

HEPS 工程工作笔记

HEPS Technical Note

标题 (Title)	KB 镜参数设置问题		
作者 (Author)/ 系统 (System)	杨福桂	日期 (Date)	2020-3-25
编号 (Serial No.)		页数 (Pages)	共 页 (含附件)
摘要 (abstract): <p>KB 反射镜是 HEPS 束线上实现纳米聚焦的主要元件。然而， XRT 仿真软件中 KB 镜参数设置错误会引起焦点位置和光斑尺寸的误差，特别是对于纳米聚焦应用。</p> <p>本文通过理论推导，计算 KB 镜的位置、光线方向、样品点位置等，并对比 XRT 追迹计算结果。试图发现问题所在，并给出合理的参数配置。</p> <p>XRT 的版本为 1.3.3，是现阶段最新版本。</p> <p>结论：</p> <p>[1]. 从对比情况来看，由于光斑位置基本与理论结果一致，光线的传播方向误差比较小。</p> <p>[2]. 主要存在 VKB 和 HKB 焦点位置不匹配的问题，需要重新调节 HKB 镜的 q 值。</p> <p>[3]. 在缩放比值比较大时，光斑分布呈现明显的长拖尾问题。</p> <p>[4]. 上面三个结论时针对点光源。当考虑实际光源尺寸时，光源尺寸的扩展远大于这种误差，因此，在大多数情况下不影响我们的问题研究。离焦的敏感度也随之下降。</p>			
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 系统坐标系

参考 XRT 中全局坐标系的定义，图 1-1 给出了本文讨论的坐标系设置。光线传输方向为 y 轴，横向为 xz 平面。

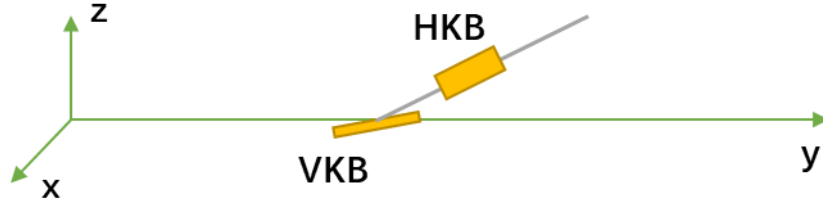


图 1-1 XRT 仿真的全局坐标系设置

2 理论推导

考虑如图 2-1 的布局，反射镜的掠入射角为 θ ，下面将从基本旋转公式推导。

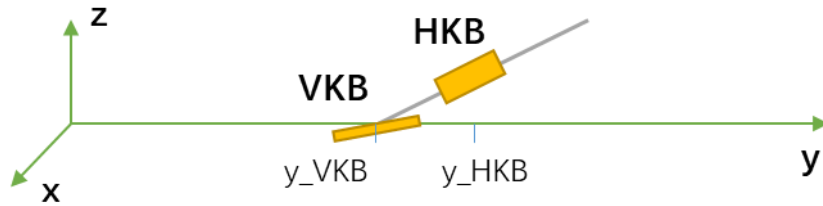


图 2-1 KB 镜的布局参数

2.1 角度方向信息

基本依据是：对于特定的反射面，表面反射的入射波矢 \vec{t}_{in} 和出射波矢 \vec{t}_{out} 之间满足关系

$$\vec{t}_{out} = \vec{t}_{in} - 2(\vec{t}_{in} \cdot \vec{n})\vec{n}$$

其中， \vec{n} 是反射面的法向矢量。

2.1.1 确定反射镜的旋转矩阵

以 VKB 为例，绕各轴的旋转矩阵表示为

$$\vec{T}_{vkb,x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_{vkb} & \sin\alpha_{vkb} \\ 0 & -\sin\alpha_{vkb} & \cos\alpha_{vkb} \end{bmatrix}, \quad \vec{T}_{vkb,y} = \begin{bmatrix} \cos\beta_{vkb} & 0 & \sin\beta_{vkb} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta_{vkb} & 0 & \cos\beta_{vkb} \end{bmatrix},$$

$$\vec{T}_{vkb,z} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_{vkb} & \sin\gamma_{vkb} & 0 \\ -\sin\gamma_{vkb} & \cos\gamma_{vkb} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

