HEPS 工程工作笔记

HEPS Technical Note

标题（Title）	聚焦器件误差问题分析		
作者 (Author)/ 系统 (System)	宫宇，杨福桂	日期 (Date)	2020-3-06
编号 (Serial No.)		页数 (Pages)	共　页 (含附件)

摘要 (abstract)**：**

束线聚焦器件聚焦能力误差对束线性能的影响分析。开展包括理论和实验方面的研究。

结论：

会　签 Concurred by			
有效性 Validation	**填表人 Prepared by**	**审　核 Reviewed by**	**批　准 Approved by**
签　名 Signature	XX		
日期 Date	XX（一定写上日期）		

1 无误差的情况

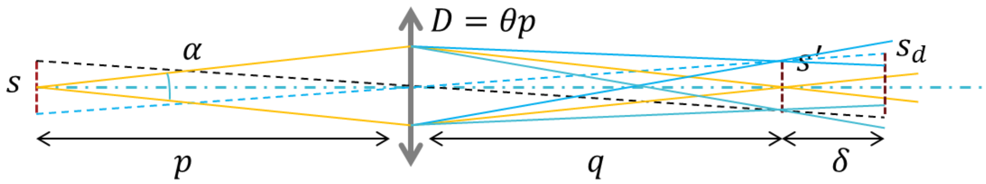


图 1-1 离焦误差计算图示

如上图 1-1 所示，考虑离焦量为δ时，观察平面上的光斑尺寸。根据缩放比，无离焦时的光斑尺寸为：

$$s'=\frac{sq}{p}$$

由光路图，可以获得整个光学系统的接收口径

$$D=\alpha p$$

有两种情况：

（1）观察点位置的移动δ为变量，系统聚焦性能不变。

根据几何关系，可以得到离焦光斑尺寸为

$$s_d=s\frac{\delta+q}{p}+D\frac{\delta}{q}=s\frac{\delta+q}{p}+\alpha\frac{p\delta}{q}$$

若离焦光斑尺寸是理想光斑尺寸的 k 倍，即$\boldsymbol{s_d}=\boldsymbol{k}s'$，则有离焦量限制为：

$$\delta=(k-1)\frac{s\frac{q}{p}}{\frac{s}{p}+\alpha\frac{p}{q}}$$

考虑近似问题，重组离焦光斑尺寸公式

$$s_d=s\frac{q}{p}+\delta\left(\frac{s}{p}+\frac{\alpha p}{q}\right)$$

其中，第一项$s\frac{q}{p}$是光源理想成像结果，第二项是离焦像差的光斑尺寸扩展，来自于两个方面，$\frac{s}{p}$是光源对聚焦镜的张角，$\frac{\alpha p}{q}$是样品处的发散角。对于 HEPS 来说，$\frac{s}{p}\ll\frac{\alpha p}{q}$，因此上式可以近似为：

$$s_d=s\frac{q}{p}+\frac{\alpha p}{q}\delta=\frac{s}{M}+\alpha M\delta$$

（2）系统的聚焦性能变化，例如 M 变化，导致离焦问题δ，此时δ是因变量。研究该问题时，此时观察平面$q+\delta=q_0$不变。

$$s_d=s\frac{\delta+q}{p}+D\frac{\delta}{q}=s\frac{q_0}{p}+\alpha p\frac{q_0-q}{q}$$

2 聚焦镜问题

2.1 单纯离焦误差

考虑反射镜的误差问题。

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f}=\varphi=\frac{2}{Rsin\theta}$$

其中，R 是子午面形曲率半径，θ是掠入射角。
当聚焦镜的焦距是自变量时，φ的改变引起焦点光斑的变化。

$$s_d=s\frac{q_0}{p}+\alpha p\frac{q_0-q}{q}=\frac{s}{M_0}+\alpha pq_0(\varphi-\varphi_0)$$

当离焦量是自变量时，δ的改变引起焦点光斑的变化

$$s_d=\frac{s}{M}+\alpha M\delta$$

$$M=\frac{2p}{Rsin\theta}-1$$

可见，当反射镜的面形或者光线掠入射角的变化会引起系统缩放比 M 的改变，进而引起聚焦光斑尺寸的变化。
对于 HEPS 来说，需要区分面形误差是否是聚焦光斑尺寸的主要贡献者。

2.2 离焦误差-面形误差耦合

假设反射镜的面形误差为 σ RMS，则面形误差引起的光斑扩展为

$$s_{slope}=2q_0\sigma$$

q_0是理想焦点位置，也是观察点位置。
当面形误差是主要贡献者时，$s_{d0}=2q_0\sigma$，与离焦误差综合作用：

$$s_{dr}=\sqrt{(2q_0\sigma)^2+\left(\frac{s}{M_0}+\alpha pq_0(\varphi-\varphi_0)\right)^2}$$

