

基于原子滤光器 太阳速度场望远镜进展



武汉大学



中科院武汉物理与数学研究所



中国科学院国家天文台

报告人：张志勇

1. 项目背景

项目由武汉大学、武汉物数所和国家天文台共同承担

1. 武汉大学，测绘遥感信息工程国家重点实验室

——光电探测系统集成、太阳观测信号分析处理

2. 中国科学院武汉物理与数学研究所，波谱与原子分子国家重点实验室

——原子滤光器技术与应用

3. 中国科学院国家天文台，怀柔太阳观测基地

——光学系统设计系统集成，数据采集与数据分析处理

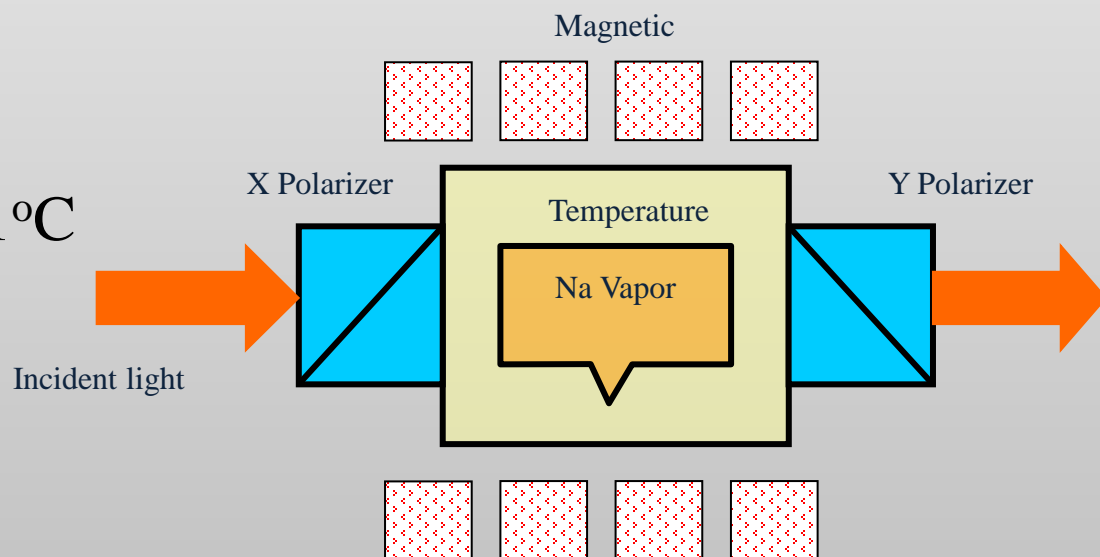
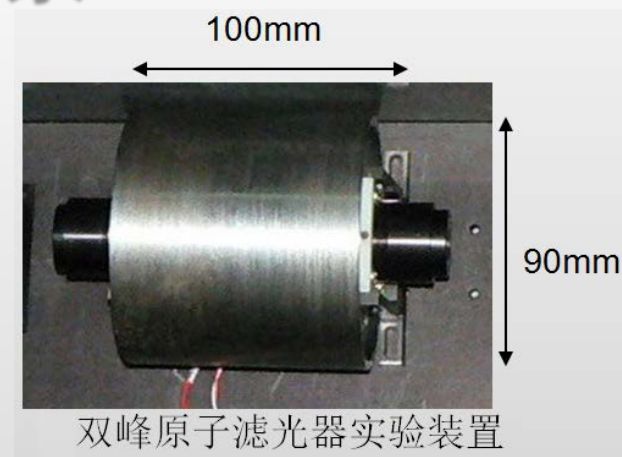
2. 原子滤光器原理及应用前景

2.1 原子滤光器原理:

- 塞曼子能级间电偶极跃迁
- 共振法拉第效应

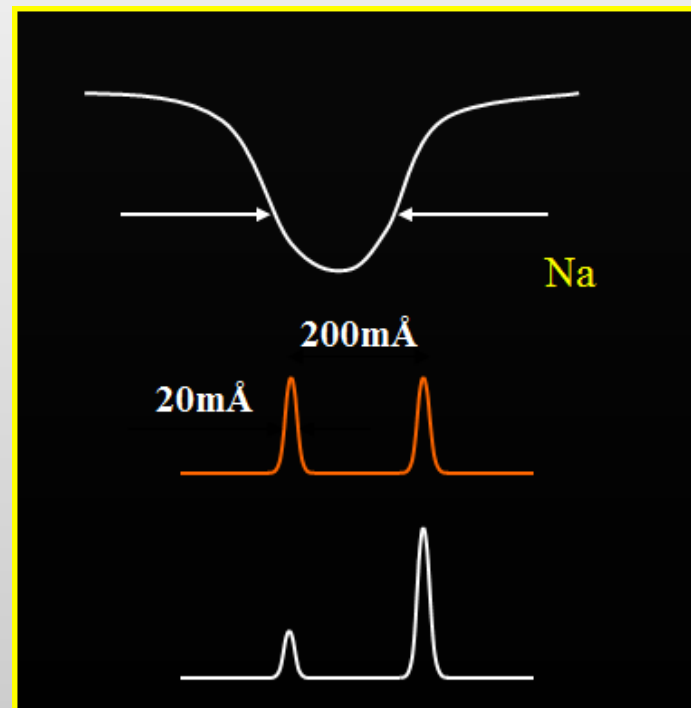
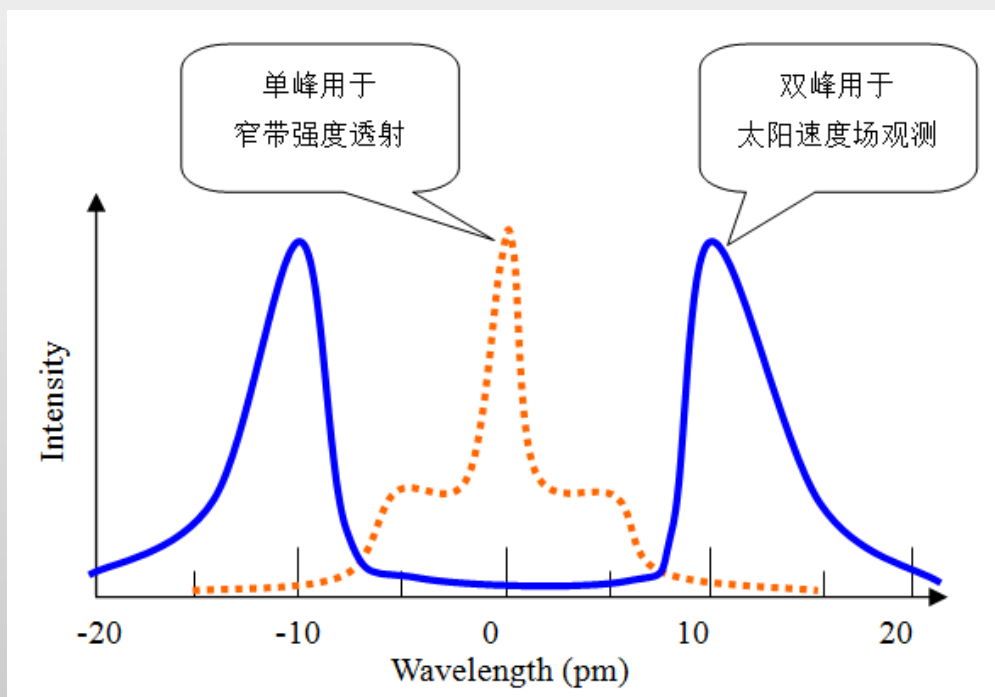
2.2 原子滤光器结构:

- 磁场, 0.05~0.3T
- 恒温, $100\sim 250\pm 1^\circ\text{C}$
- 原子泡
- 正交偏振棱镜



2. 原子滤光器原理及应用前景

2.3 大间距双峰原子滤光器（Double Edge Tech）：



双峰透过特性可以进行太阳速度场测量

2. 原子滤光器原理及应用前景

2.4 原子滤光器优势：

基于原子跃迁严格稳定的频率关系，使滤光带宽极窄、滤光频率稳定！

现已实现：Na（589.6 nm），K（770 nm）；

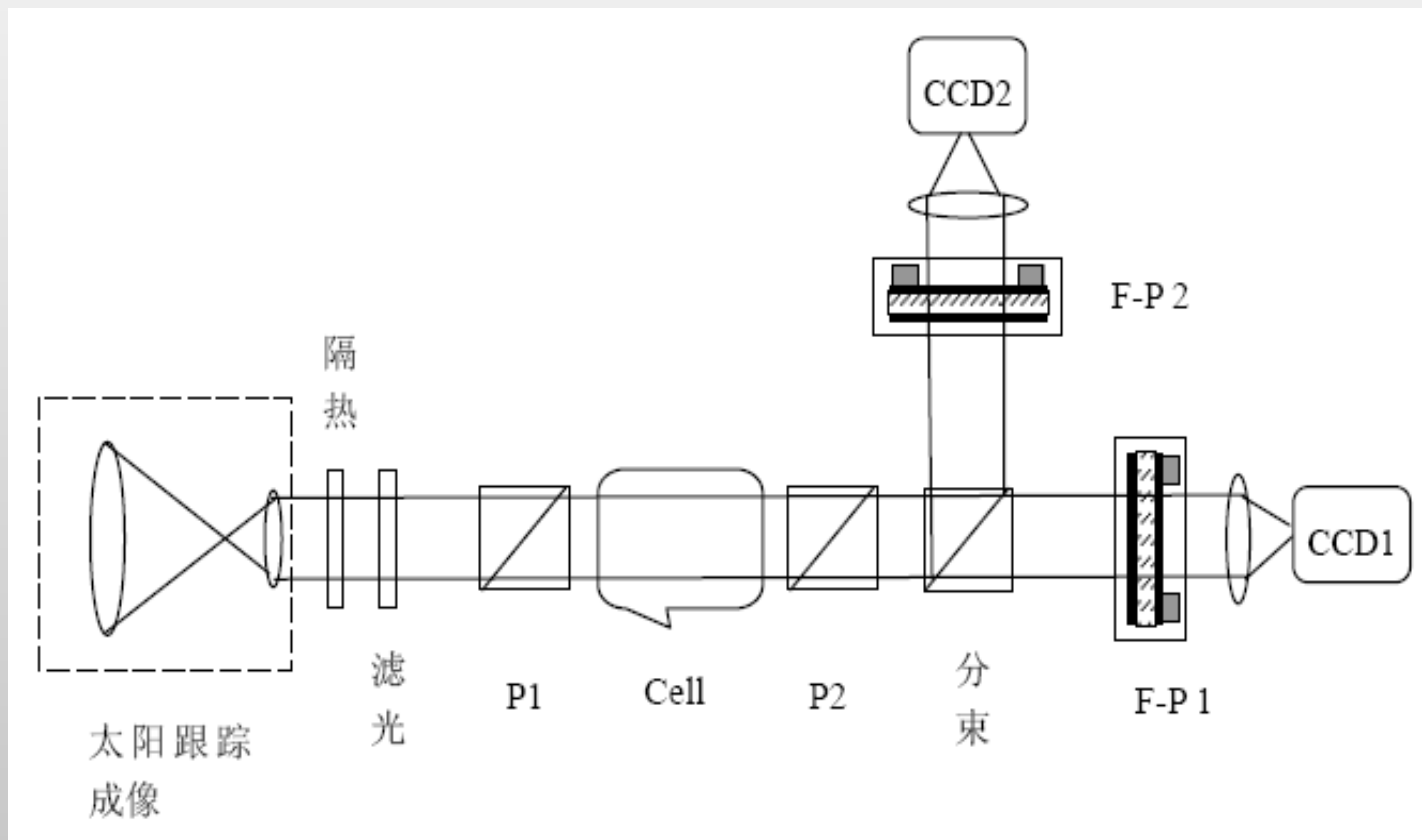
未来可望实现：Ca（423 nm），He（1083 nm）

Na双峰原子滤光器参数：

- 透过半宽，20 mÅ；双峰间距，200 mÅ
- 透过率，>15%
- 温度稳定度需求，±1度

3. 基于原子滤光器太阳望远镜最初构想

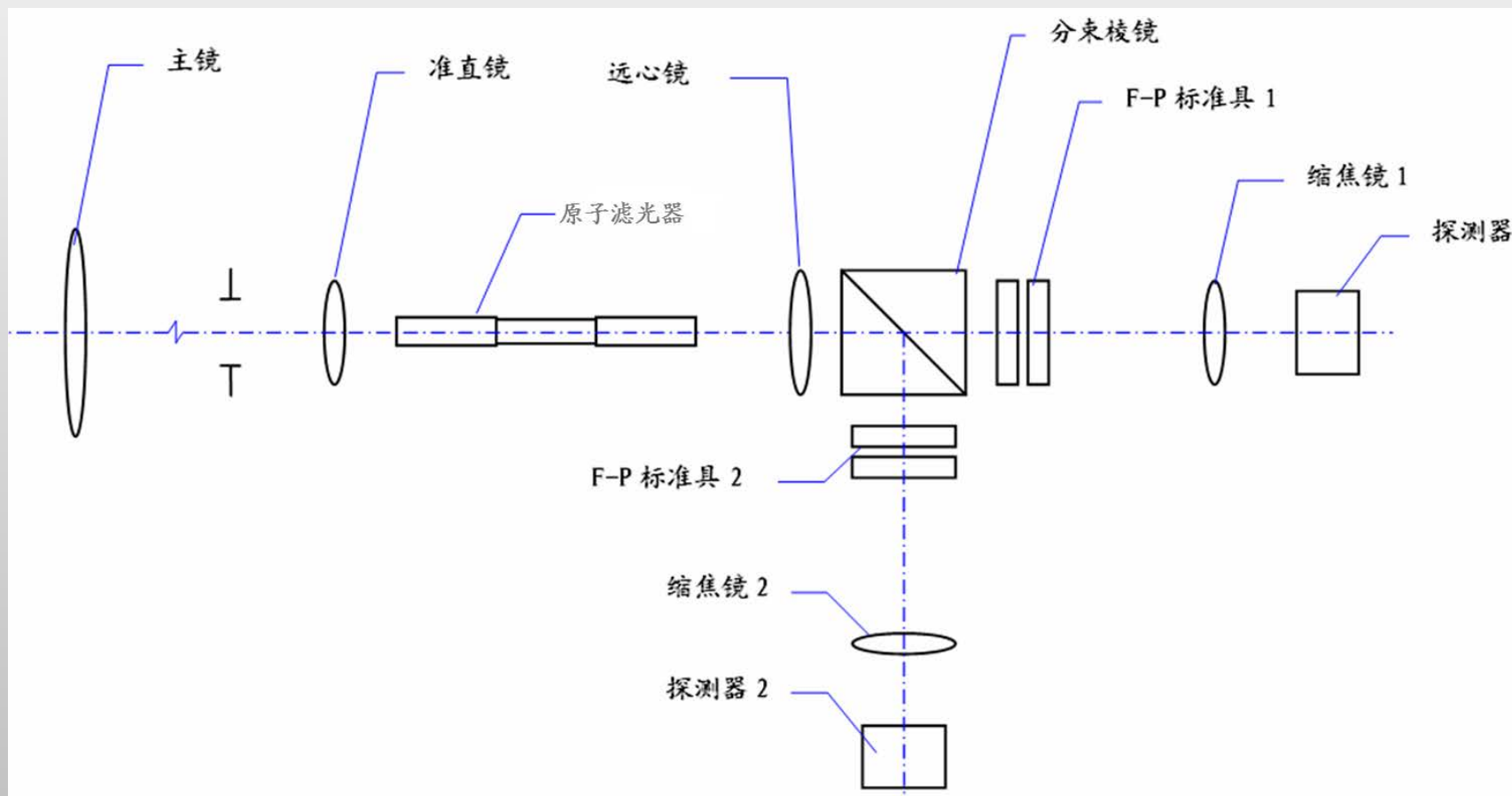
原子滤光+Fabry-Perot标准具选支方案:



原子滤光双峰与F-P标准具的配合

4. 原子滤光器+F-P选支方案设计

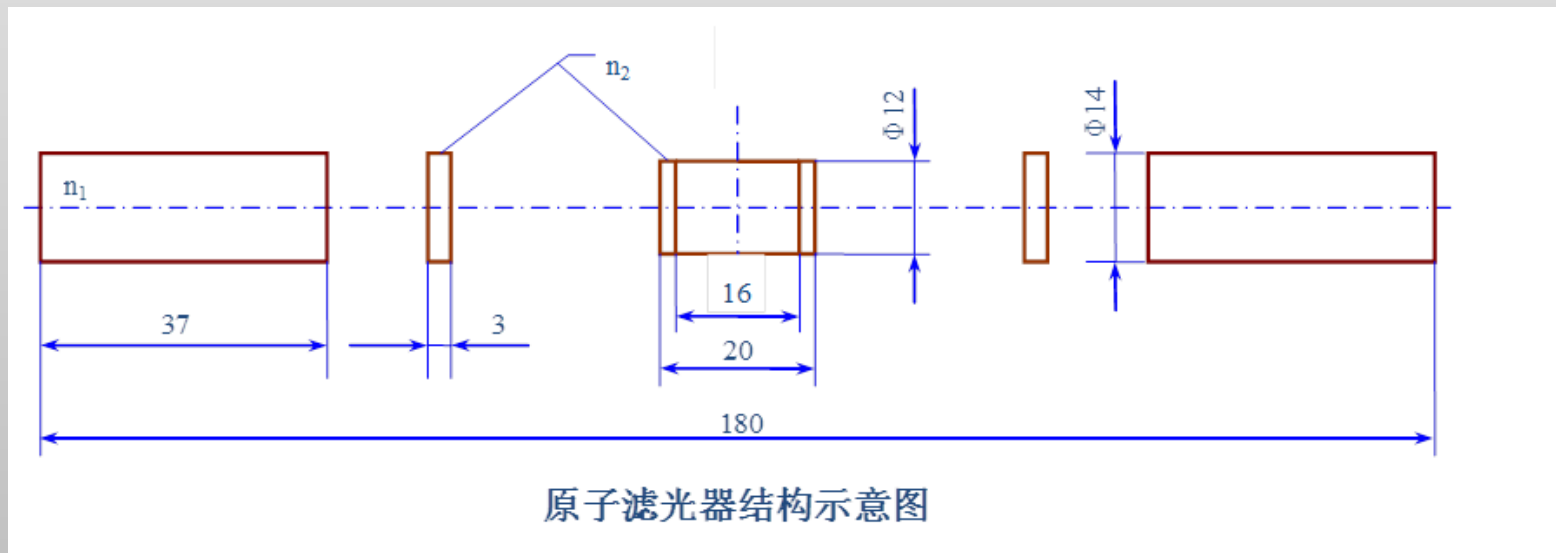
4.1 望远镜系统总体设计方案：



4. 原子滤光器+F-P选支方案设计

4.2 原子滤光器结构限制:

- **结构特性**——口径小，仅14 mm，长度却达180 mm。
- **设计困难**——需置于准直光路中，使光束均匀通过。
- **方 案**——准直光束需要高度压缩，并使中间瞳位于原子滤光器中心位置。



4. 原子滤光器+F-P选支方案设计

4.3 F-P标准具参数限制:

- 入射角度限制：原子滤光器出射的两透过带频率间隔仅有20GHz（23pm），允许入射角度不能大于0.3度；
- 口径限制：F-P有效口径仅20mm。（后增至50 mm）
- 因此为保证F-P透过带的均匀性，必须置于远心光路中，且入射角需小于0.3度，同时远心光束必须保证完全通过F-P有效口径。

4. 原子滤光器+F-P选支方案设计

4.4 光路计算:

- 原子滤光器的孔径与长度限制主镜口径，视场角和放大率:

$$D \cdot R^2 - D_f \cdot R + \left(L - 2L_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_1}\right) - 2L_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_2}\right) \right) \cdot \tan \theta_1 \leq 0$$

- 原子滤光器的长度限制准直镜焦距:

$$(1 + R) \cdot R \cdot f_1 - \left(30 + \frac{L}{2} - L_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_1}\right) - L_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_2}\right) \right) \geq 0$$

其中: D 、 D_f 分别为物镜口径与原子滤光器口径;

R 为放大率; f_1 为物镜焦距;

L 、 L_1 、 L_2 分别为原子滤光器总长度、Glan棱镜长度及玻璃封窗长度;

n_1 、 n_2 分别为Glan棱镜与玻璃封窗的折射率;

θ_1 为半视场角。

4. 原子滤光器+F-P选支方案设计

4.4 光路计算:

- F-P标准具入射角，限制了远心镜的焦距与视场及主镜口径:

$$\frac{R \cdot D}{2f_3} \leq \tan \theta_3$$

- F-P标准具限制物镜口径及远心镜焦距:

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_3} \cdot D \leq D_{\text{FP}}$$

其中: D_{FP} 为F-P有效口径;

f_3 为远心镜焦距;

θ_3 为F-P入射角。

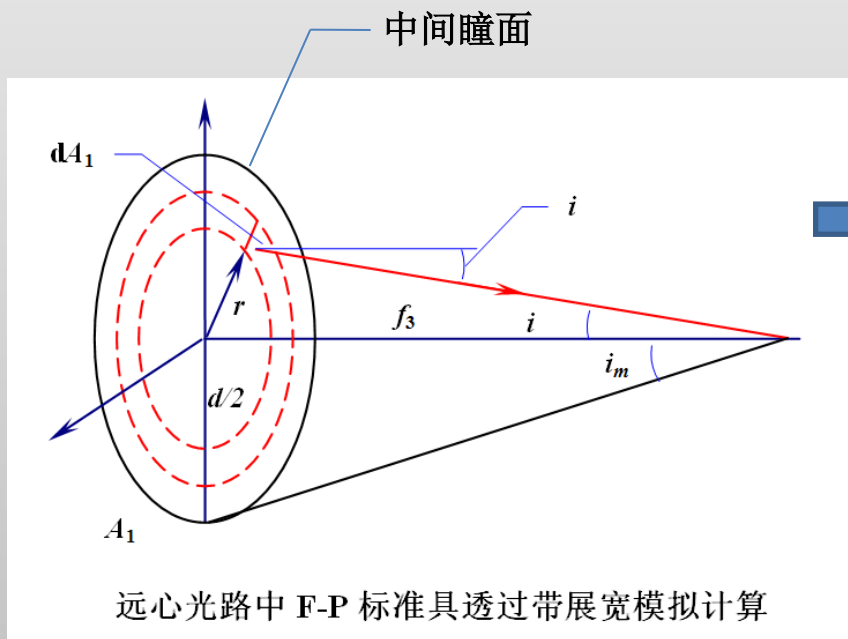
望远镜参数选择是上述限制条件取交集，并考虑实际科学需求的结果。

4. 原子滤光器+F-P选支方案设计

4.5 远心光路中F-P透过带展宽估算:

F-P系统的透过带轮廓与透过带的移动对选支影响至关重要!