按照 XRT 软件的设置，旋转顺序为 RyRzRx，总得旋转量为

$$\vec{T}_{vkb,total} = \vec{T}_{vkb,x} \vec{T}_{vkb,z} \vec{T}_{vkb,y}$$

对于 VKB, $\alpha_{vkb} = \theta$, $\beta_{vkb} = 0$, $\gamma_{vkb} = 0$,

$$\vec{T}_{vkb,total} = \vec{T}_{vkb,x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos[\theta] & -\sin[\theta] \\ 0 & \sin[\theta] & \cos[\theta] \end{bmatrix}$$

对于 HKB, $\alpha_{hkb} = 2\theta$, $\beta_{hkb} = -\pi/2$, $\gamma_{hkb} = \theta$,

$$\vec{T}_{hkb,total} = \vec{T}_{hkb,x} \vec{T}_{hkb,z} \vec{T}_{hkb,y}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -\sin[\theta] & -\cos[\theta] \\ -\sin[2\theta] & \cos[\theta]\cos[2\theta] & -\cos[2\theta]\sin[\theta] \\ \cos[2\theta] & \cos[\theta]\sin[2\theta] & -2\cos[\theta]\sin[\theta]^2 \end{bmatrix}$$

2.1.2 确定反射镜的法向量

反射镜的初始法向量均为

$$\vec{n}_{initial} = [0, 1, 0]$$

旋转后的法向量为：

$$\vec{n}_{vkb} = \vec{T}_{vkb,total} \vec{n}_{initial} = [0, -\sin[\theta], \cos[\theta]]$$

$$\vec{n}_{hkb} = \vec{T}_{hkb,total} \vec{n}_{initial} = [-\cos[\theta], -\cos[2\theta]\sin[\theta], -2\cos[\theta]\sin[\theta]^2]$$

2.1.3 确定光线的传输方向

入射光线方向沿 y 轴，方向矢量为

$$\vec{t}_0 = [0, 1, 0]$$

经过 VKB 后的光线方向矢量为：

$$\vec{t}_{vkb,out} = \vec{t}_0 - 2(\vec{t}_0 \cdot \vec{n}_{vkb})\vec{n}_{vkb} = [0, \cos[2\theta], \sin[2\theta]]$$

经过 HKB 后的光线方向矢量为：

$$\vec{t}_{hkb,out} = \vec{t}_{vkb,out} - 2(\vec{t}_{vkb,out} \cdot \vec{n}_{hkb})\vec{n}_{hkb} = \left[-\sin[2\theta], \cos[2\theta]^2, \frac{1}{2}\sin[4\theta] \right]$$

由此可见，HKB 的 z 轴的出射光线方向为 $\frac{1}{2}\sin[4\theta]$ ，而不是 $\sin[2\theta]$ 。

2.2 位置信息

在已知传输光线方向矢量的情况下，可以确定光线路径中的坐标位置，依据是

$$\vec{l}_{end} = \vec{l}_{start} + S\vec{t}$$

$$\frac{\vec{p}_{end} - \vec{p}_{start}}{S} = \vec{t}$$

其中，S 是路径长度。

原点坐标为

$$\vec{l}_o = [0, 0, 0]$$

VKB 位置为 y_{VKB} ，全局坐标为：

$$\vec{l}_{VKB} = [0, y_{VKB}, 0]$$

HKB 位置为 y_{HKB} ，KB 镜间的距离为

$$d_{KB} = (y_{HKB} - y_{VKB})/\cos[2\theta]$$

由此可以确定 HKB 的全局坐标为

$$\vec{l}_{HKB} = \vec{l}_{VKB} + \vec{t}_{vkb,out}d_{KB} = [0, y_{HKB}, d_{KB}\tan[2\theta]]$$

HKB 到样品的距离即 q_{HKB} 为

$$q_{HKB} = q_{VKB} - d_{KB}$$

同理，可以计算样品处的全局坐标为：

$$\vec{l}_{somp} = \vec{l}_{HKB} + \vec{t}_{vkb,out}q_{HKB}$$

3 仿真验证

3.1 小缩放比情况

考虑： $q_{VKB} = 4000mm$ ， $y_{VKB} = 40000mm$ ， $y_{HKB} = 40400mm$ ， $\theta = 0.004rad$

HKB 位置:

[0,40400.0,3.20006826841434]

HKB 出射光线的方向矢量:

