为负时, 只有右旋光通过, CCD接收的光强度为 I_B (如图10), 那么光强差为:

$$\Delta I = I_B - I_A$$

当 $\Delta \lambda_H = 0$ 时, $\Delta I = 0$

当 $\Delta \lambda_H \neq 0$ 时, $\Delta I \propto \Delta \lambda_H \propto H$

因而可得到磁场强度 $H(x, y)$ 。如图11, 是利用九通道双折射滤光器得到的纵向磁图。

当 KD^*P 调制器前加上光轴为 0° 或 45° 的消色差 $1/4$ 波片时, 可以测得磁场的横向分量 Q 或 U 。

三. 全日面双折射滤光器

3.1 光学设计

太阳多通道双折射滤光器另一个重要部分是为了测量全日面磁场和速度场的双折射滤光器, 它是一台单通道万能可调滤光器。它的设计采用新双带方案 (艾国祥等, 1990), 这种设计方案和 Ramsey 双带方案一样能够提高近一倍光亮, 大大提高了灵敏度; 另一方面, 次极大比 Ramsey 小得多, 并且把次厚级放在最前面, 最厚级放在中间部分, 使其受温度变化的影响减小, 这也是新双带方案优于 Ramsey 双带方案的特点之一。

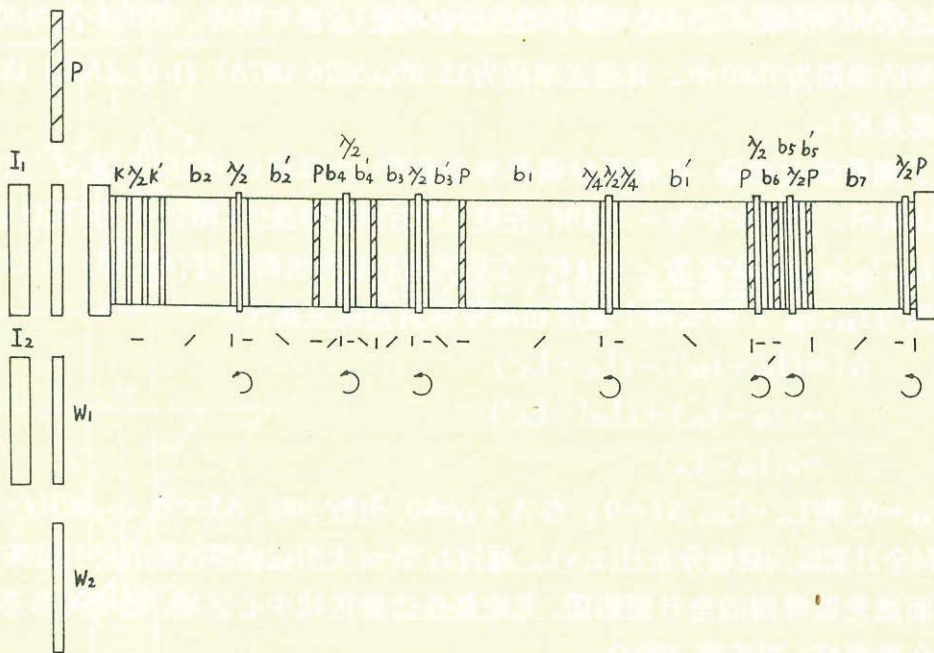


图12. 全日面双折射滤光器光学示意图

该滤光器共有七级晶体级, 前五级 ($b_1 \sim b_5$) 是由冰洲石做的, 并且全是宽视场, b_6 是冰洲石做的, b_7 是天然水晶做的, 这两级是窄视场的。每一级都用了消色差波长调节装置, 因此滤光器是万能可调的, 其光学示意图如图12所示。每一级晶体的设计参数列于表6中。

该滤光器的透过率公式为：

$$T(\lambda) = \prod_{i=1}^7 \cos^2\left(\frac{\mu_i(\lambda)d_i}{\lambda} \pi + 2\psi_i\right) \quad (3.1)$$

其中 ψ_i 是每个旋转1/2波片的旋转角度。

表6. 全日面滤光器晶体元件的设计参数

	材料	晶体厚度(mm)	视场状况
第1级	冰洲石	25.8352 × 2	宽视场
第2级	冰洲石	17.9176 × 2	宽视场
第3级	冰洲石	8.9588 × 2	宽视场
第4级	冰洲石	4.4794 × 2	宽视场
第5级	冰洲石	2.2393 × 2	宽视场
第6级	冰洲石	2.9393	窄视场
第7级	石英	21.940	窄视场