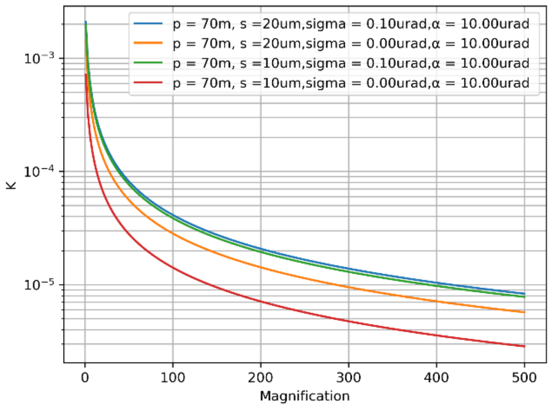
这里认为，离焦引起的光斑扩展比为：

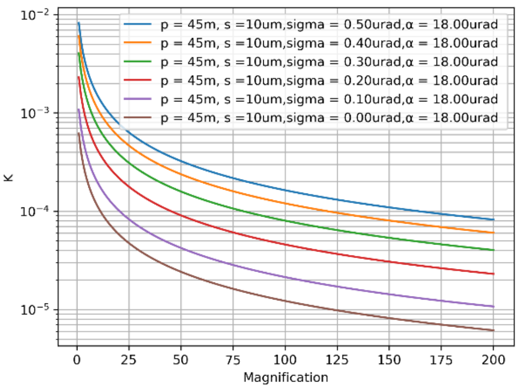
$$s_{dr}=\sqrt{(2q_0\sigma)^2+\left(\frac{s}{M_0}+\alpha pq_0(\varphi-\varphi_0)\right)^2}$$

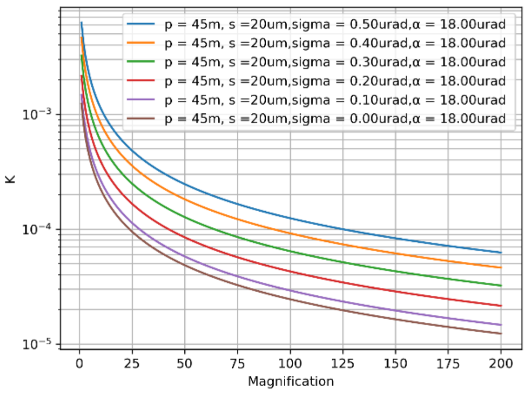
$$k=\frac{s_{dr}}{s_{d0}}=\frac{\sqrt{(2q_0\sigma)^2+\left(\frac{s}{M_0}+\alpha pq_0(\varphi-\varphi_0)\right)^2}}{\sqrt{(2q_0\sigma)^2+\left(\frac{s}{M_0}\right)^2}}$$

$$\varphi-\varphi_0=\frac{\sqrt{(k^2-1)(2q_0\sigma)^2+k^2\left(\frac{s}{M_0}\right)^2}-\frac{s}{M_0}}{\alpha pq_0}$$

$$\mathrm{K}=\frac{\varphi-\varphi_0}{\varphi_0}=\frac{\varphi-\varphi_0}{(p+q_0)/pq_0}=\frac{1}{\alpha}\frac{1}{M_0+1}\left[\sqrt{(k^2-1)(2\sigma)^2+k^2\left(\frac{s}{p}\right)^2}-\frac{s}{p}\right]$$







微米聚焦模式下，缩放比一般为 50，若面形误差为 0.3 μrad，那么对应的 2e-4，如果掠入射角为 2 mrad，那么对应的掠入射角的误差要求控制在 400 nrad。

忽略这部分的分析

这里认为，离焦引起的光斑扩展比为：

$$\mathrm{k}=\frac{s_{dr}}{s_{d0}}=\sqrt{\left(\frac{\frac{s}{M_0}+\alpha p q_0(\varphi-\varphi_0)}{2q_0\sigma}\right)^2+1}$$

进一步地有

$$\left|\frac{s}{M_0}+\alpha p q_0(\varphi-\varphi_0)\right|=2q_0\sigma\sqrt{k^2-1}$$

由此可以获得光焦度的变化容许范围，

对于 $\varphi-\varphi_0>0$的情况，

$$\varphi-\varphi_0=\frac{2q_0\sigma(k^2-1)-\frac{s}{M_0}}{\alpha p q_0}=\frac{2\sigma\sqrt{k^2-1}}{\alpha p}-\frac{s}{\alpha p^2}$$

$$\frac{\varphi-\varphi_0}{\varphi_0}=\frac{\varphi-\varphi_0}{(p+q_0)/pq_0}=\left(2\sigma\sqrt{k^2-1}-\frac{s}{p}\right)\frac{1}{\alpha}\frac{1}{M_0+1}$$

可见，$\varphi-\varphi_0$与面形误差σ和 k 容限密切相关。

k = 1.1 时，

$$\mathrm{K}=\frac{\varphi-\varphi_0}{\varphi_0}=\left(\frac{0.92\sigma}{\alpha}-\frac{s}{\alpha p}\right)\frac{1}{M_0+1}$$

