



中国科学院上海天文台
Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences

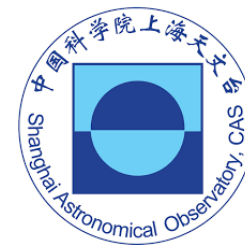
CSST-MCI

多通道成像仪调焦方法研究

报告人：刘欢新

指导老师：许春、颜召军

CSST 介绍



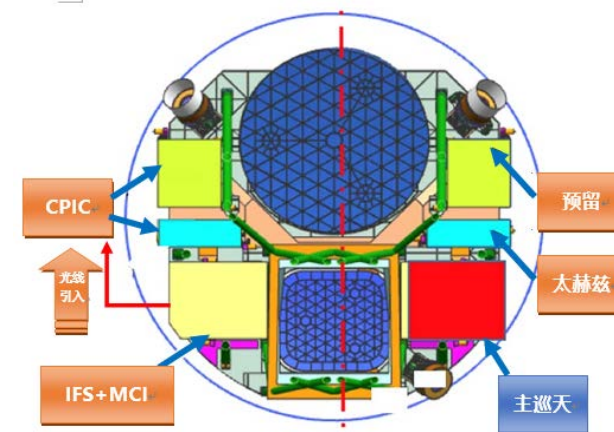
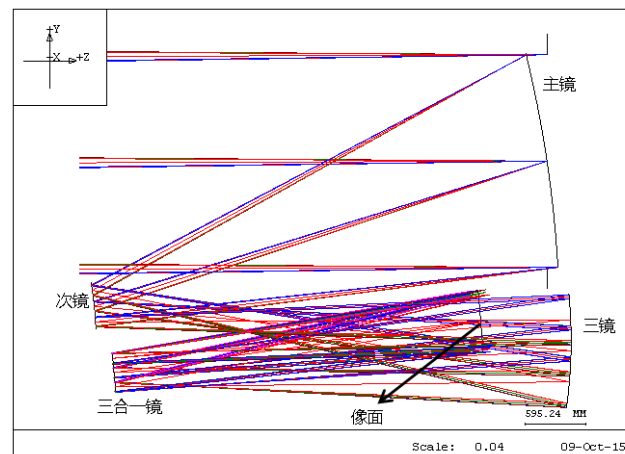
口径：2m

视场：1.72 deg²

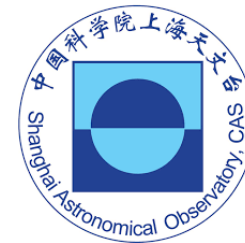
分辨率：小于0.13"

主光学系统采用COOK型离轴三反光学系统结构，实现离轴无遮拦成像。

载荷：多色成像和无缝光谱巡天模块、多通道成像仪、积分视场光谱仪、系外行星成像星冕仪、高灵敏度太赫兹模块



MCI 介绍

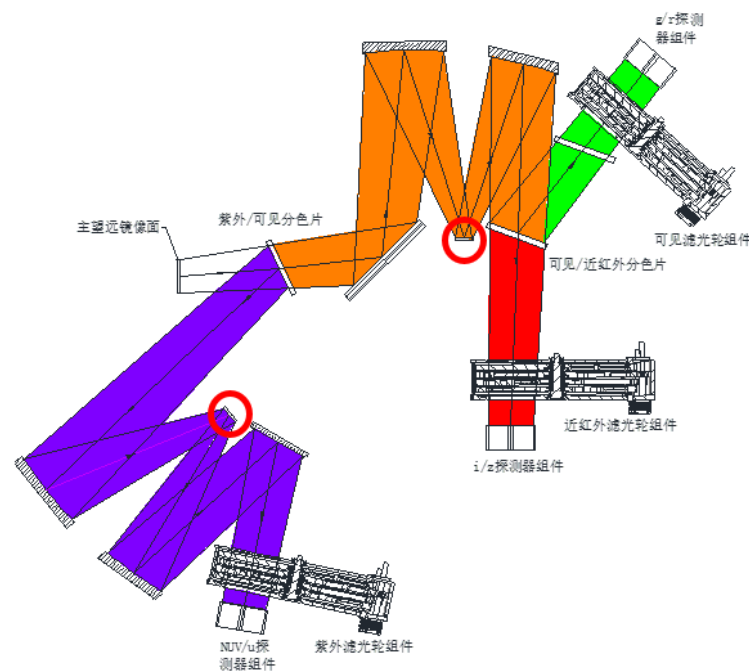


MCI采用了分色片分光、滤光片选择光学波段的方法进行图像采集。基本设计如图：从望远镜焦面引入过来的光线首先通过一个分色片，分成近紫外和可见、近红外波段；近紫外波段通过一个多次反射中继成像系统和滤光轮，达到探测器；可见、近红外波段通过一个多次反射中继成像系统，到达第二分色片再分割，然后各自通过滤光片（安装在滤光轮上）达到探测器。探测器前有快门，快门开关效果类似来回平移门。

MCI共用30种滤光片，分三个通道，每个通道10种滤光片，其中4种滤光片充满探测器视场，6种滤光片只占探测器视场1/4。

MCI三个探测器都可以通过调节机构前后移动，使得主光学系统的像通过MCI的光学系统落到MCI的探测器上。这个调节过程就是MCI的调焦。

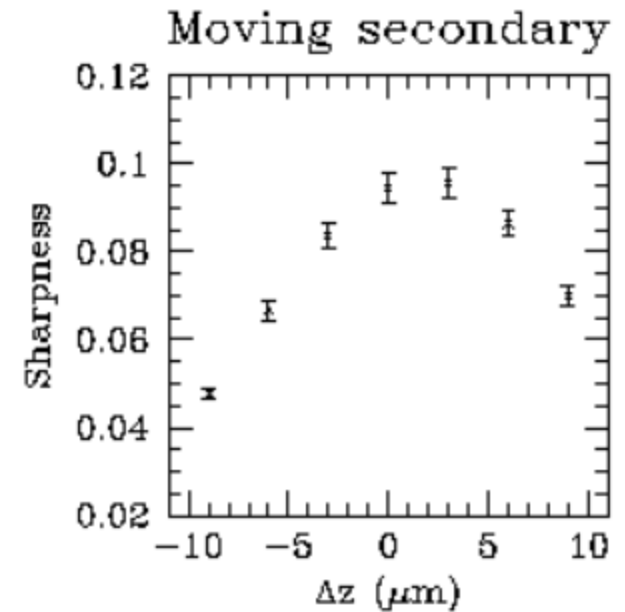
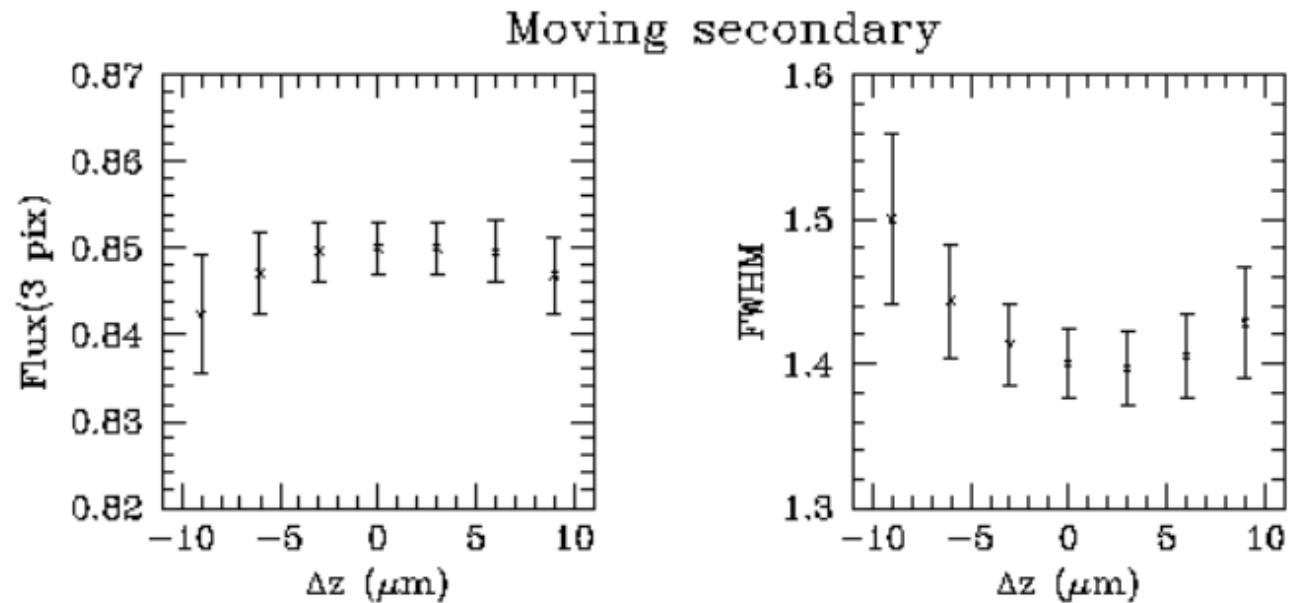
三合一镜的移动也能实现调焦功能，用以调节主光学系统的焦面。