3.2 光谱调试方法及磁场、速度场的测量原理

和2.2中讨论的方法相同,把该滤光器调到5324.185Å及5576.097Å的线心,记下七个步进电机的步数。这一滤光器中的步进电机使1/2波片旋转一周的步数为30240步,但透过带的周期为7560步。其透过率约为12.0%(5576.097Å),11.0%(5324.185Å)(未加干涉滤光片)。

为了测量纵向磁场,把最厚级调开半个波带,次厚级调开1/4个波带,其波带状况如图13所示。当KD*P为+λ/4时,左旋光和右旋光都通过(图13c),在CCD上得到的光强为 I_A, I_A' ;当KD*P为-λ/4时,左旋光和右旋光也都通过(图13d),在CCD上得到的光强为 I_B, I_B' 。那么两个强度相减可得到光强关系式:

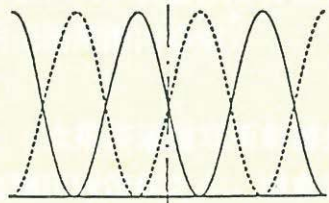
$$\begin{aligned} \Delta I &= (I_B + I_B') - (I_A + I_A') \\ &= (I_B - I_A) + (I_B' - I_A') \\ &= 2(I_B - I_A) \end{aligned}$$

当 $\Delta\lambda_H=0$,则 $I_A=I_B$, $\Delta I=0$ 。当 $\Delta\lambda_H \neq 0$,但较小时, $\Delta I \propto \Delta\lambda_H \propto H(x,y)$,因而可得到全日面纵向磁场分布 $H(x,y)$ 。通过与35cm太阳磁场望远镜的观测结果相比较,用全日面滤光器得到的全日面磁图,无论是在边缘区域中心区域,磁场的形态和强度彼此吻合得很好(刘扬等,1994)。

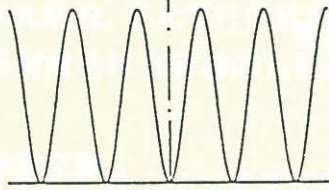
为了测量太阳视向速度场,需把最厚级调开半个波带,而次厚级不动,KD*P前加一偏振片。当KD*P加电压后,成为±λ/4,相当于次厚级的位相延迟加上1/4或减去1/4,滤光器透过带左右跳动(图14)。当KD*P加正电压时,测得光强度为 I_A ,当KD*P为负电压时,测得光强度为 I_B ,光强差为 $\Delta I = I_A - I_B$ 。

若 $\Delta\lambda_V=0$,则 $\Delta I=0$

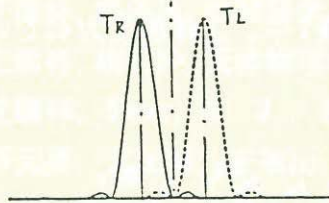
若 $\Delta\lambda_V \neq 0$,但很小时, $\Delta I \propto \Delta\lambda_V \propto V(x,y)$ 可以得到速度图 $V(x,y)$ 。



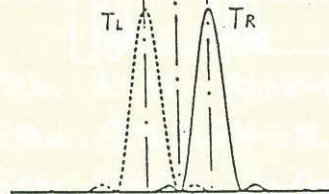
a. $KD \cdot P$ 为 $\pm \lambda/4$ 时, 次厚级波带轮廓



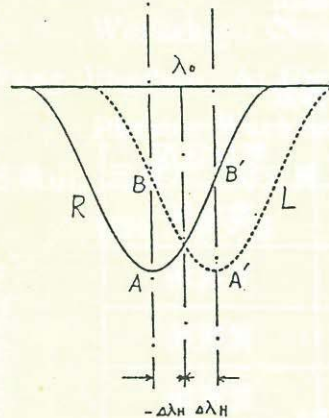
b. 最厚级波带轮廓



c. $KD \cdot P$ 为 $+\lambda/4$ 时, 滤光器透过带轮廓



d. $KD \cdot P$ 为 $-\lambda/4$ 时, 滤光器透过带轮廓



e. 当塞曼分裂为 $\Delta \lambda_H$ 时, 滤光器测量的光强差

图13. 全日面磁场测量原理示意图

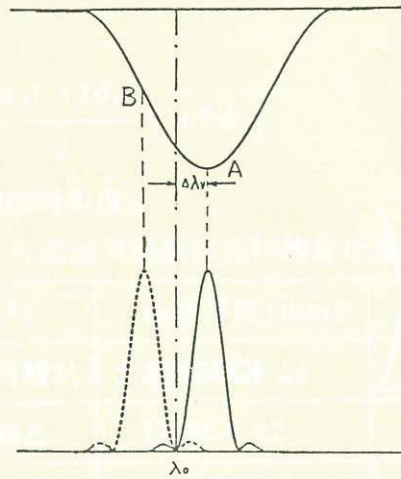


图14. 全日面速度场测量原理图

四. H α 精细结构滤光器

该滤光器是用于观察太阳H α 精细结构的,其透过带半宽为0.5Å,其透过率约为9.0%。共有七个晶体级,都是消色差可调级。其中前五级是冰洲石级,第六、七级是水晶级。其光学示意图如图15所示,晶体设计参数列于表7中。工作温度为42℃。其透过波带在 $\pm 32\text{Å}$ 范围内是可调的。

