

HEPS 工程工作笔记

HEPS Technical Note

标题 (Title)	B3 束线设计 – 波动计算		
作者 (Author)/ 系统 (System)	杨福桂	日期 (Date)	2020-2-10
编号 (Serial No.)		页数 (Pages)	共 页 (含附件)
摘要 (abstract): B3 结构动力学线站的光束线设计方案已基本确定，即采用两级 CRL 聚焦实现微米聚焦，CRL-多层膜聚焦镜实现纳米聚焦。考虑到 HEPS 的相干性，需要开展部分相干的计算，这里结合 SRW 和 XRT 两个软件。本工作主要是评估：粉光（宽带宽）和 CRL 面形误差特征下，部分相干性对束线微米聚焦性能。 从仿真结果来看，在当前仿真设置下，光源尺寸和色差是影响聚焦性能的主因，部分相干性的影响较小。			
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 束线光学设计综述

1.1 光源特征

HEPS-B3 分别处于低和高 beta 直线节。储存环和光源参数如表格 1 1 所示。

	HEPS-B3
电子能量 (GeV)	6
电流强度 (GeV)	0.2
能散	0.00111
电子尺寸 (μm)	8.8*2.3
电子束团发散角 (μrad)	3.1*1.2
Beta function	2.84*1.92
发射度 (pm*rad)	27.28*2.76
能量点@谐波级次	23keV@1st
λ/2π (pm.rad)	19.74
周期 (mm)	12
周期数	180

表格 1-1 光源参数列表

1.2 束线布局

由于光源处发光点的位置非确定，因此这里需要从波动计算结果分析光源尺寸。仿真束线布局图如图 1-1 所示。B3 采用级联聚焦的方式，前级聚焦 CRL 的曲率半径为 0.5mm，组数为 11 个；后级聚焦 CRL-2 的曲率半径为 0.05mm，片数为 6。白光狭缝尺寸为 15urad 接收角，对应边长为 0.6mm 的方形狭缝。在 CRL1 前后各放一个限光圆形狭缝，直径 0.8mm；CRL2 前后各方一个限光狭缝，狭缝直径为 0.4mm。

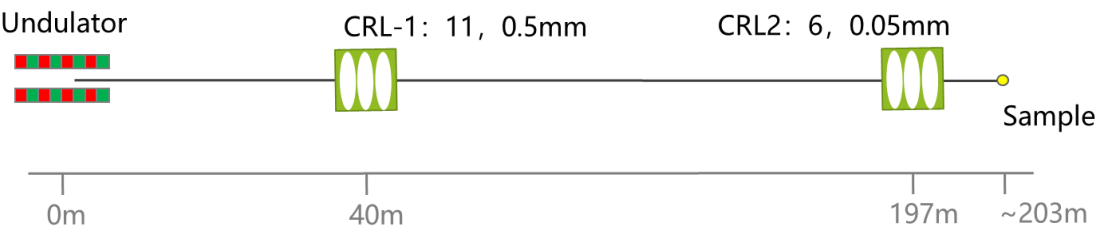


图 1-1 仿真布局图

2 聚焦位置的确定

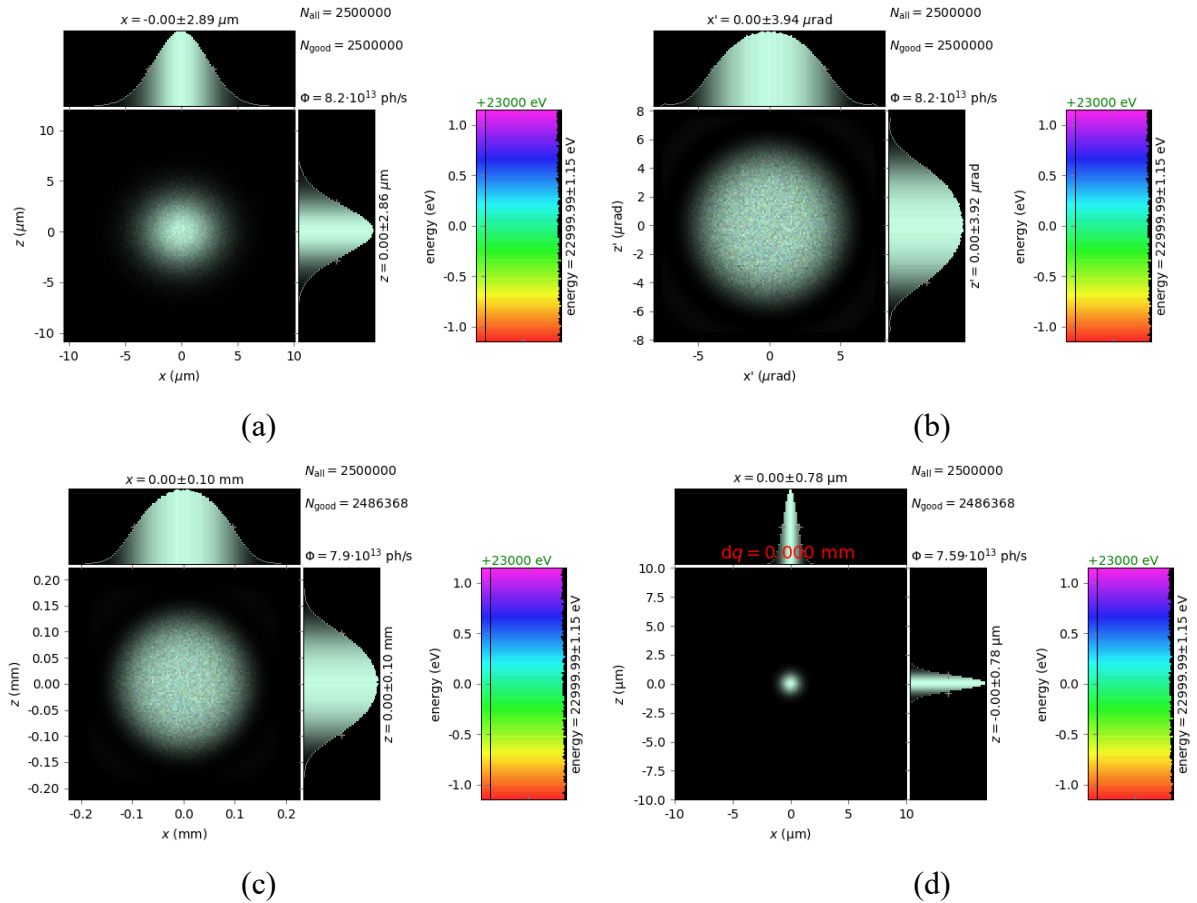
CRL 的有限厚度以及误差都会引起焦点位置的移动，焦点位置的确定变成一个有别于反射镜的重要工作。从下面的计算，我们还能发现，确定焦平面位置也是需要讨论的内容。为了便于分解各种因素的影响，这里计算了面形误差、光源尺寸以及带宽的影响。