调焦方法

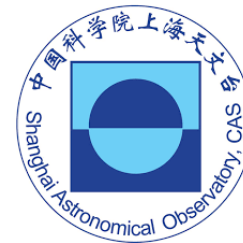
- Stiavelli等人与2001年的研究中，使用仿真PSF数据计算了半高全宽 (FWHM)、环绕能量 (EE) 和锐度 (sharpness)，并比较了三种方法在寻找最佳焦面中的表现。就半高全宽和环绕能量两项指标来看，半高全宽的表现要优于环绕能量，但锐度这一指标在计算中拥有更小的误差。同时，该研究也指出在计算锐度时，应该考虑计算多个PSF的锐度取平均以减少次像元误差。

误差项来自中心的不确定性。



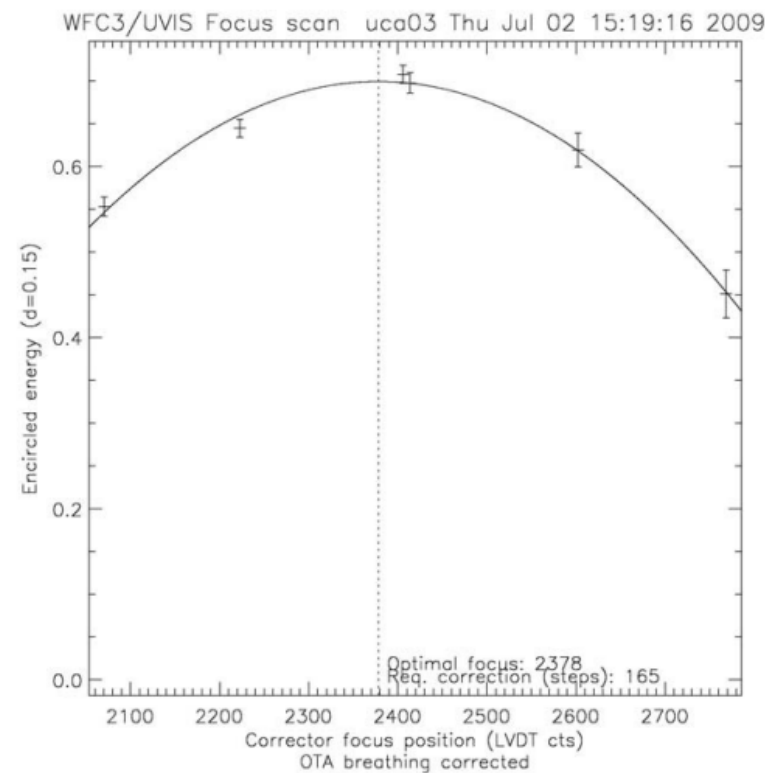
图片来源(M, Stiavelli, et al. 2001)

调焦方法



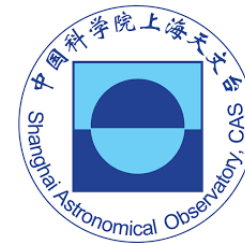
- 在G. Hartig等人在2009年的应用中通过计算半径 0.15 arcsec 的环绕能量 (EE)，并对每个焦面位置所有星点的平均环绕能量进行二次曲线拟合得到一个最佳焦面位置，并且在获得少量数据的情况下完成了WFC3相机的调焦工作。

右图中使用六个焦面位置的平均环绕能量拟合出一个二次抛物曲线，该曲线在焦面位置为**2378**时取到最大值，也就是在该位置的全视场平均环绕能量取最大值，这就是该方法求得的最佳焦面位置。



图片来源(G. Hartig, et al. 2009)

仿真数据



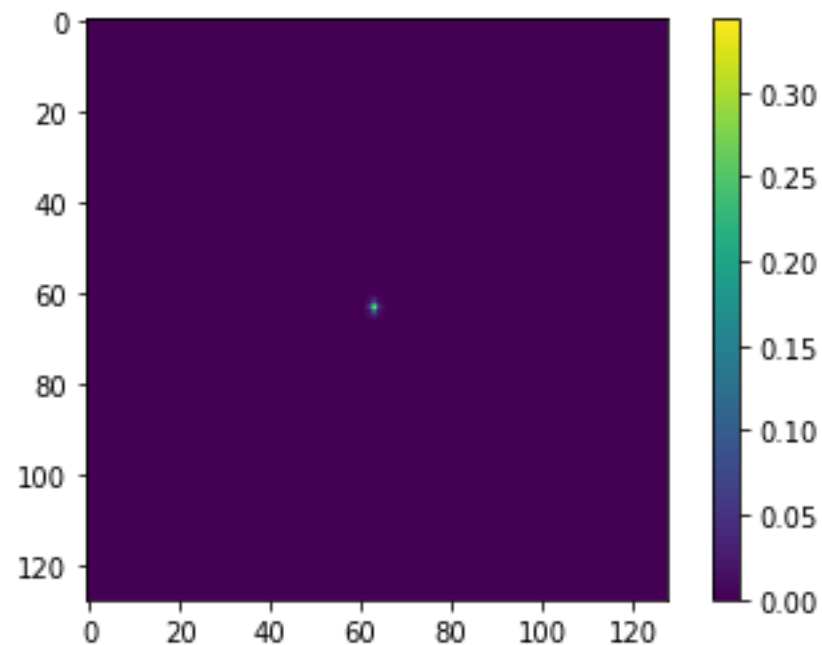
仿真数据使用 Zemax 构建CSST-MCI的光学系统，引入光学设计像差、装调相差，通过改变焦面位置得到不同焦面位置的PSF。

波前相差使用 Zemax 默认相差的 2.0 倍和 3.0 倍，用于比较像差不同对聚焦情况的影响。

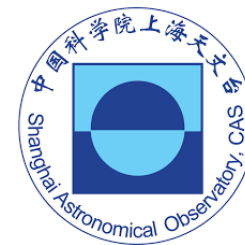
离焦量从 -0.1mm 到 0.1mm 有13组采样，用于比较离焦量对聚焦情况的影响，这也是该研究的重点，即找到聚焦情况最好的离焦位置。