若让 K>0，则有

$$\frac{0.92\sigma}{\alpha}>\frac{s}{\alpha p}$$

得到

$$\sigma>\frac{s}{0.92p}$$

即该种情形时针对的是面形误差大于光源本征张角。

对于$\varphi-\varphi_0<0$的情况，

$$\varphi-\varphi_0=\frac{\pm 2q_0\sigma(k^2-1)-\frac{s}{M_0}}{\alpha p q_0}=\frac{\pm 2\sigma\sqrt{k^2-1}}{\alpha p}-\frac{s}{\alpha p^2}$$

$$\frac{\varphi-\varphi_0}{\varphi_0}=\frac{\varphi-\varphi_0}{(p+q_0)/pq_0}=\left(\pm 2\sigma\sqrt{k^2-1}-\frac{s}{p}\right)\frac{1}{\alpha}\frac{1}{M_0+1}$$

由于

$$\frac{\varphi-\varphi_0}{\varphi_0}=\frac{R-R_0}{R}\text{或者}\frac{\theta-\theta_0}{\theta}$$

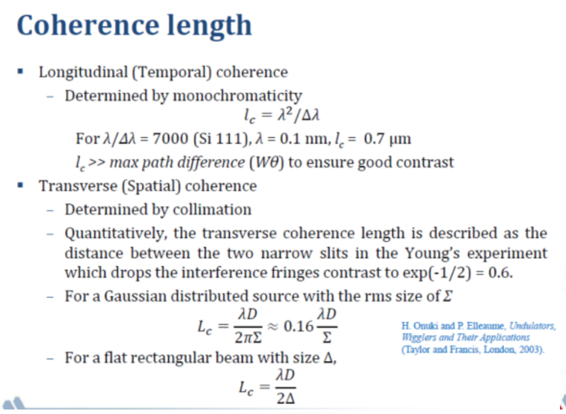
K也可以作为曲率半径或者掠入射角的变化百分比。

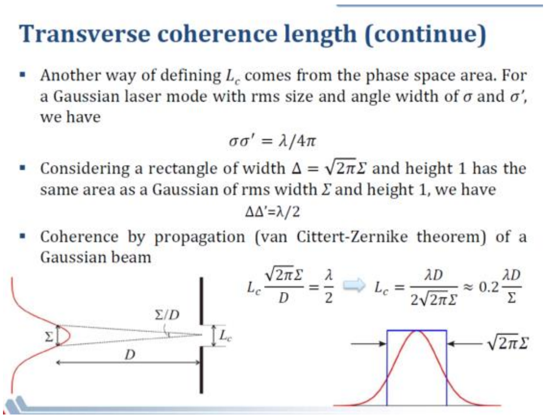
2.3 衍射效应

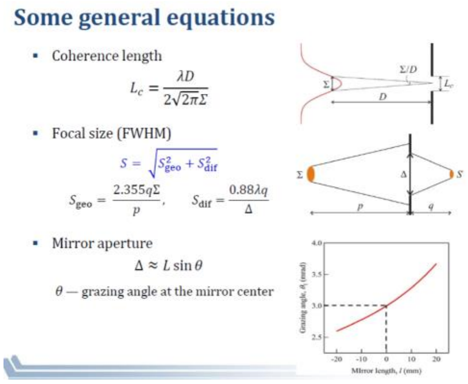
注意这里没有考虑衍射效应，对于大缩放比成像，当接收口径比较小时，衍射的光斑扩展占主要作用。因此，该数据的有效性需要再讨论。
考虑波动，衍射角为

$$\Sigma_{dif} = 0.88\lambda/\Delta$$

Δ是口径尺寸。样品处的光斑尺寸贡献为$q_0\Sigma_{dif}$







2.4 色散问题

当光学系统工作在粉光模式下时，需要考虑折射率透镜的色散效应所引起的光斑扩展问题。如图所示，光源尺寸 s，接收口径$D = \alpha p$。

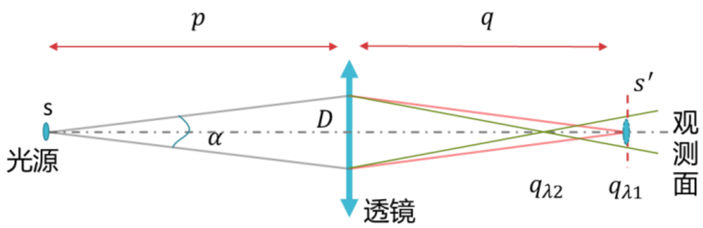


图 2-1 聚焦透镜色散效应分析

考虑两个波长λ_1和λ_2，

$$\lambda_2 = (1+k)\lambda_1$$

在λ_1的焦平面上，可以推导λ_2的光斑尺寸为

$$s'_{\lambda 2} = \left(1+\frac{1}{M}\right)2kD = 2\left(1+\frac{1}{M}\right)k\alpha p$$