[−0.00799991466693974,0.999936001365322,0.00799965867103571]

样品位置:

[−28.7995903993446,43999.756805393,31.9987370857812]

追迹结果如下,从追迹结果来看,坐标中心位置与理论值非常接近。然而 VKB 和 HKB 存在焦点不重合的问题。

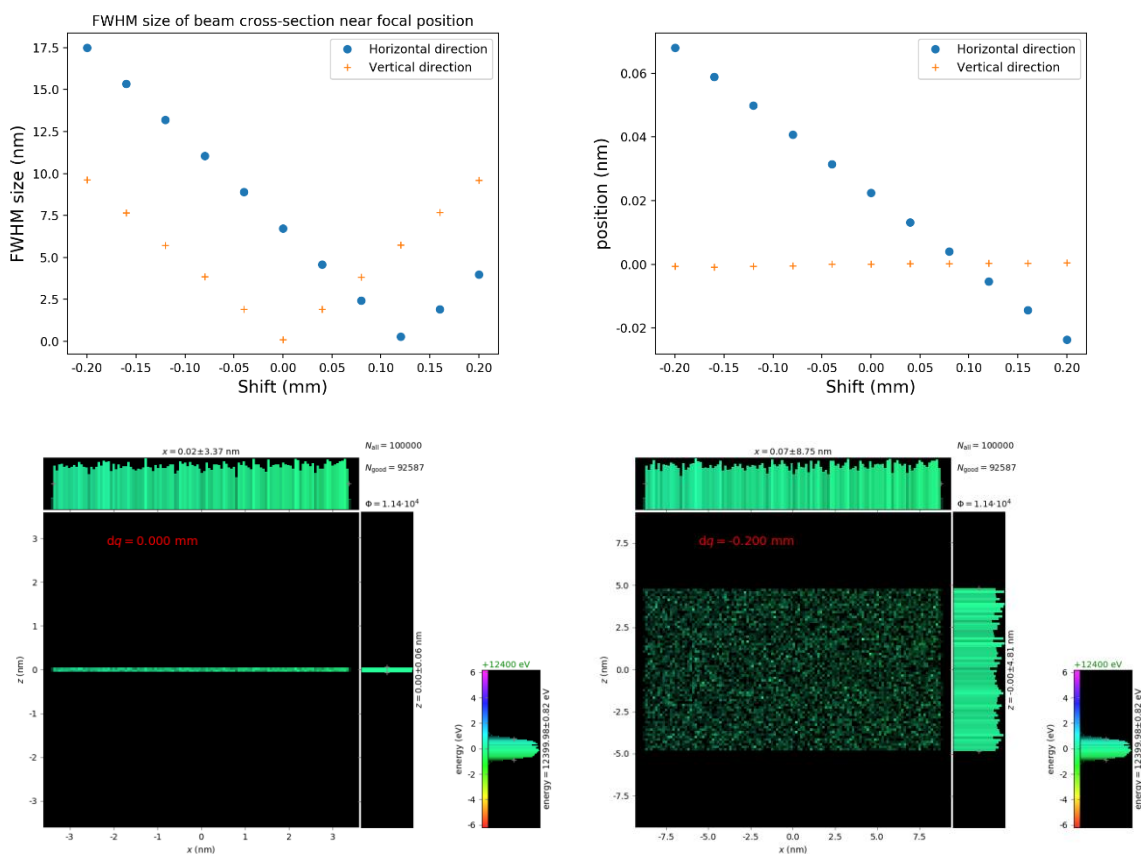