视场位置是在像面上取 20*20 个位置，它们均匀分布在像面上，用于比较不同视场位置对聚焦情况的不同。

一个示例 PSF 如右图。



仿真数据测试

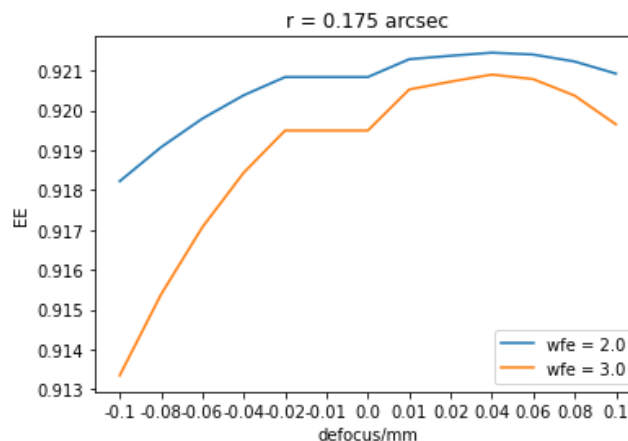
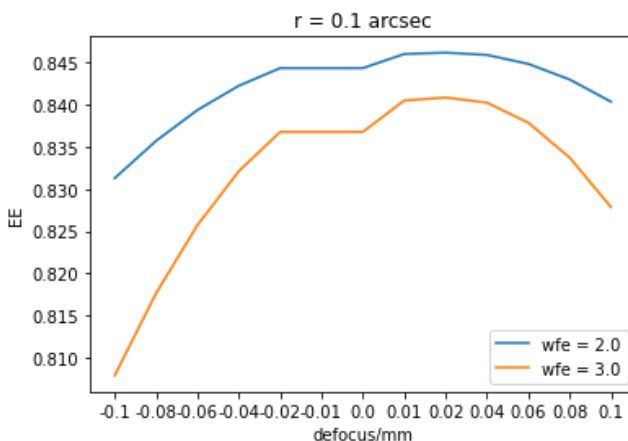
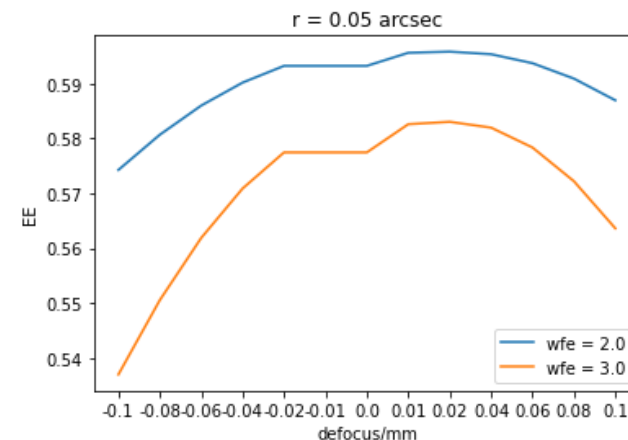
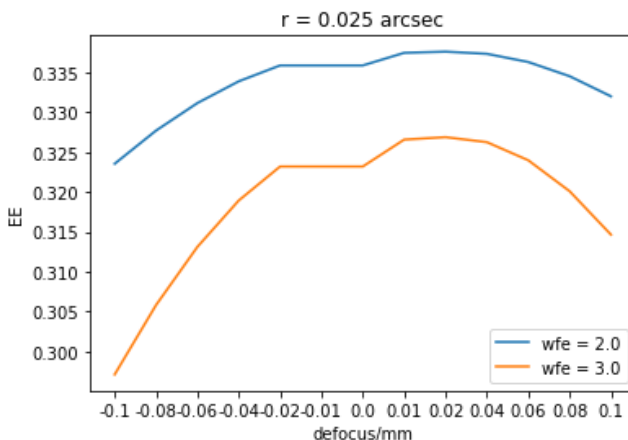


- EE

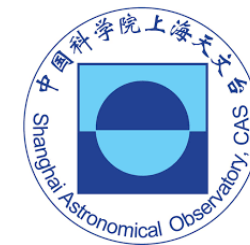
半径选取不同会导致 EE 随离焦量变化的不同，

右图为半径在 0.025，0.05，0.1，和 0.175 arcsec 时，EE 随离焦量的变化。

可以看出半径在 0.1 arcsec 的情况下 EE 随离焦量的变化比较明显。



仿真数据测试

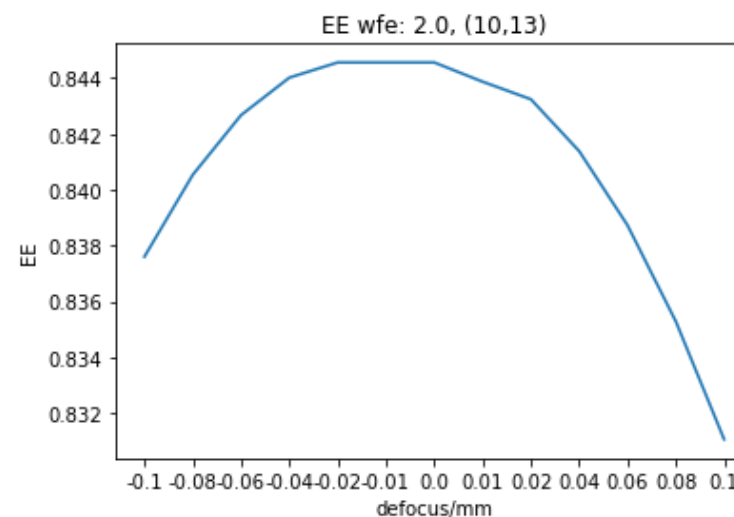
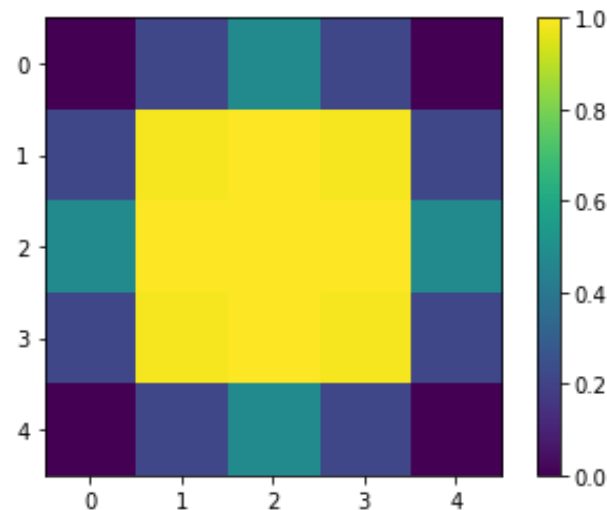


- EE

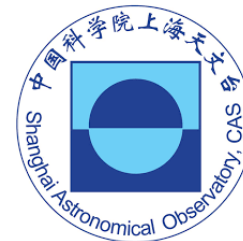
取半径为 0.1 arcsec

首先计算出如左图所示的核（此核为点源中心在像素点中心，半径为 2 pixel），用此核与每个焦面位置上的 PSF 相乘，就可以得到该焦面位置上 PSF 的环绕能量。

将每个焦面位置的环绕能量以横坐标为离焦量排列，如右下图，极大值所在的位置就是最佳焦面位置。



仿真数据测试

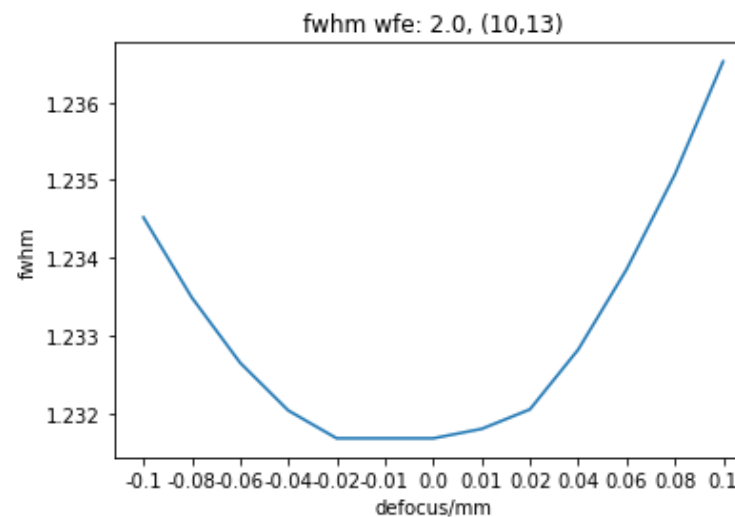
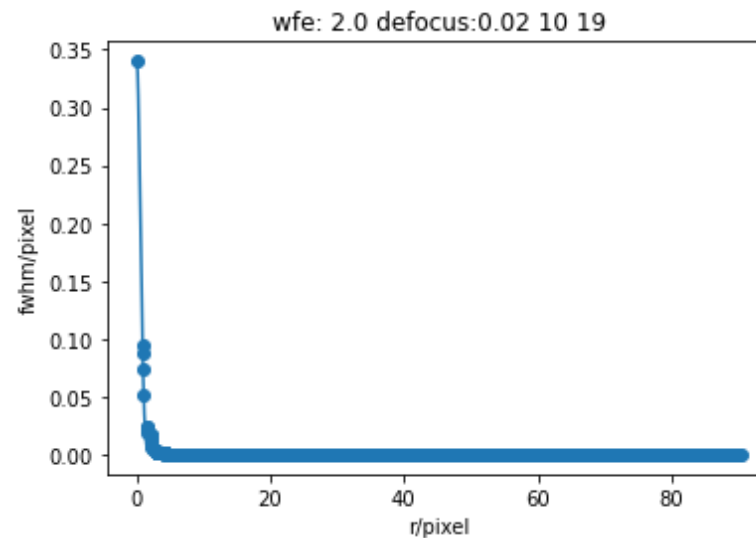