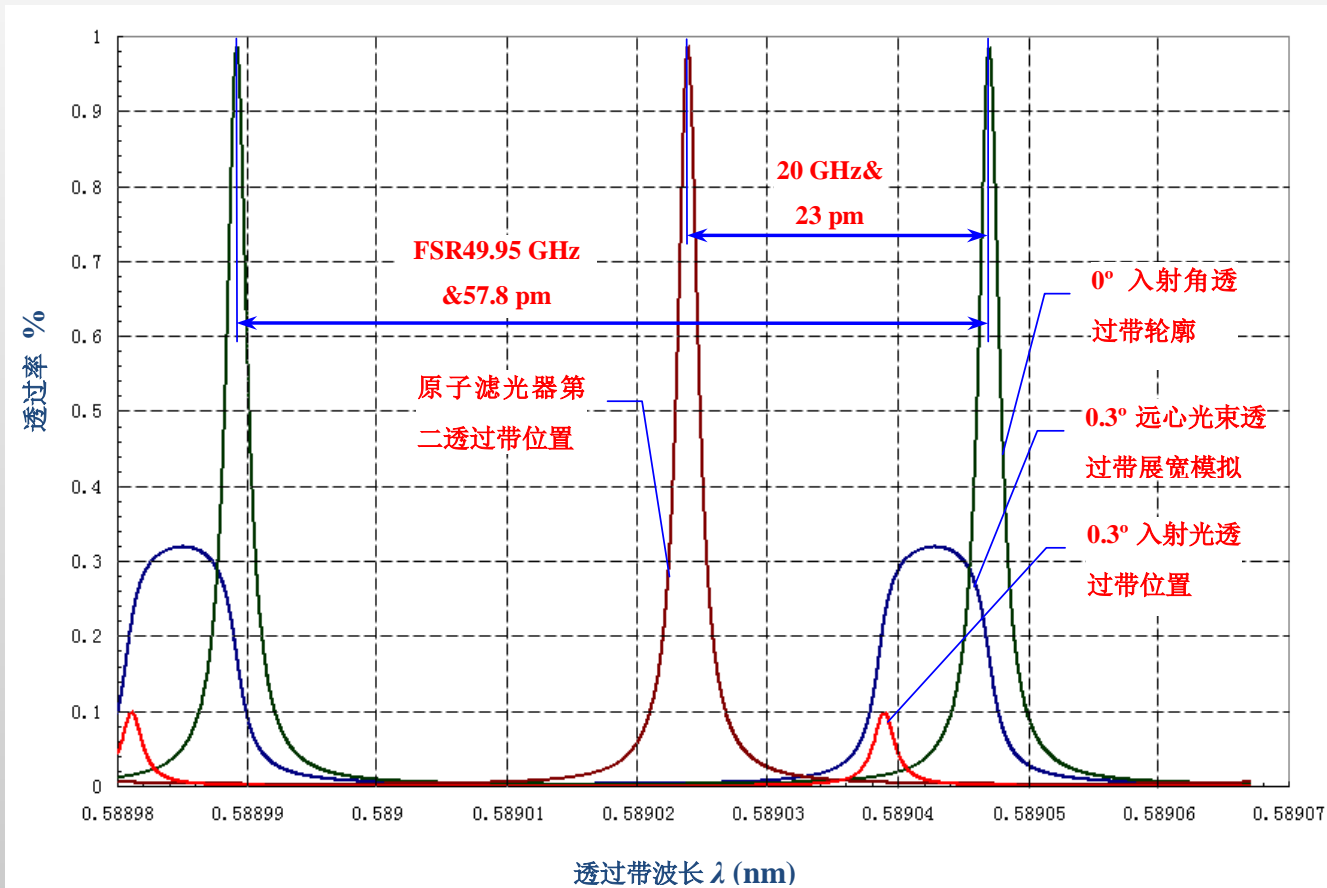
经远心系统后的透过带函数:



$$I = \int_0^{0.3} \frac{I_0 \cdot 2\pi \cdot f_3^2 \cdot \frac{\sin i}{\cos^3 i}}{4\mathfrak{R} \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi n h}{\lambda} \cdot \cos i\right) + \frac{\lambda}{(1-\mathfrak{R})^2}} \cdot di$$