图 3-1 缩放比 $M_{\text{VKB}}=10$ 时的追迹结果,分别对应光斑大小、位置曲线,以及两个位置点的分布

HKB 的 q 值调整调制-0.12mm 后,可以让两个反射镜的焦点位置重合。

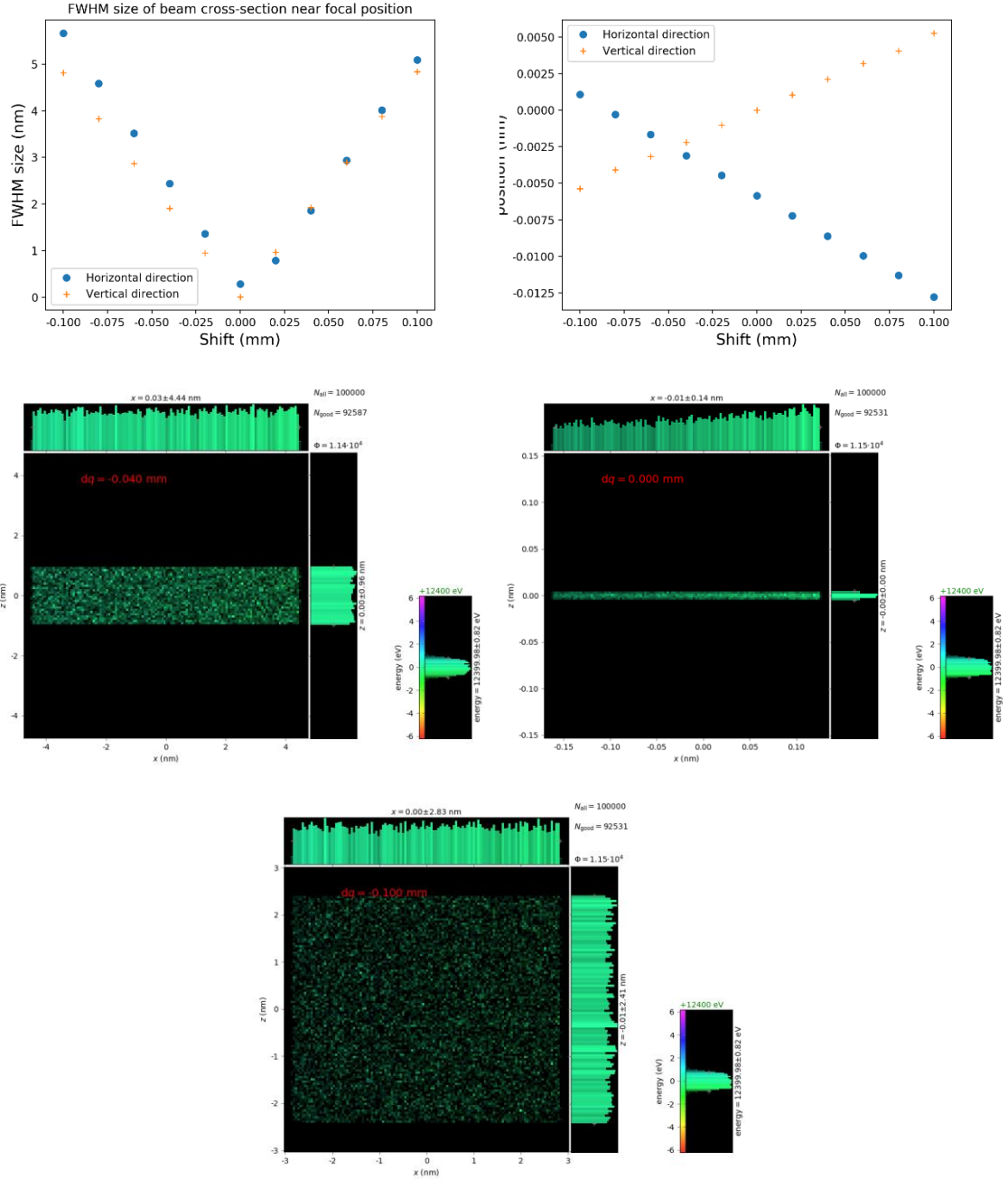
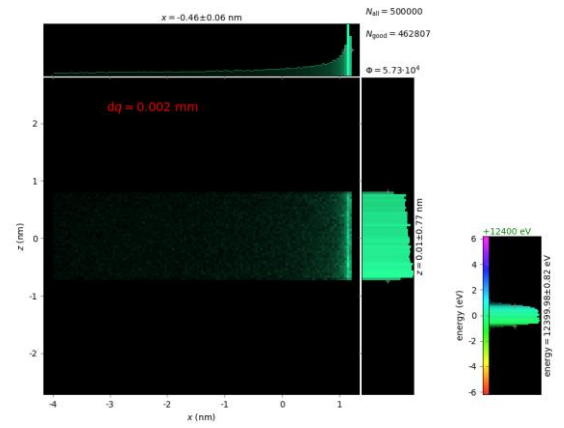