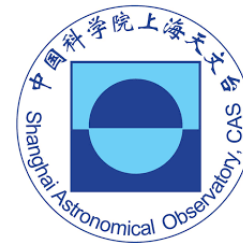
- FWHM的计算

由PSF中心向外计算对应半径的值，并进行高斯拟合

（右上图中，点为相应半径上的数据点，曲线为计算出的 σ 值得到的高斯曲线）

同样的，将每个焦面位置的环绕能量以横坐标为离焦量排列，如右下图，和环绕能量不同的是，极小值所在的位置就是最佳焦面位置，也就是 $\text{defocus} = -0.02$ 的时候。





仿真数据测试

- sharpness

sharpness的计算需要计算一个高斯核的 σ ，这在计算fwhm的时候已经计算过了。

接下来使用求得的 σ 代入高斯模型：

$$G = e^{-((x-x_0)^2+(y-y_0)^2)/2\sigma^2}$$

使用反卷积的最小二乘解得到一个反卷积结果（D是像素的读出值）：

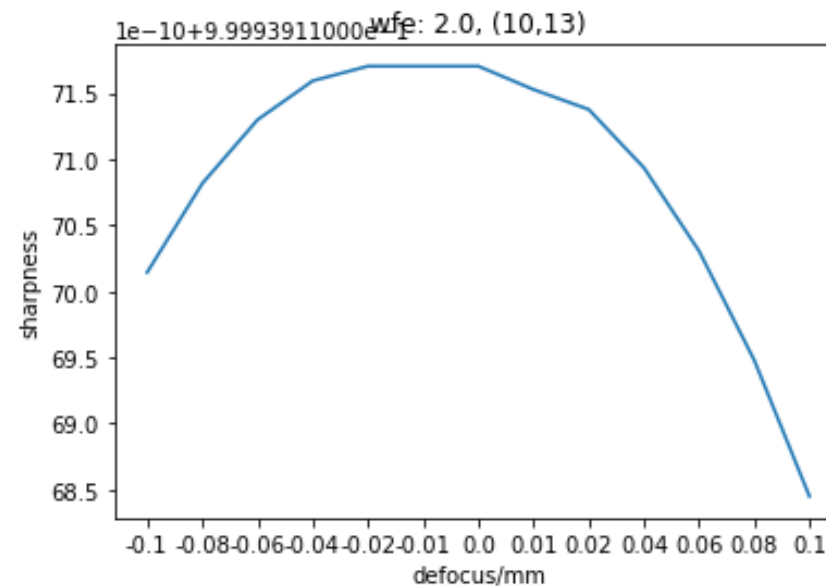
$$H_{i_0j_0} = \frac{\Sigma(GD) - (\Sigma G)(\Sigma D)/n}{\Sigma(G^2) - (\Sigma G)^2/n}$$

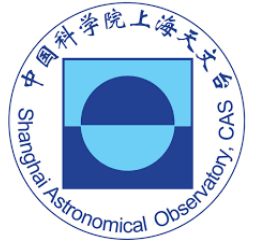
sharpness的值为：

$$\text{sharp} \equiv \frac{D_{i_0j_0} - \langle D_{ij} \rangle}{H_{i_0j_0}}$$

其中， D_{ij} 是临近中心但不是中心的点。

将每个焦面位置的环绕能量以横坐标为离焦量排列，如右图，极大值所在的位置就是最佳焦面位置





仿真数据测试

- 全视场

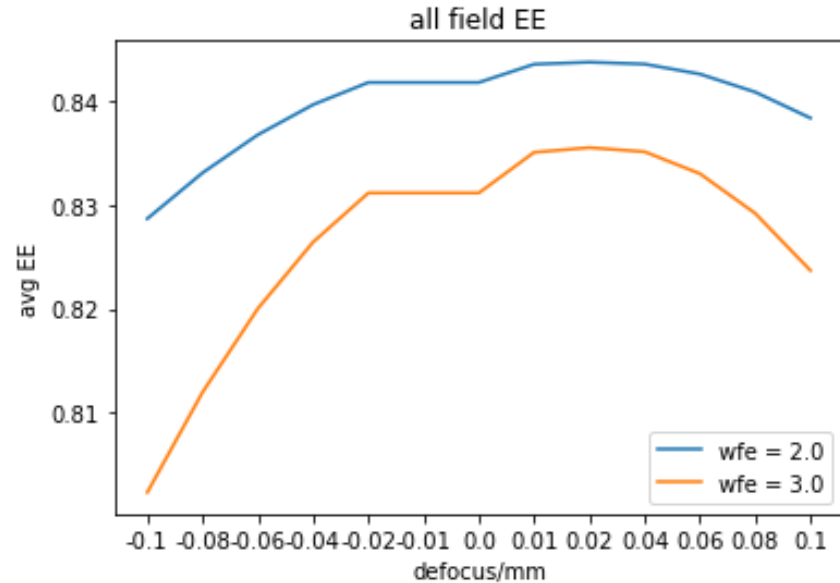
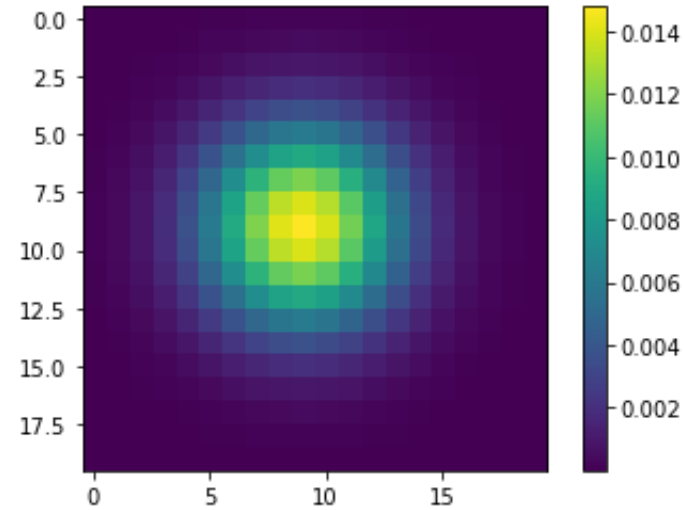
对不同视场位置的PSF赋权值

以 EE 的情况举例：

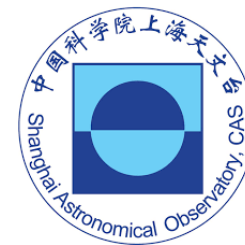
$$\arg \max_f \sum_{i=0}^n W * EE_{i, f}$$

W 为自定义的一个矩阵（如一个高斯核，如右上图），以此为权值计算整个视场上对应位置 PSF 的 EE，计算结果如右下图所示。可以看出，焦面位置在 0.1 mm 时的总体聚焦情况最好。