其中: \mathfrak{R} 为F-P反射率;
 f_3 为远心镜焦距;
 h 为F-P间隔
 n 为F-P折射率。

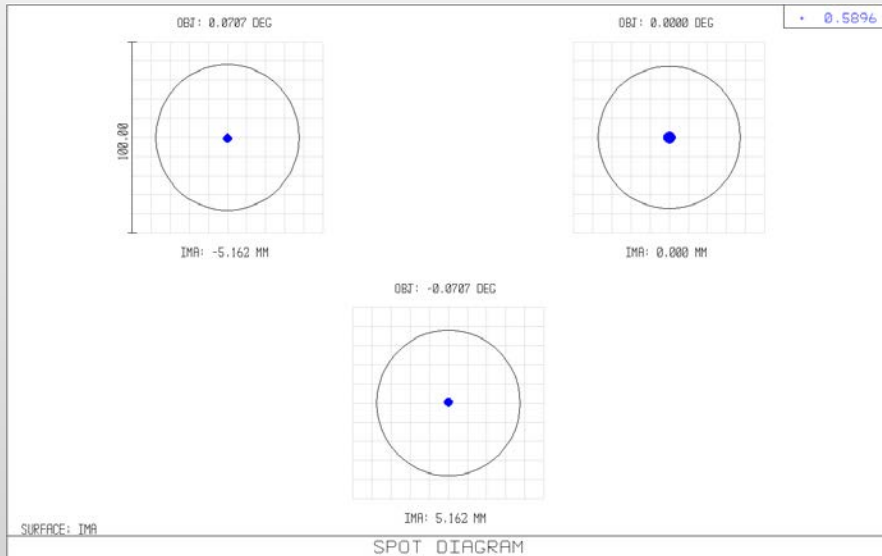
4. 原子滤光器+F-P选支方案设计



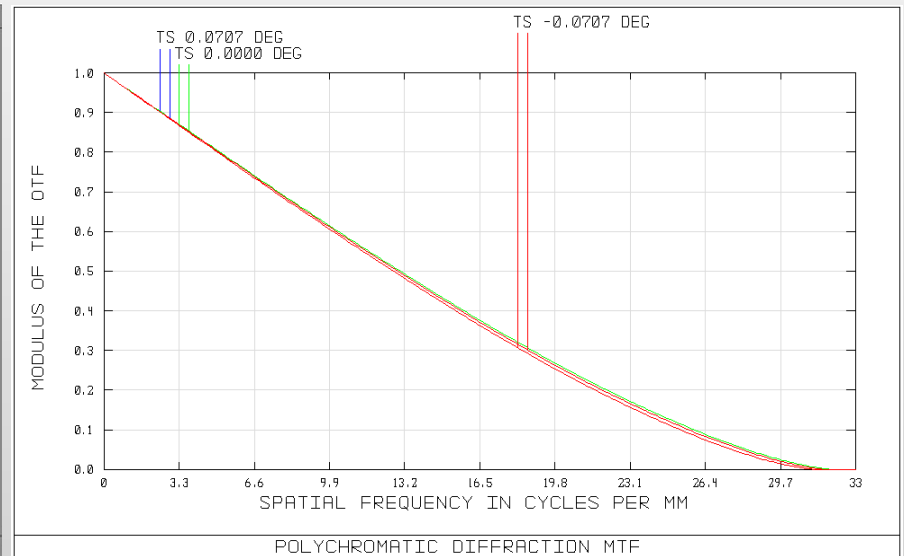
远心光路中 F-P 标准具透过带展宽模拟计算

4. 原子滤光器+F-P选支方案设计

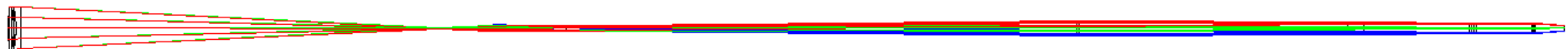
4.6 ZEMAX设计及优化及公差分配结果:



望远镜系统点列图



望远镜系统MTF曲线



望远镜光学系统ZEMAX设计结果 (单路)

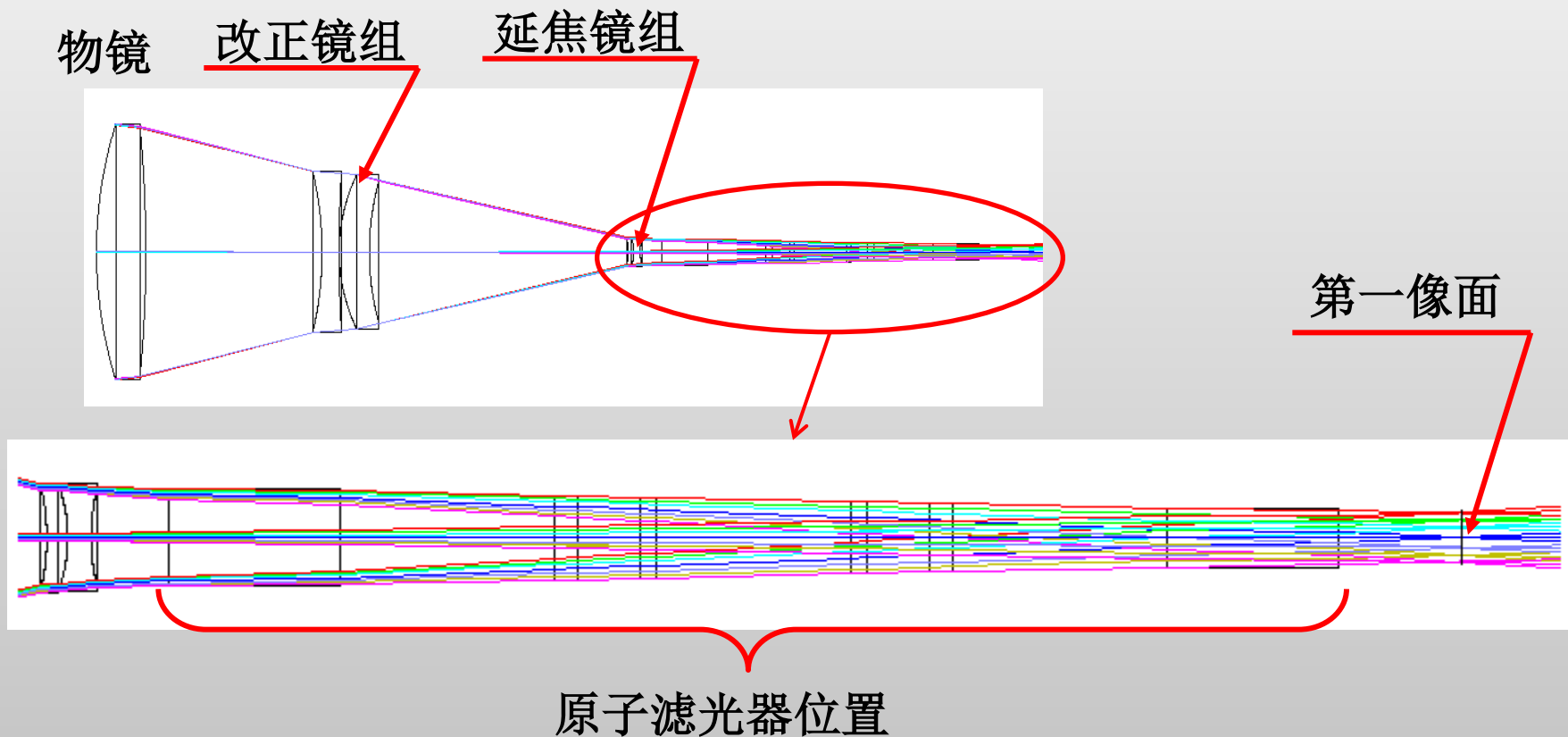
4. 原子滤光器+F-P选支方案设计

4.7 望远镜系统设计参数：

- 观测**视场 $6\times 6'$** ，可以涵盖太阳活动区；
- 物镜组有效焦距800mm，**有效口径80 mm**；
- 准直镜组有效焦距104mm，有效口径13mm；
- 中间瞳直径10.4mm，距准直镜约131mm；
- 远心镜有效焦距约991mm，有效口径26.4mm；
- 成像镜组焦距约80mm，有效口径约20mm
- CCD像素1K \times 1K，像元7.4微米，**像元分辨率约0.36角秒**。
- 系统**总长约2.88 m**