这里假设，离焦光斑扩展量远大于系统光斑缩放成像尺寸。

对于折射率透镜来说，折射率系数满足：

$$\delta = 2.7(\lambda^2 \rho Z/A)10^{-6}$$

其中，波长的单位为埃，密度为 g/cm3，z 是原子序数，A 是原子质量（g）。

折射率透镜的光焦度为

$$\varphi = 2\delta/R$$

可见，光焦度与光子能量的二次方成反比。由此，可以计算光焦度的色散变化：

$$\varphi_{\lambda_2} = \varphi_{\lambda_1}[(1+k)^2 - 1]$$

$$\Delta\varphi = \varphi_{\lambda_1} - \varphi_{\lambda_2} = 2k\varphi_{\lambda_1}$$

3 仿真验证

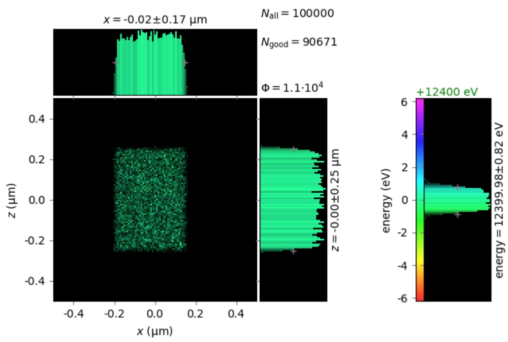
为了验证理论推导，下面使用追迹软件仿真 KB 镜的计算。

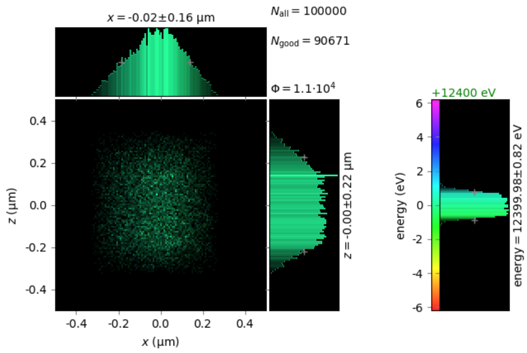
3.1 平顶几何光源-无误差-几何光学

在理论推导上，假设接收口径内的光是均匀分布的。因此，在具体应用于实际光源之前，可以先计算。不考虑反射镜。

程序调试过程：

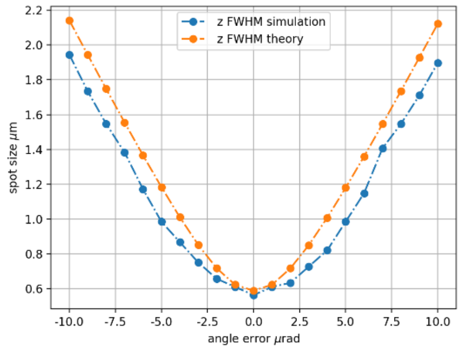
（1）焦点位置的确定是否正确



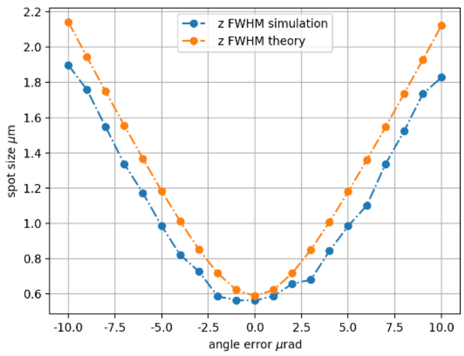


光源平顶型和高斯型；

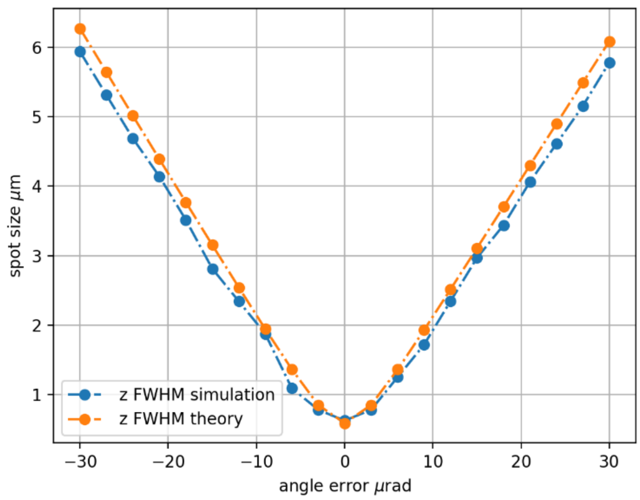
误差曲线选择中间值还是累积值；
由于计算中光源尺寸为 sigma 统计值，因此需要将光斑尺寸模型调整为高斯分布值。