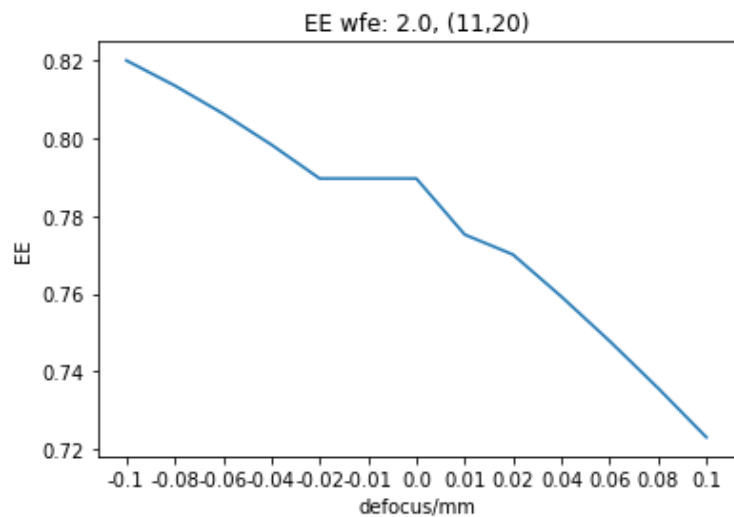
FWHM 和 sharpness 的情况相同。



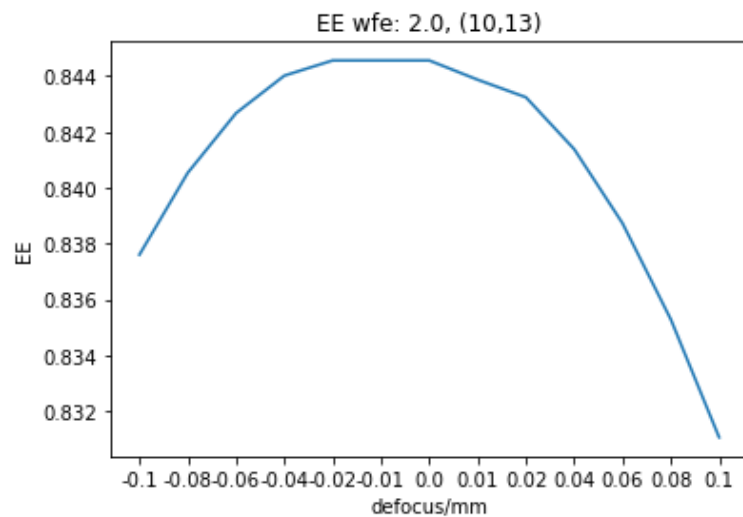
仿真数据测试



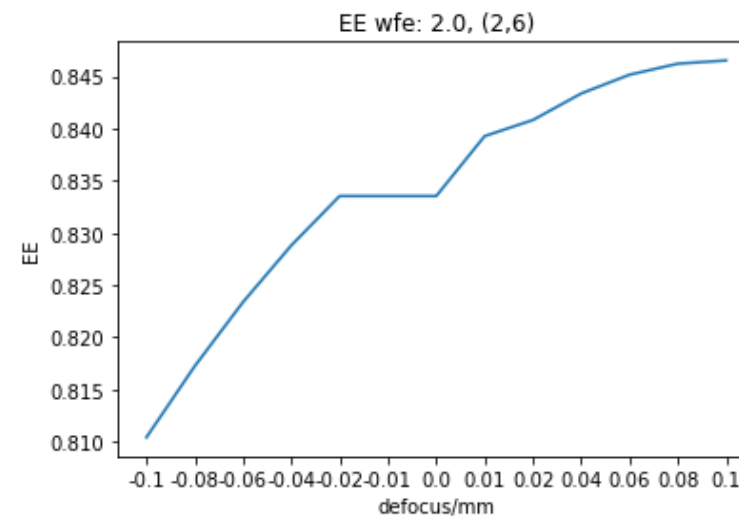
- 最佳焦面位置的三种情况 (EE)



最佳焦面在-0.1

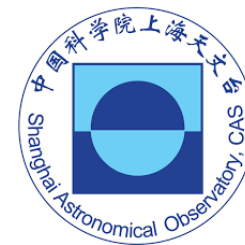


最佳焦面在中间

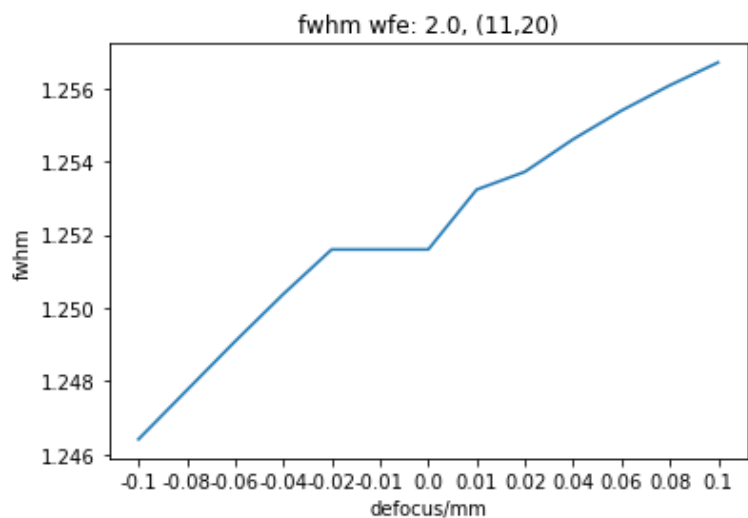


最佳焦面在0.1

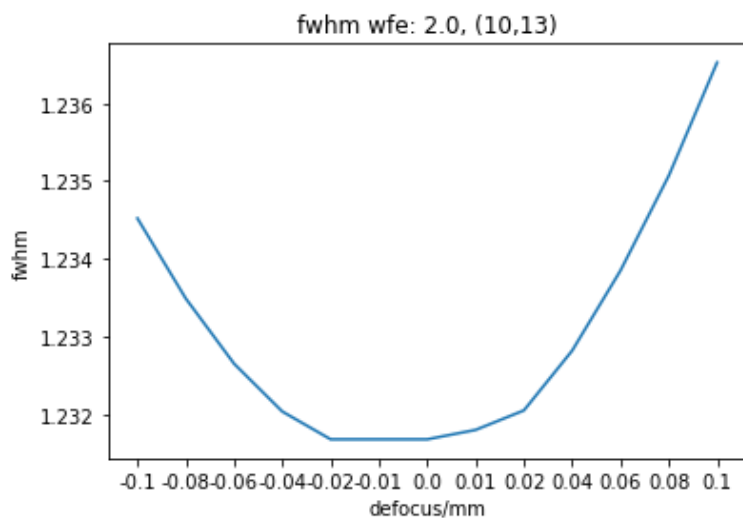
仿真数据测试



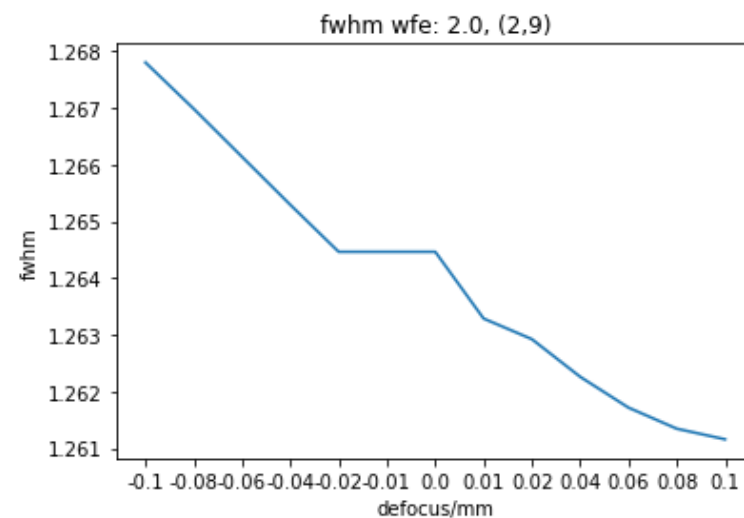
- 最佳焦面位置的三种情况 (FWHM)