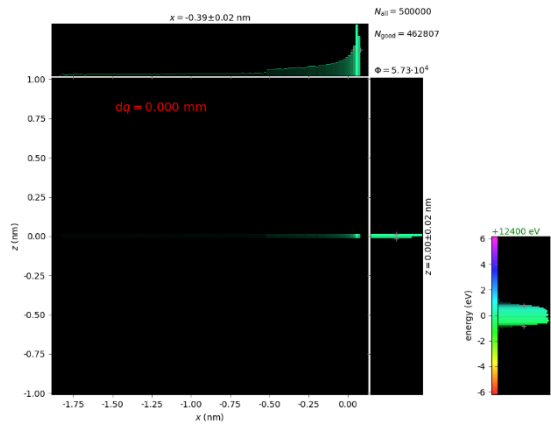
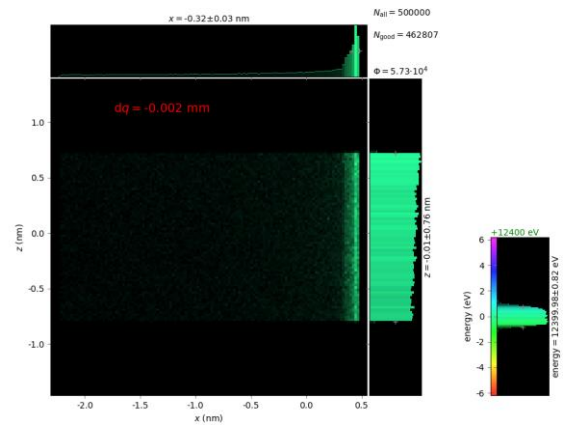
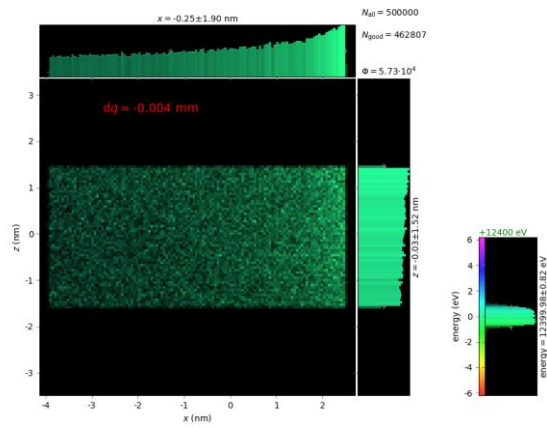
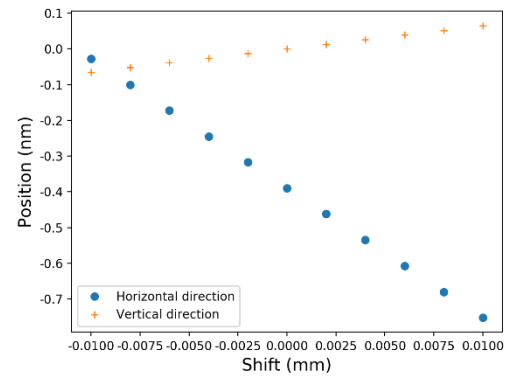
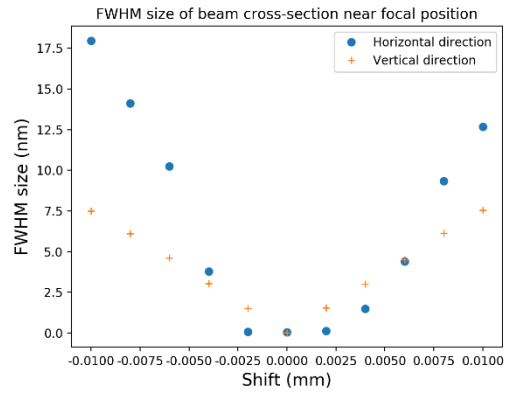