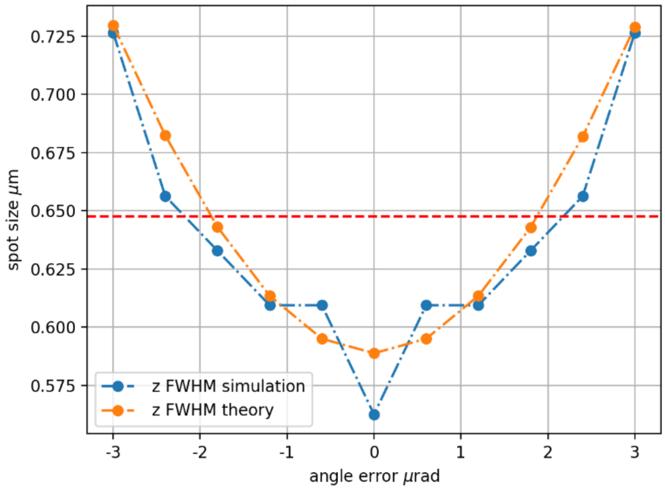
中心区域对比，二者没有明显差异



扩大至一定程度

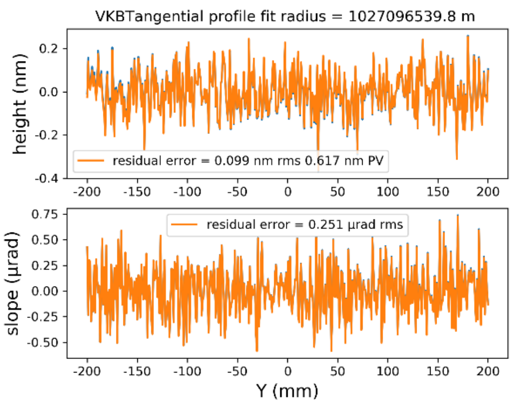


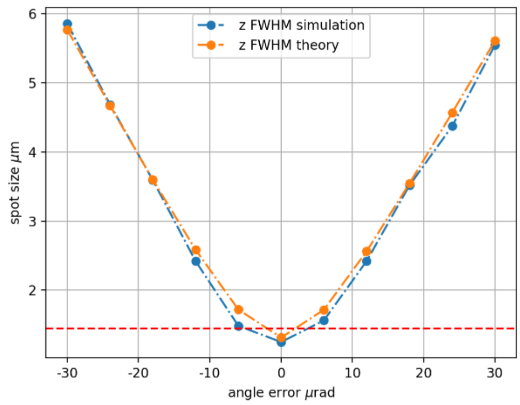
误差对比曲线



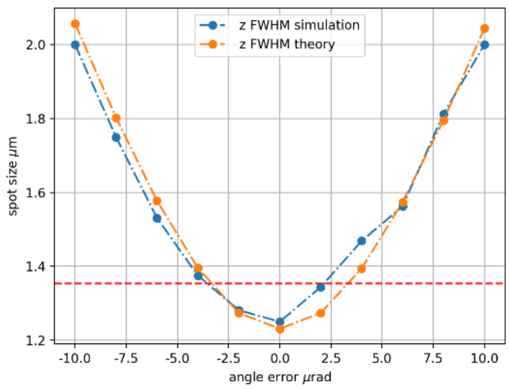
3.2 几何面形误差

离焦项有 0.9 的修正

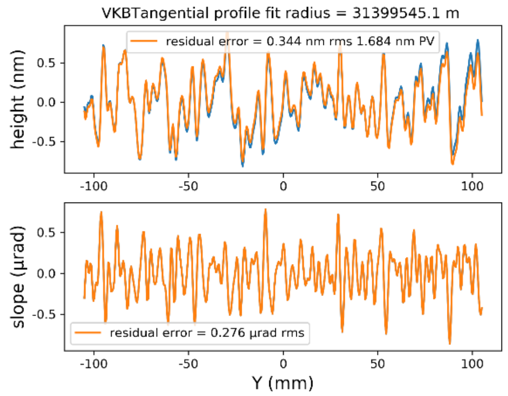


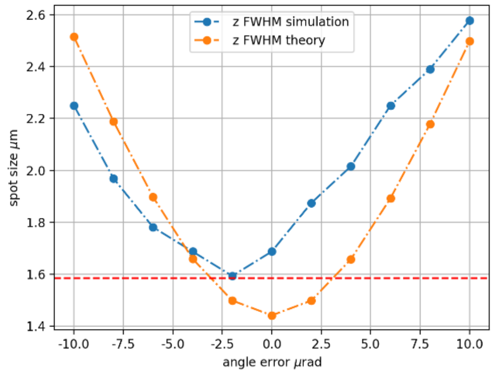


缩小角度范围，理论曲线使用参数 0.23urad rms，修正系数 0.8。

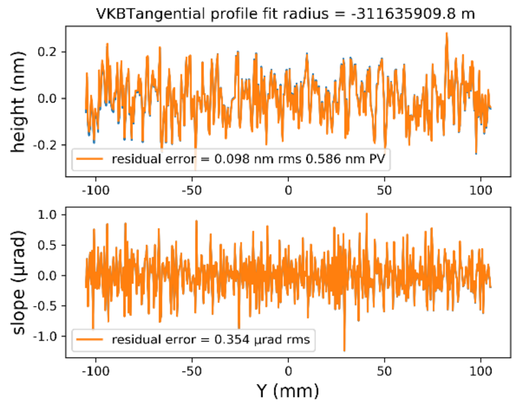


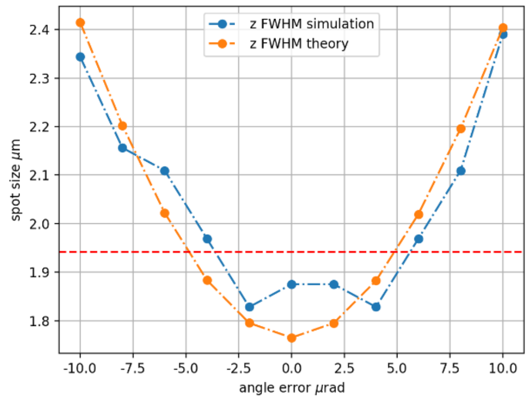
改变面形，
离焦项修正因子 0.8





离焦项修正因子 0.8，





由此可见公式

$$s_{dr} = \sqrt{(2*2.35q_0\sigma)^2 + \left(\frac{2.35s}{M_0}\right)^2 + \left(t_0\alpha p q_0(\varphi - \varphi_0)\right)^2}$$

其中，t_0是修正因子，当离焦误差比较大时，t_0比较小
由上个图可以看出 M=40，无误差的要求为 2urad 的水平，百分比为 1e-3；有误差时，要求为 5urad 的水平，百分比为 2.5e-3。与理论计算值相当