最佳焦面在-0.1

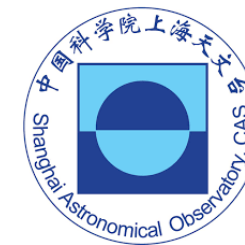


最佳焦面在中间

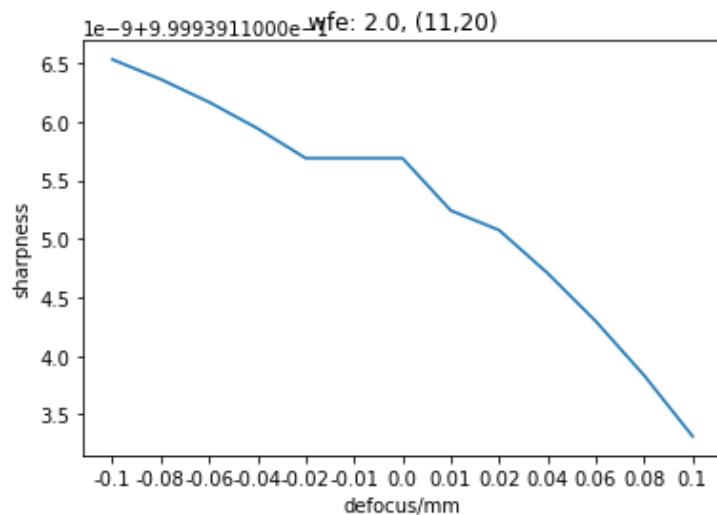


最佳焦面在0.1

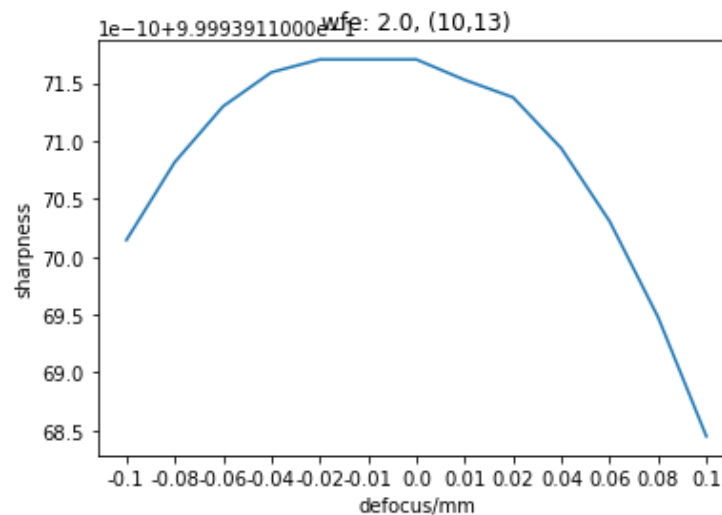
仿真数据测试



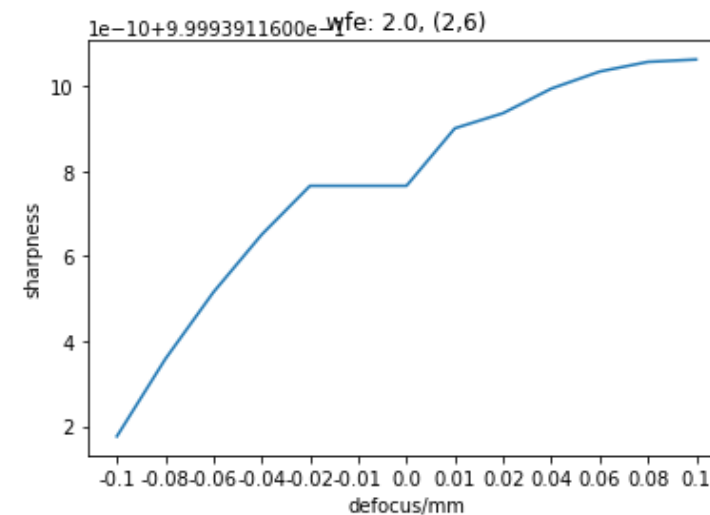
- 最佳焦面位置的三种情况 (sharp)



最佳焦面在-0.1

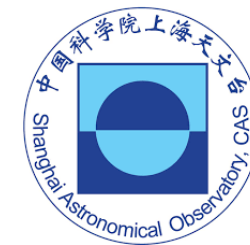


最佳焦面在中间



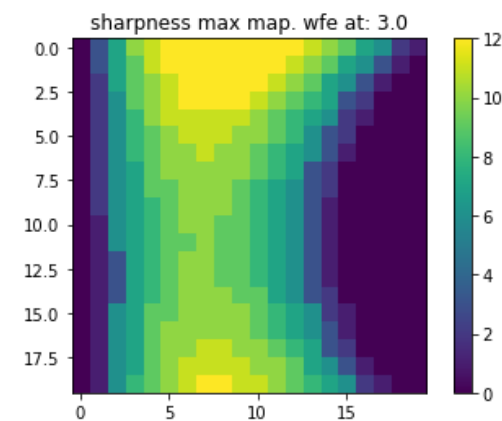
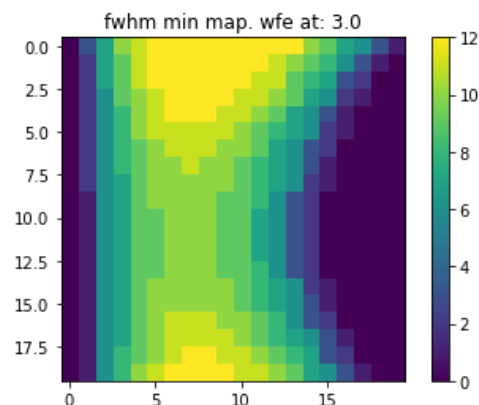
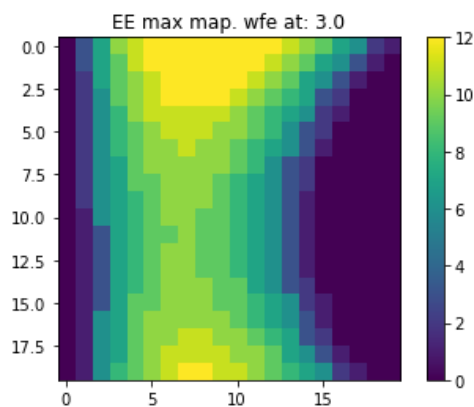
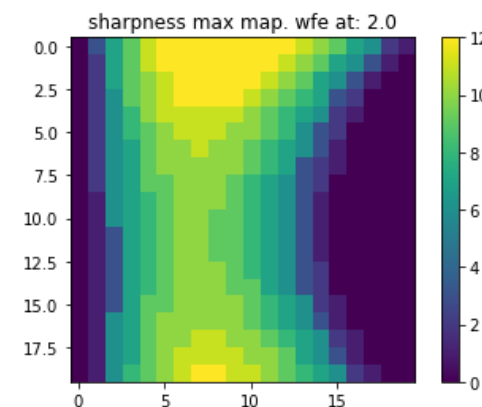
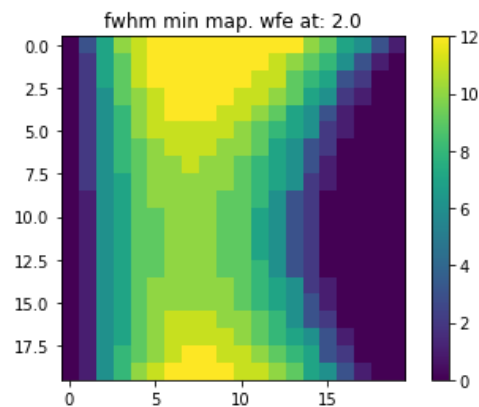
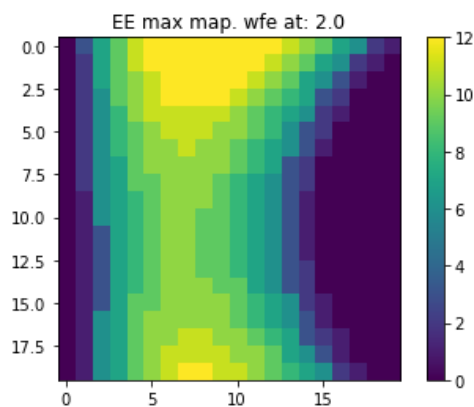
最佳焦面在0.1