图 3-2 缩放比 $M_{VKB}=10$ 时的追迹结果，分别对应光斑大小、位置曲线，以及两个位置点的分布；这里调整了 HKB 的 q 值 0.12mm

3.2 大缩放比情况

考虑: $q_{VKB} = 500\text{mm}$, $y_{VKB} = 79000\text{mm}$, $y_{HKB} = 79300\text{mm}$, $\theta = 0.004\text{rad}$ 。可以看到，稍微的位置偏移将会导致很大的离焦误差。焦点不重合问题仍需要通过调节 KB 镜的压弯来解决， q_{HKB} 的调整量为 $7\mu\text{m}$ 。



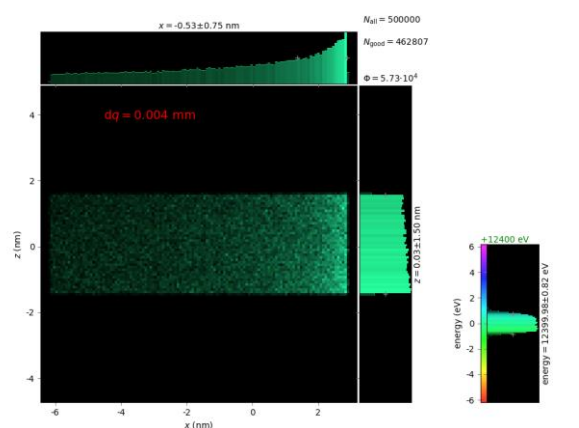
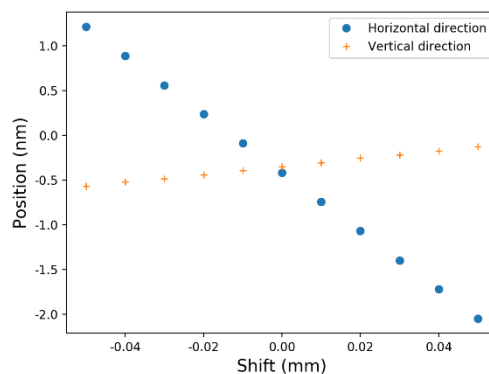
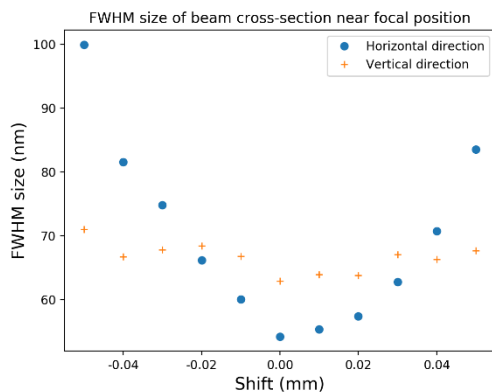
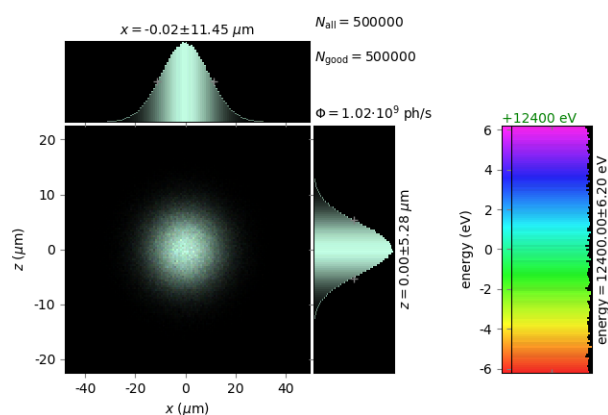


图 3-4 缩放比 $M_{\text{HKB}}=400$ 时的追迹结果，分别对应光斑大小、位置曲线，以及两个位置点的分布；

考虑实际光源，使用 B2 束线的插件件，光源尺寸为 $22.90\ \mu\text{m} \times 11.56\ \mu\text{m}$ ，系统缩放比为 $M_{\text{HKB}}=79.3/0.2=396$ ， $M_{\text{VKB}}=79/0.5=158$ 。按此，理论计算的光斑尺寸为 $58\text{nm} \times 73\text{nm}$ 。调节 HKB 的 q 值前后，追迹的光斑尺寸分别为 $57\text{ nm} \times 66\text{ nm}$ ， $54\text{nm} \times 62\text{nm}$ 。与理论值基本一致。垂直方向光斑尺寸基本没有变化，但是但水平光斑的中心位置和光斑尺寸均匀变化，平移量相比于光斑尺寸在 $3/25=10\%$ 的水平。调节 HKB 的 q 值后，HKB 和 VKB 的最小光斑位置重合。