$$\mathrm{k} = \frac{s_{dr}}{s_{d0}} = \frac{\sqrt{(2*2.35q_0\sigma)^2 + \left(\frac{2.35s}{M_0}\right)^2 + \left(t_0\alpha p q_0(\varphi - \varphi_0)\right)^2}}{\sqrt{(2*2.35q_0\sigma)^2 + \left(\frac{2.35s}{M_0}\right)^2}}$$

$$\varphi-\varphi_0=\frac{\sqrt{(k^2-1)\left[(2*2.35q_0\sigma)^2+\left(\frac{2.35s}{M_0}\right)^2\right]}}{t_0\alpha pq_0}$$

最后，修正为

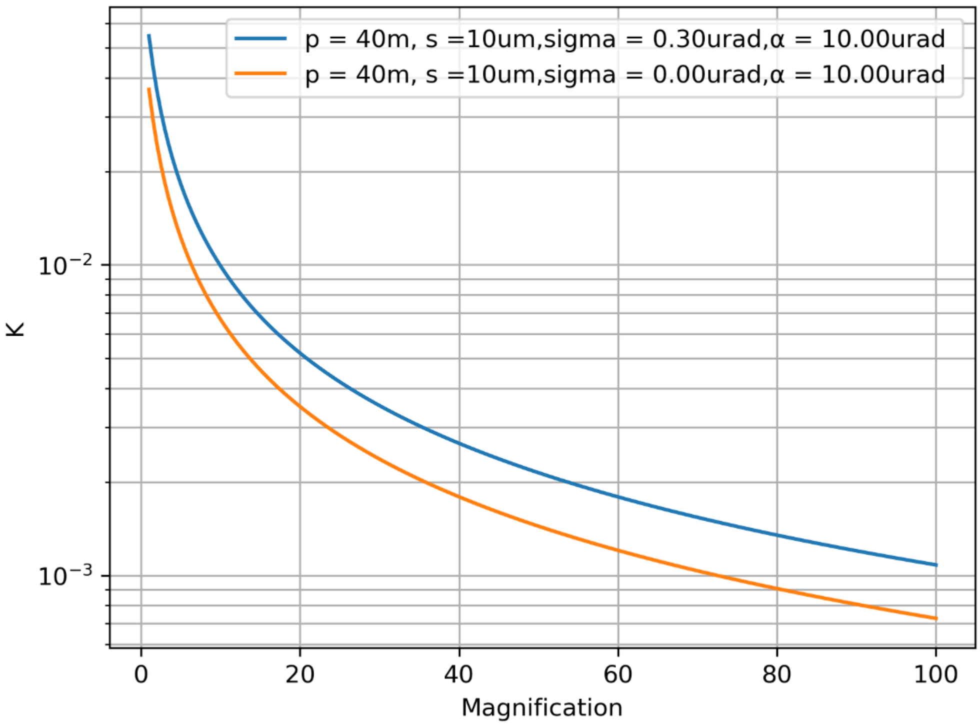
$$\mathrm{K}=\frac{\varphi-\varphi_0}{\varphi_0}=\frac{\varphi-\varphi_0}{(p+q_0)/pq_0}=\frac{1}{\alpha t_0}\frac{1}{M_0+1}\sqrt{(k^2-1)\left[(2*2.35\sigma)^2+\left(\frac{2.35s}{p}\right)^2\right]}$$

考虑波动，$\Sigma_{dif}=0.88\lambda/\Delta$为衍射角。

$$s_{dr}=\sqrt{\left(q_0\Sigma_{dif}\right)^2+(2*2.35q_0\sigma)^2+\left(\frac{2.35s}{M_0}\right)^2+\left(t_0\alpha pq_0(\varphi-\varphi_0)\right)^2}$$