仿真数据测试

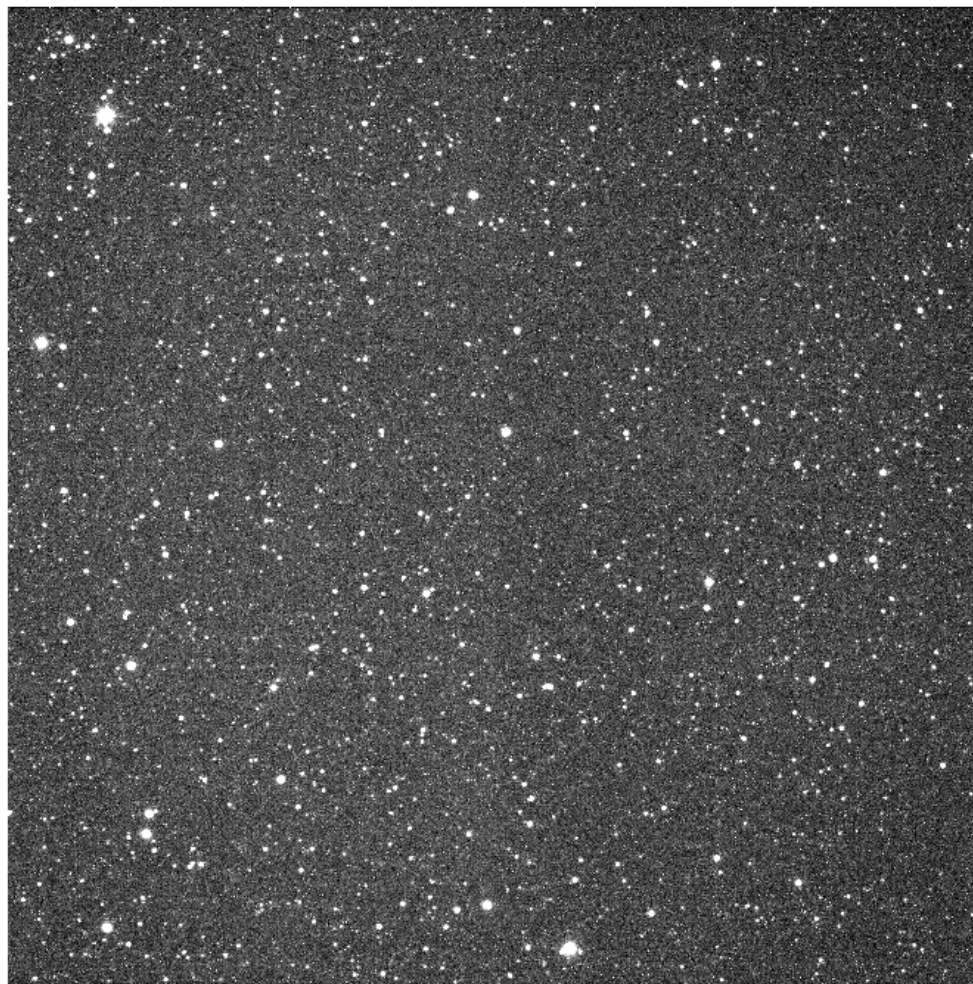
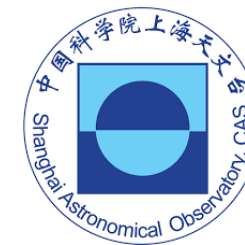


- 最佳焦面位置在视场上的分布 ()

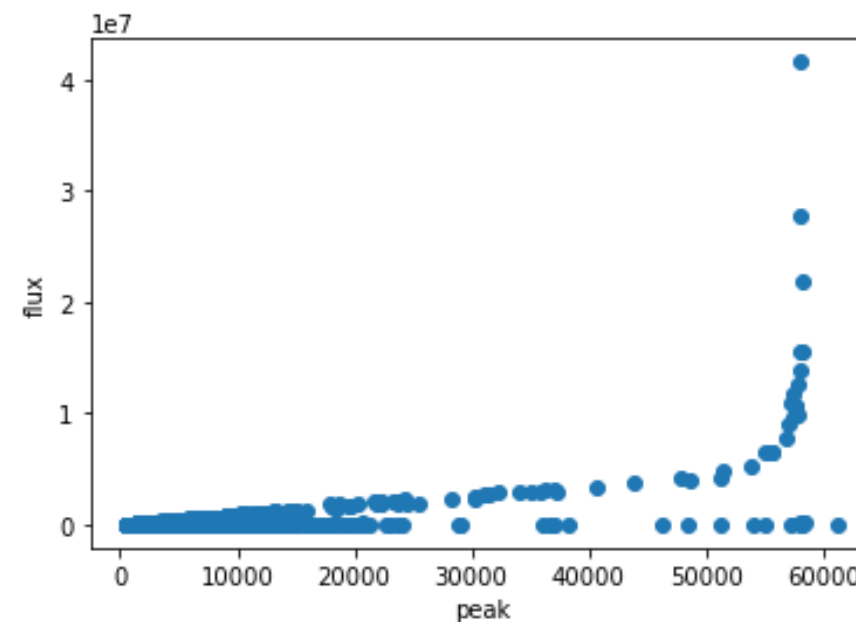
紫色区域最佳焦面位置在-0.1，黄色区域的最佳焦面位置在0.1，其余在中间的某个位置。



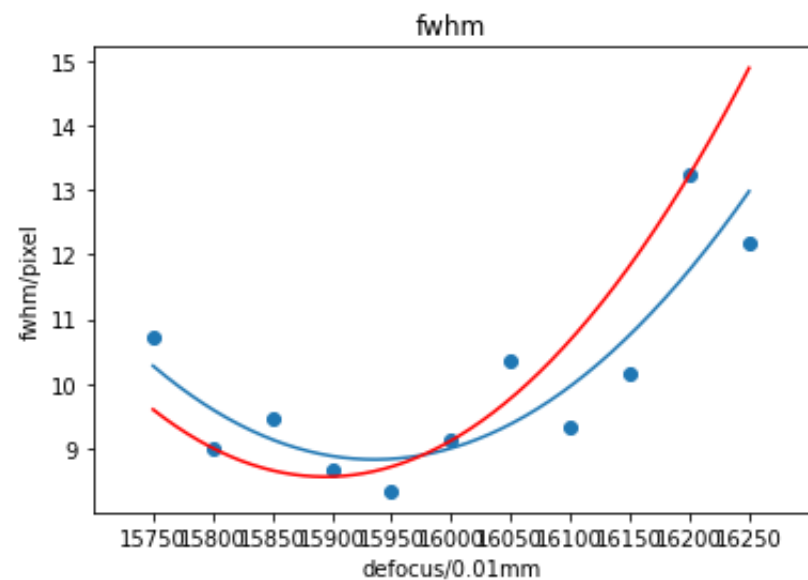
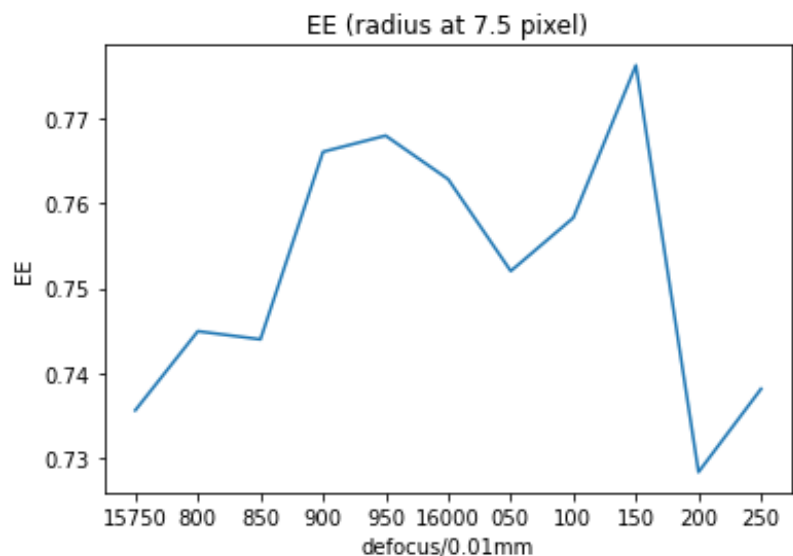
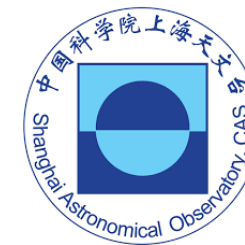
外场测试数据



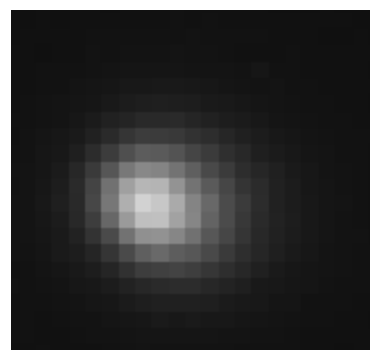
对任意星场拍摄不同焦面位置的一组图像，使用 `source extractor` 寻找点源，并分离出坏像元和星点（坏像元的 `peak` 与 `flux` 比值接近 1 : 1）