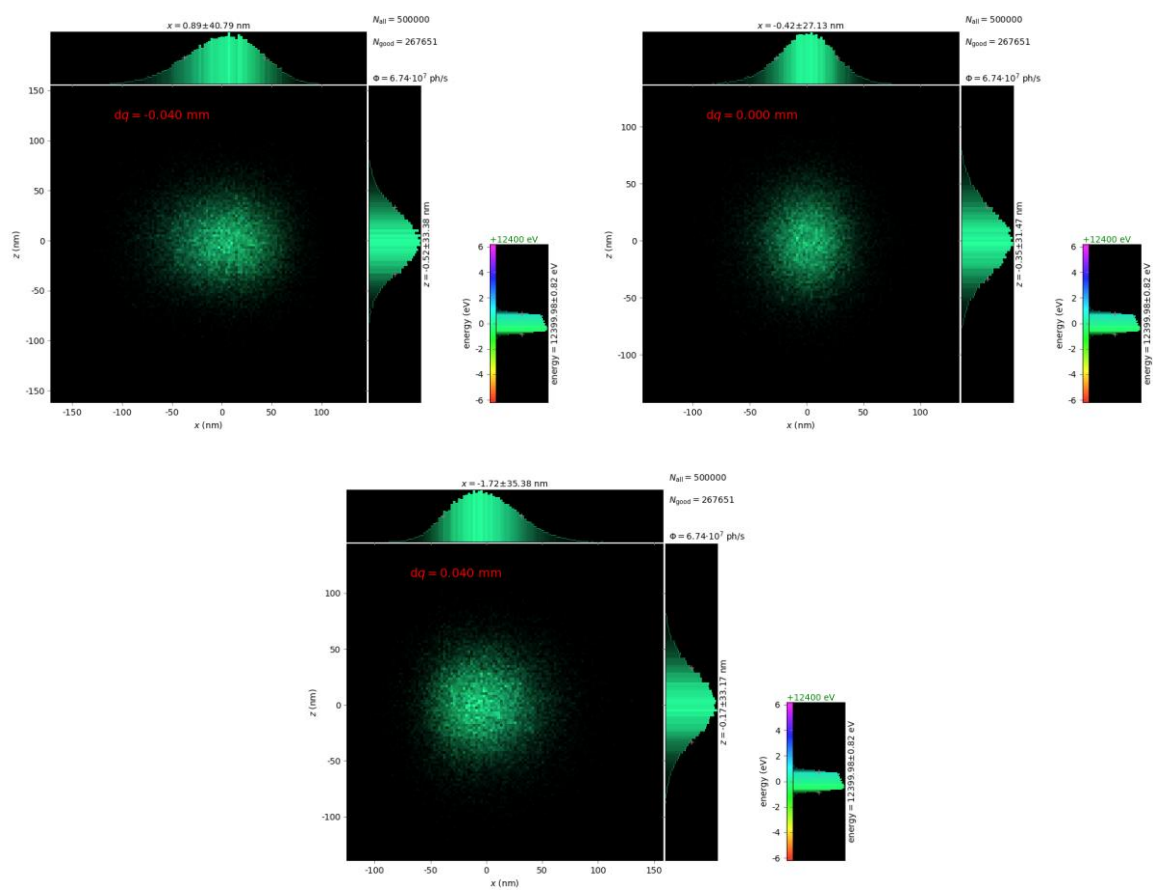
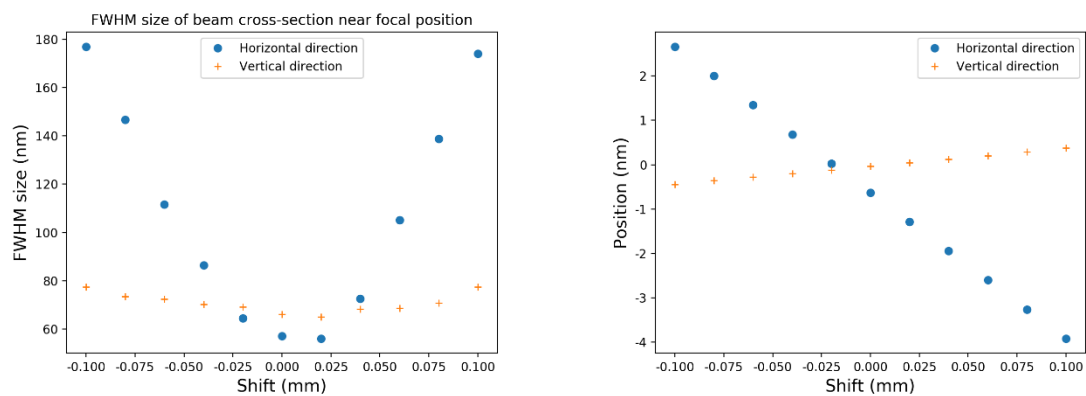