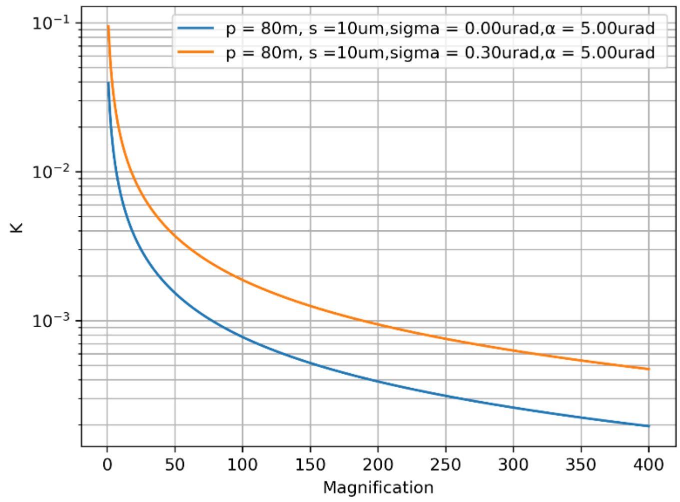
$$\mathrm{K}=\frac{1}{\alpha t_0}\frac{1}{M_0+1}\sqrt{(k^2-1)\left[\left(\Sigma_{dif}\right)^2+(2*2.35\sigma)^2+\left(\frac{2.35s}{p}\right)^2\right]}$$

仅考虑几何面形误差，



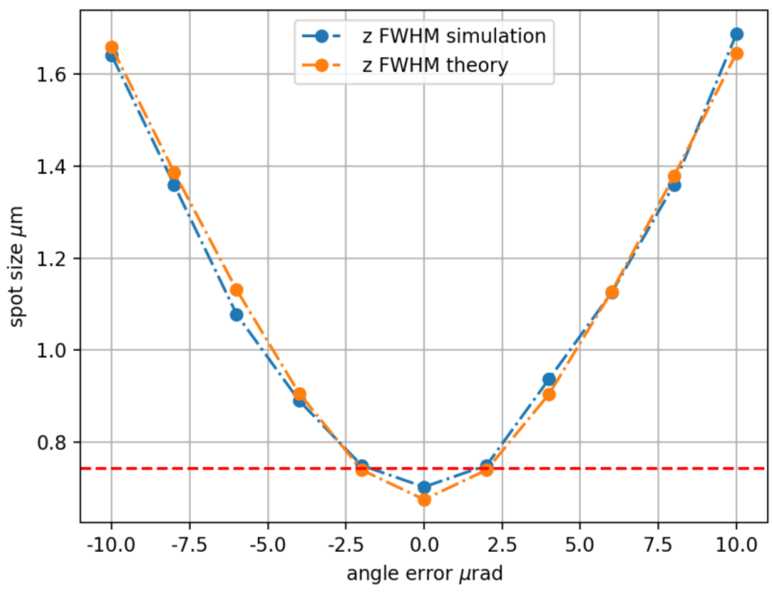
3.2.1 大缩放比的情况计算

改变缩放比为 200，p=80m，接收角为 5urad，

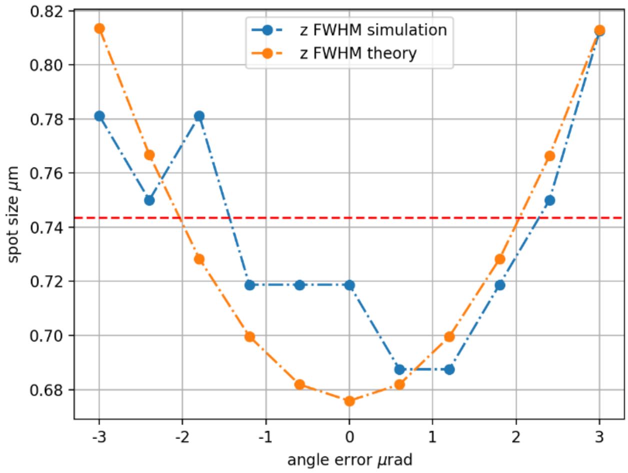


有误差

面形误差 0.375urad rms， t0=0.75

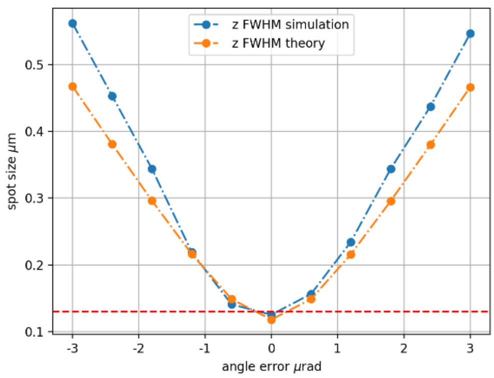


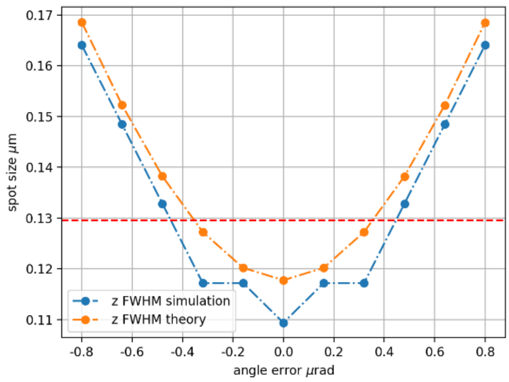
缩小范围至 3urad，计算结果如下，可见误差容许为 2urad，误差贡献为主时，与缩放比无关，略高于理论曲线结果。