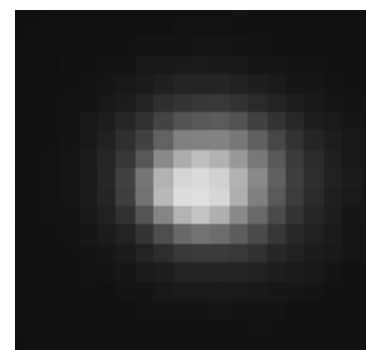
外场测试数据



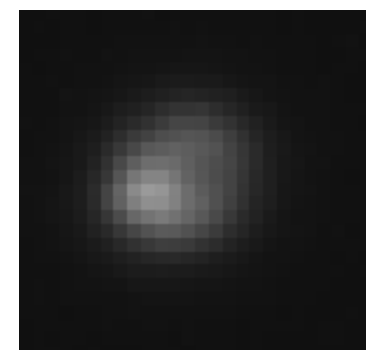
对每个焦面位置上的星点的 EE 和 fwhm 求平均值，EE 的最大值在 16200 位置上出现了异常的凸起，但 fwhm 的最小值在 15950 左右，这符合望远镜系统软件的结果以及直观感受。



15750

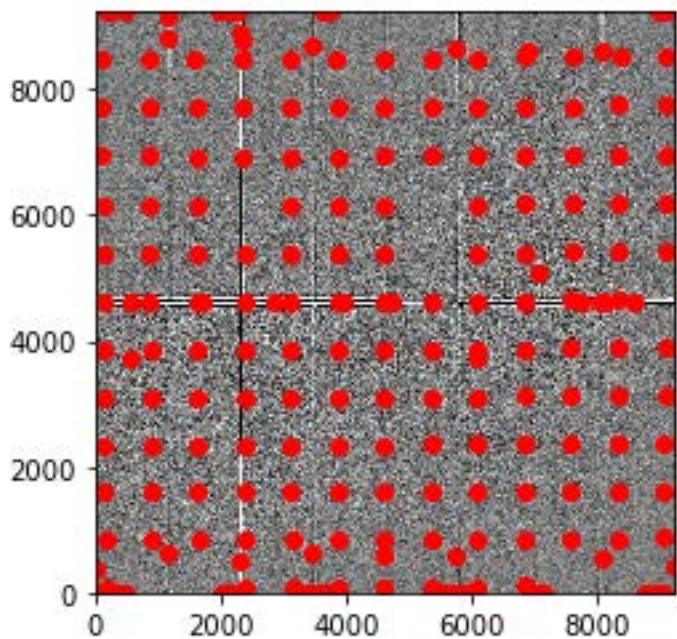
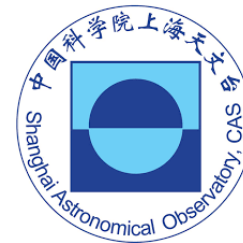


15950



16250

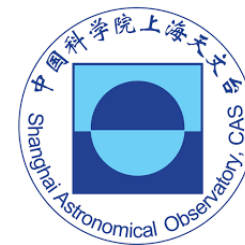
MCI小孔板测试数据



使用小孔板制造人工点源在探测器上产生 $12*13$ 的像点（有些地方没有有像点，有些地方因为误差会被算法误认为像点）。

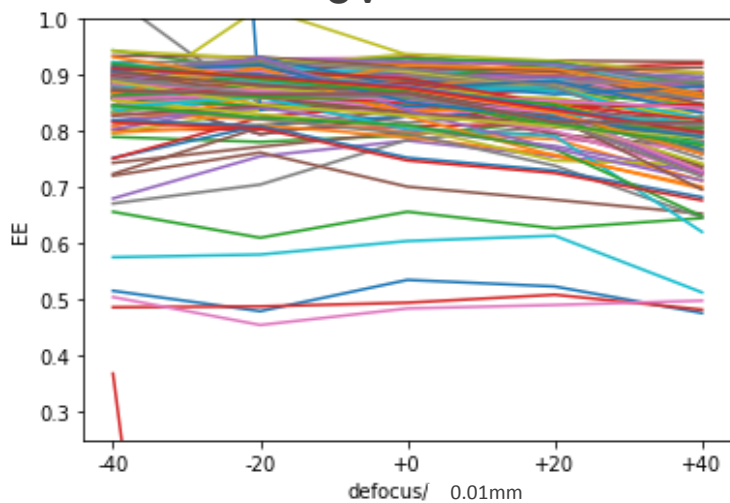
测试数据分为三个波段，对应 MCI 的三个通道（UV，VIS，NIR），每个波段在不同焦面位置上有数次曝光。

MCI小孔板测试数据

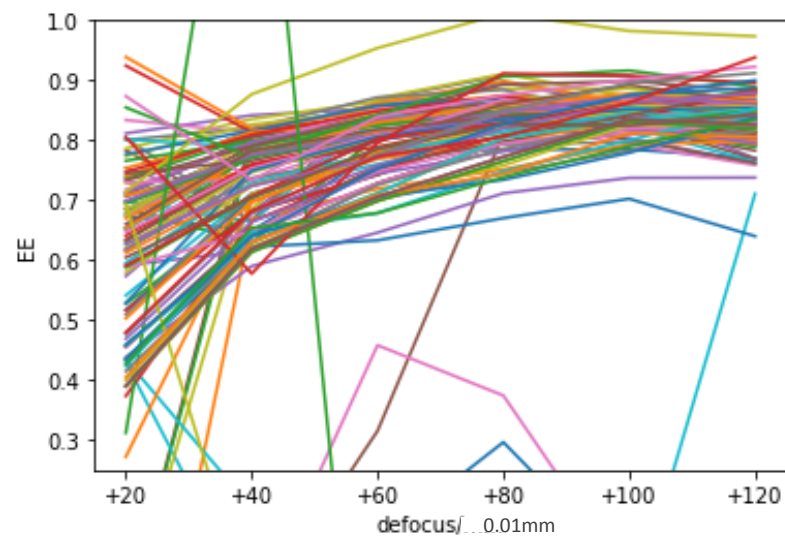


半径取2.5 pixel

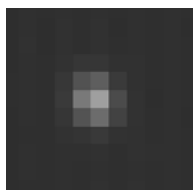
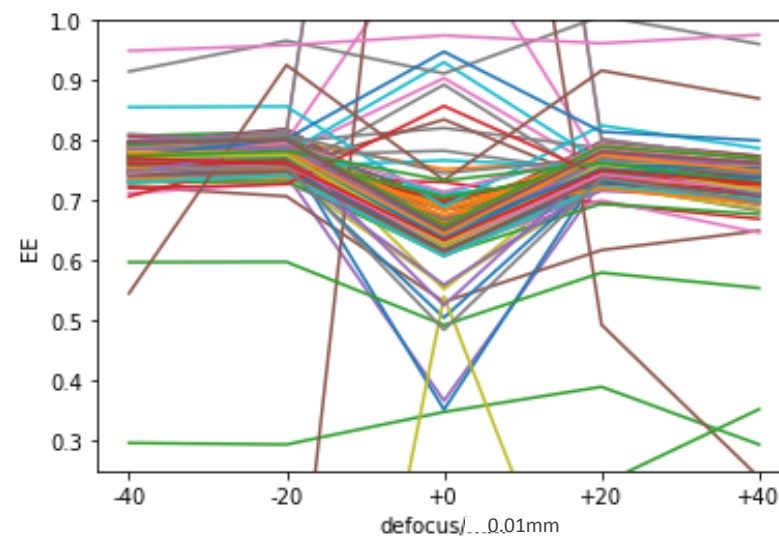
UV



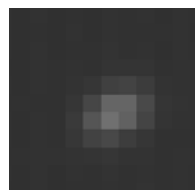
VIS



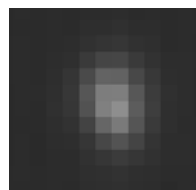
NIR



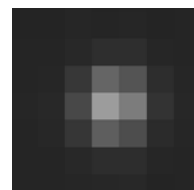
-40



+40



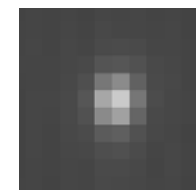
+20



+100



0



+40

近红外波段在0位置处的巨大误差原因暂时未知

-
- Thanks