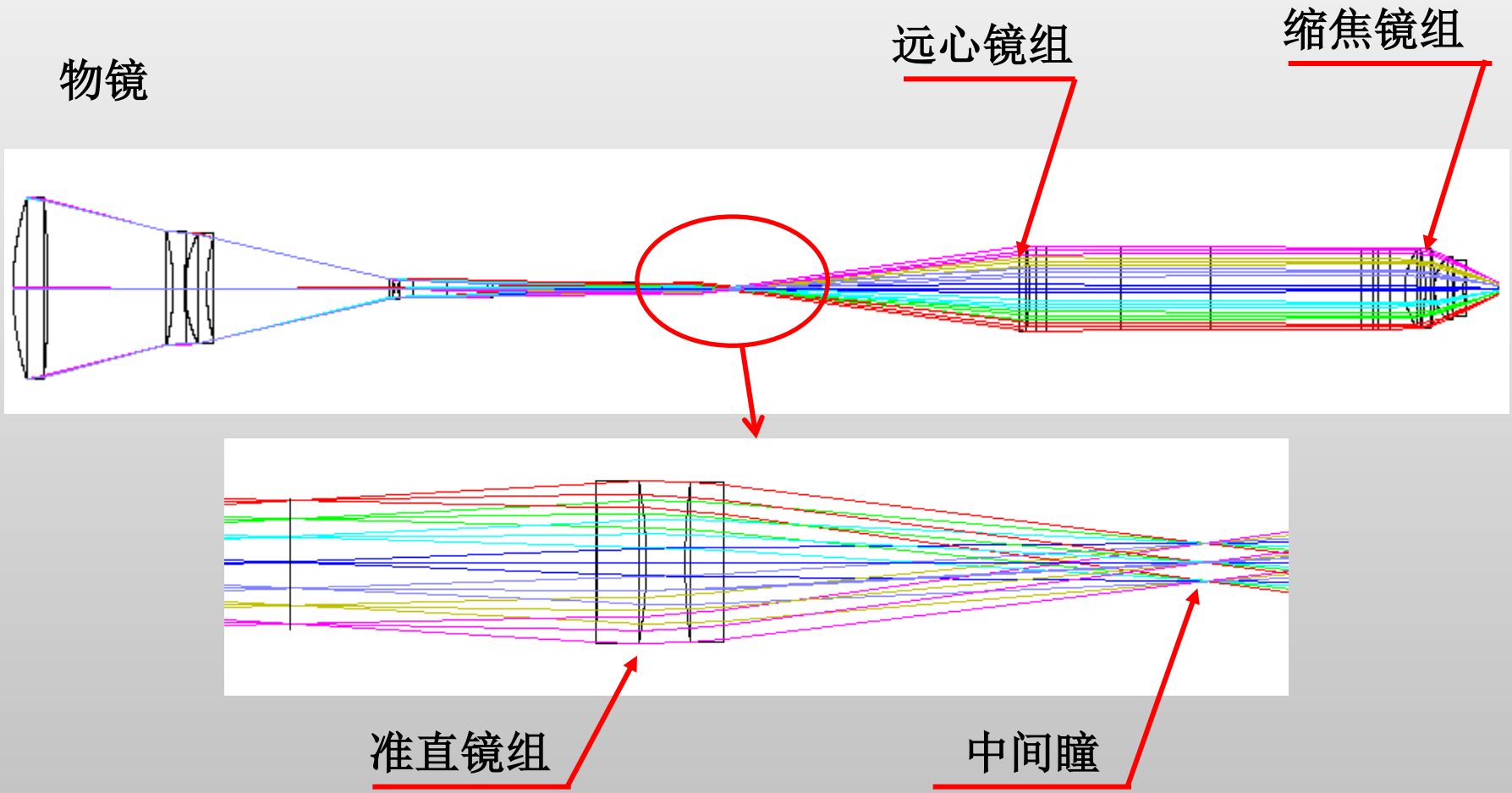
5. F-P选支方案设计改进及其问题

5.1 光路缩短:



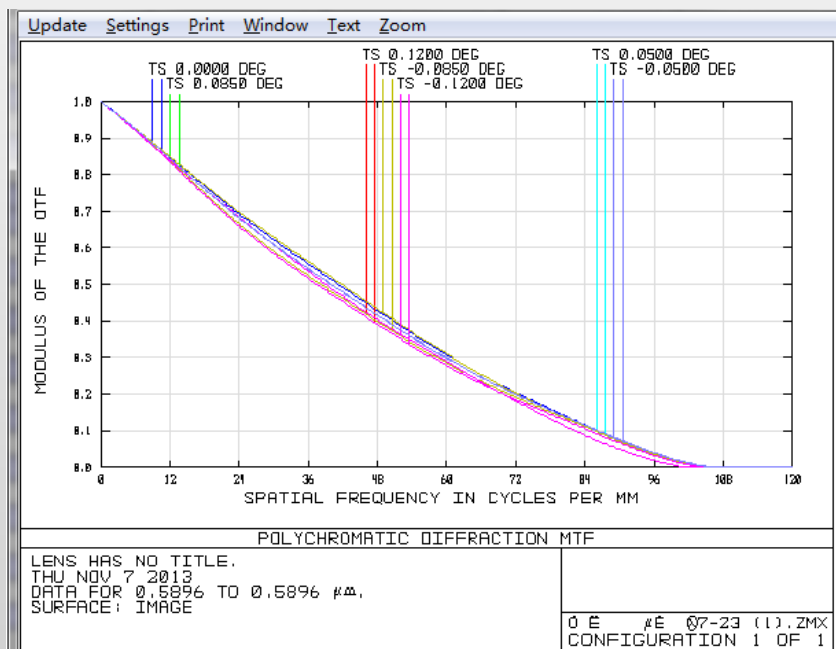
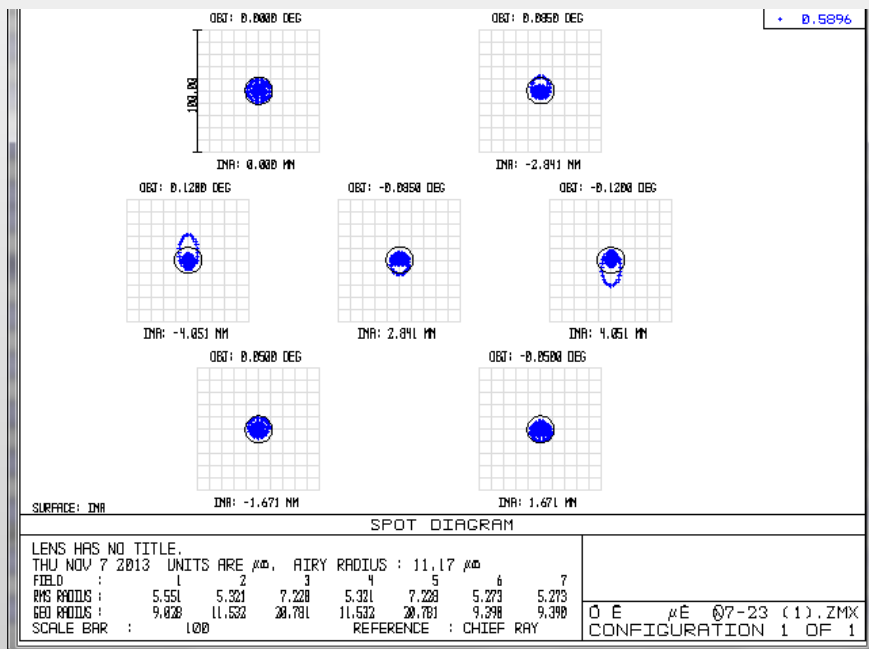
5. F-P选支方案设计改进及其问题

5.2 构造远心:



5. F-P选支方案设计改进及其问题

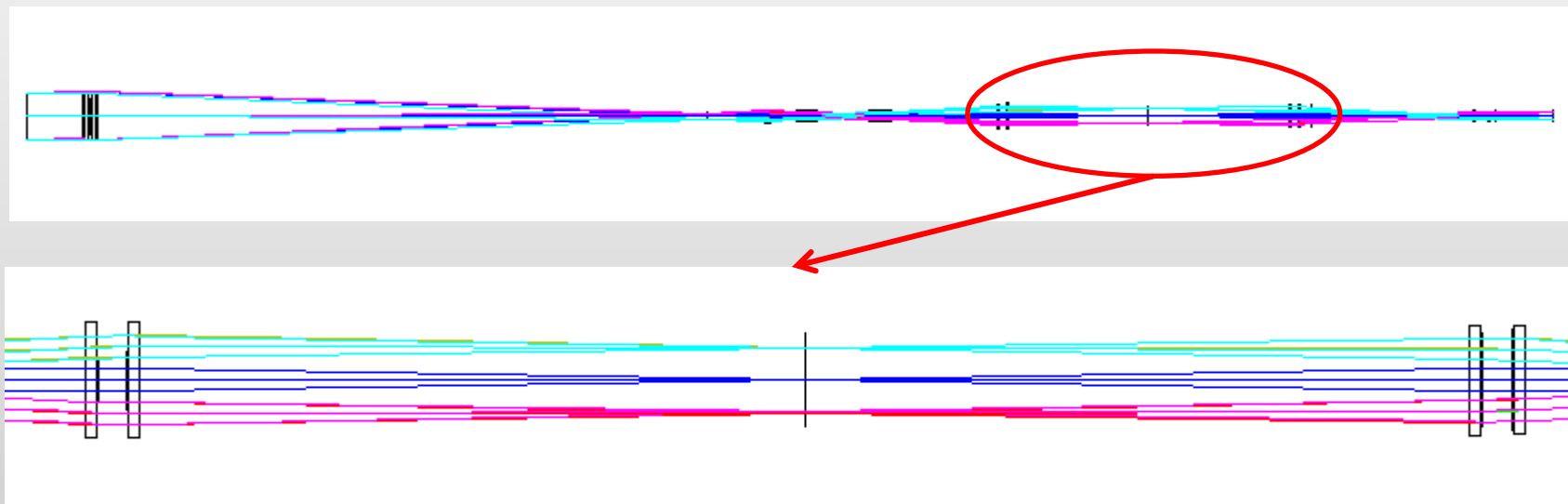
5.3 设计结果:



物镜口径**120mm**，视场**10×10角分**（50 mm口径F-P），由于原子滤光器距离第一像面太近，导致原子滤光器的瑕疵都成像于探测器，被迫放弃。又回到第一版方案。

6. 双原子滤光器选支全日面方案设计

6.1 Zemax设计结果：



中继镜组

6. 双原子滤光器选支全日面方案设计

6.1 Zemax设计结果：

6. 双原子滤光器选支全日面方案设计

6.2 望远镜系统设计参数:

- 观测全日面视场 $32'$;
- 物镜组有效口径 80 mm ;
- 系统总长约 2.53 m

目前正在加工, 预计11月底可以开始装调