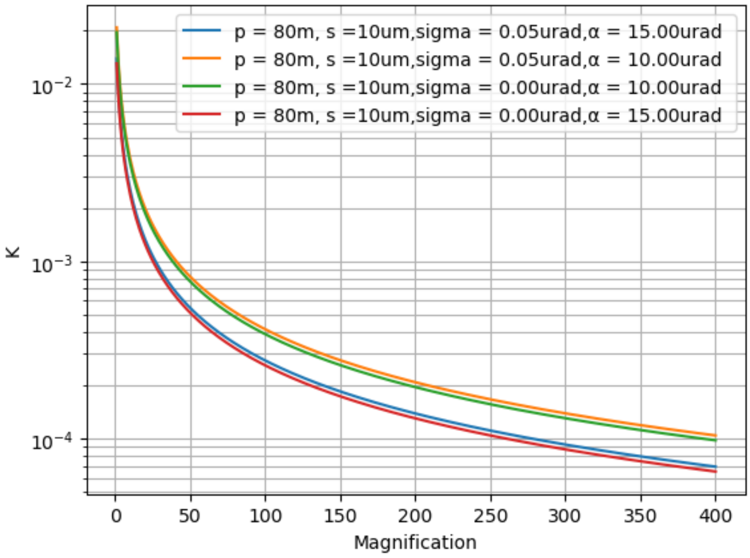
无误差

无误差时，角度为 400nrad，比例为 2e-4，理论值为 3e-4，追迹结果更严格。





从计算结果来看，该公式可以近似成立。



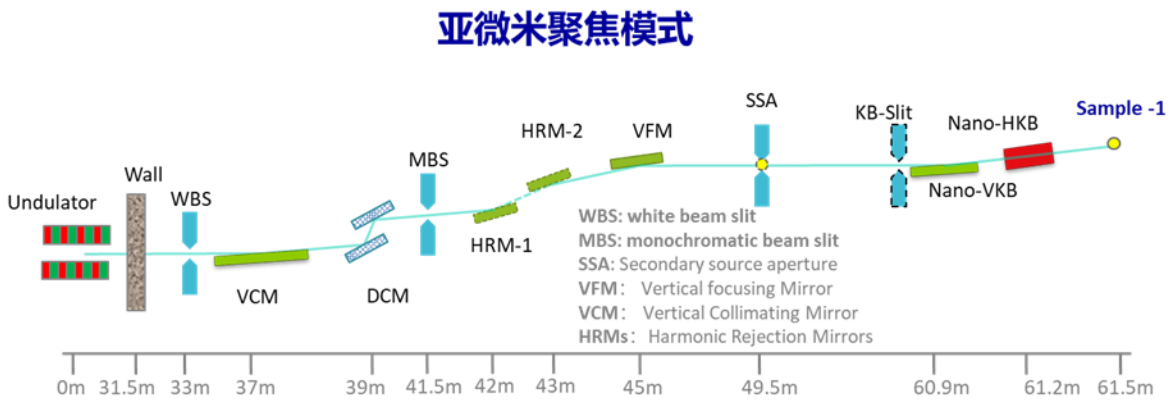
总得结果，

$$s_{dr} = \sqrt{\left(q_0\Sigma_{dif}\right)^2 + (2*2.35q_0\sigma)^2 + \left(\frac{2.35s}{M_0}\right)^2 + \left(t_0\alpha p q_0(\varphi - \varphi_0)\right)^2}$$

$$K = \frac{1}{\alpha t_0}\frac{1}{M_0+1}\sqrt{(k^2-1)\left[\left(\Sigma_{dif}\right)^2 + (2*2.35\sigma)^2 + \left(\frac{2.35s}{p}\right)^2\right]}$$

仅考虑几何面形误差，

3.3 B8 束线分析



器件	位置（m）	长度（mm）	有效接收口径（μrad×μrad）
光源			
白光狭缝	35	0.875×0.875	25×25
VCM	37	544	25×25
单色器	39		25×25
单色器狭缝	41.5		18×18
	Note：为了模拟能扫，狭缝需要考虑扫描的功能		
HRMs	42-43	450	18×20.7
VFM	45	450	18×20.7
	Note：考虑到出高变化，反射镜加长 60mm		
二次光源狭缝	49.5	-	-
	Note：考虑能扫变化，		
亚微米 VKB	60.9	300	5.4(V)
亚微米 HKB	61.2	300	8.3(H)
样品点	**61.5**		

水平直接聚焦，垂直二次聚焦：

$$M_H = \frac{61.2}{0.3} = 204$$

$$M_V = \frac{37}{4.5}\frac{11.4}{0.6} = 156$$

水平缩放比比较大，水平尺寸：