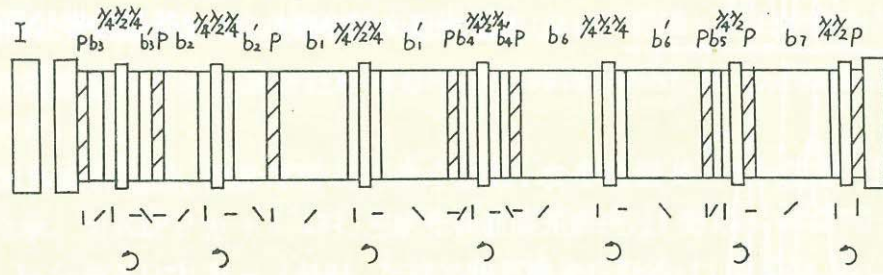


图15. H α 双折射滤光器光学示意图

表7. H α 滤光器晶体元件设计参数

	材料	晶体厚度(mm)	视场状况
第1级	冰洲石	11.456 × 2	宽视场
第2级	冰洲石	5.728 × 2	宽视场
第3级	冰洲石	2.864 × 2	宽视场
第4级	冰洲石	1.432 × 2	宽视场
第5级	冰洲石	1.434	窄视场
第6级	石英	13.480 × 2	宽视场
第7级	石英	13.480	窄视场

此滤光器的光谱调试也是按照2.2节中的方法,先用CCD在光谱仪下将滤光器的透过带调到H α 线上,再在望远镜上用光电倍增管将其透过带调至线心。因为每一级中的波长调节装置都是消色差的(光谱使用范围4500Å~7000Å),滤光器轮廓可以在很大的光谱范围内移动。

太阳多通道双折射滤光器是一台规模庞大、结构极为复杂的天文光学仪器,研制过程历时四年之久。南京天文仪器研制中心光学车间晶体组的师傅们,长期加班加点,付出了艰辛劳动;北京长城光学仪器厂的黄善书高级工程师,为该仪器提供了低折射率光敏胶,在光学件的胶合方面取得很好的效果。作者对他(她)们及所有为该仪器的研制成功付出劳动的人们,表示诚挚的谢意。

参考文献

- 艾国祥,胡岳风,中国科学A, 8 (1986a) 889
艾国祥,胡岳风,中国科学A, 9 (1986b) 987
艾国祥,胡岳风,天体物理学报, 7 (1987) 305
艾国祥, Fear, R. J., 汲培文, 天体物理学报, 10 (1990) 180
邓元勇, 艾国祥, 王敬山, 天体物理学报, 13 (1993) 283
刘扬, 宋国峰, 王敬山, 汪景秀, 天体物理学报, 14 (1994) 191
宋国峰, 邓元勇, 王敬山, 艾国祥, 张斌, 多通道滤光器的光量测量及CCD的选配, 1995, 本文集
Title, A. M., Applied Optics, 1975, 14, 229
王敬山, 艾国祥, 邓元勇, 天体物理学报, 11 (1991) 383
Wang Jingshan, Ai Guoxiang, Proceedings of Chongqing Solar Physics Workshop, Chongqing, China (1993a) 225
Wang Jingshan, Ai Guoxiang, Song Guofeng, Proceedings of Chongqing Solar Physics Workshop, Chongqing, China (1993b) 220
王敬山, 毛伟军, 邓元勇, 艾国祥, 九通道双折射滤光器中组合晶体级的检测方法, 1995, 本文集

Solar Multichannel Birefringent Filter

Jingshan Wang¹, Guoxiang Ai¹, Fengbao He², Yuanyong Deng¹

Weijun Mao², Guofeng Song¹, Houkun Ni², Haiying Zhang², Bin Zhang¹, Xiangming Ye¹

1. Beijing Astro. Obs., Beijing 100080

2. Nanjing Astro. Insitute Center, Nanjing 210042

Abstract. Solar Multichannel Birefringent Filter (SMBF) is the first instrument in the world which can observe solar chromatic images, and measure vector magnetic fields and/or line-of-sight velocity fields simultaneously. It includes 9-channel birefringent filter, full-disc solar magnetic filter and $H\alpha$ birefringent filter. This article will describe the optical design, spectral test method and the measuring principles of magnetic field and line-of-sight field.