图 3-5 实际光源追迹结果，未调节 HKB 的 q 值



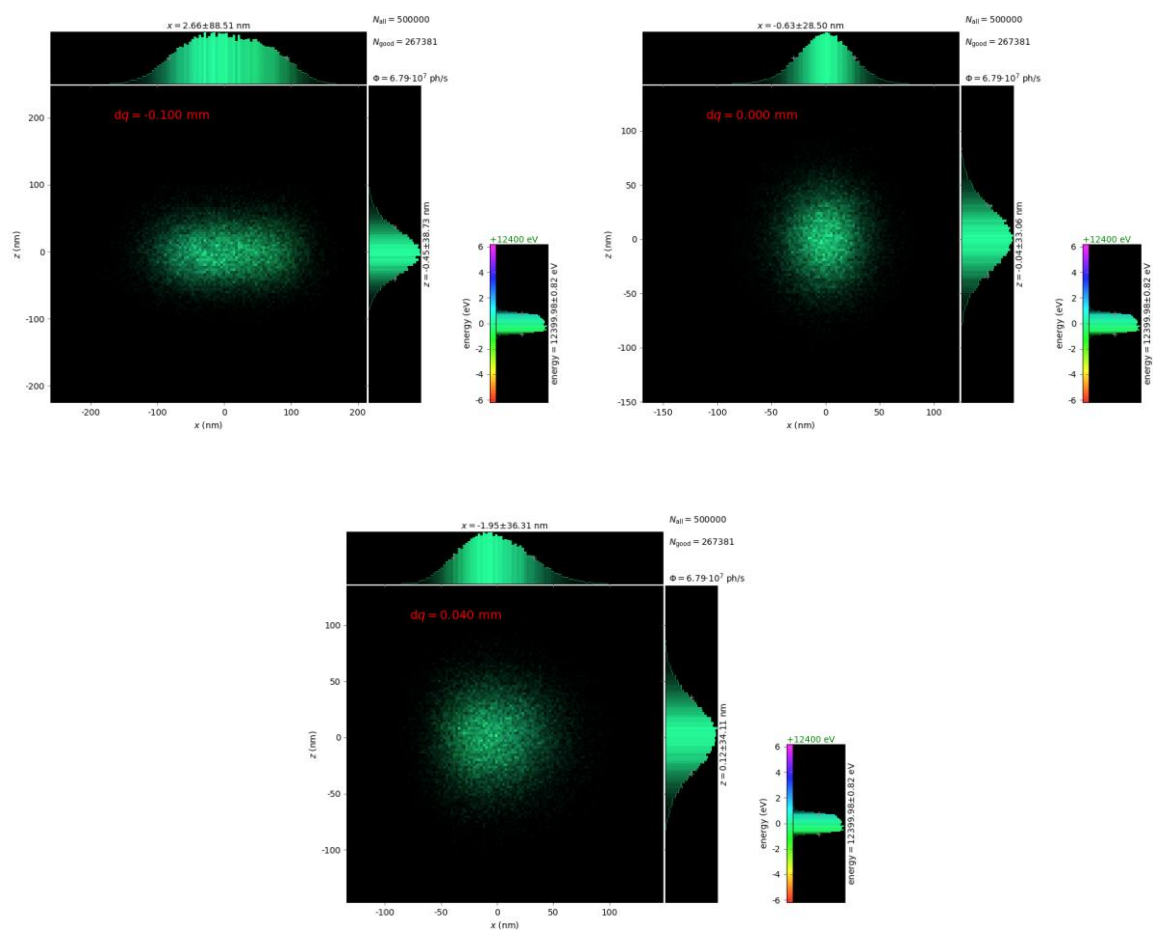


图 3-6 实际光源追迹结果，调节 HKB 的 q 值