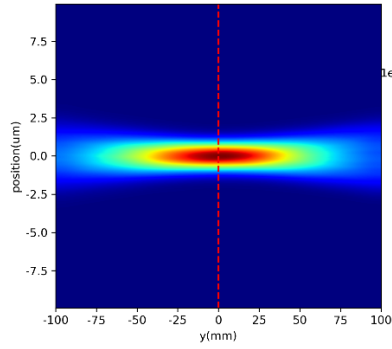
2.1 面形误差的影响

考虑到面形误差主要来源是由小曲率半径 CRL 组成的 CRL-2，在本文的计算中，CRL-1 不加载面形误差。

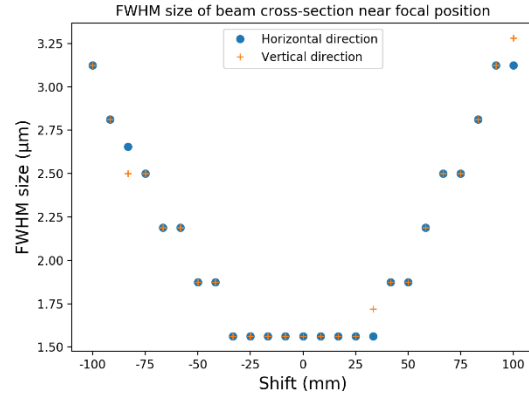
2.1.1 无误差-单色情况

设置光源 0.0001% 带宽，开展光线追迹和波动传播计算。其中，在波动计算中使用单电子发光。计算结果如(e) 图 2-1 和图 2-2 所示。由于几何追迹情况下，样品处的光斑尺寸是多电子发光的尺寸，因此(e)图的尺寸有很大的不同。



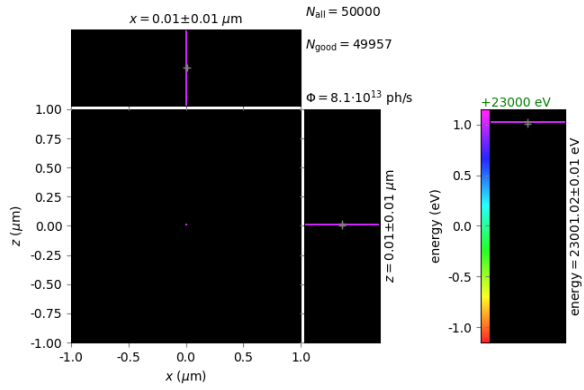


(e)

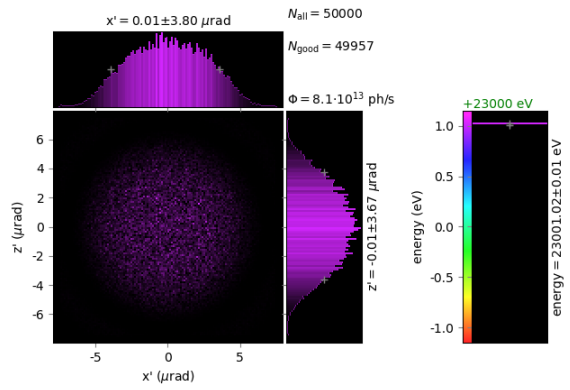


(f)

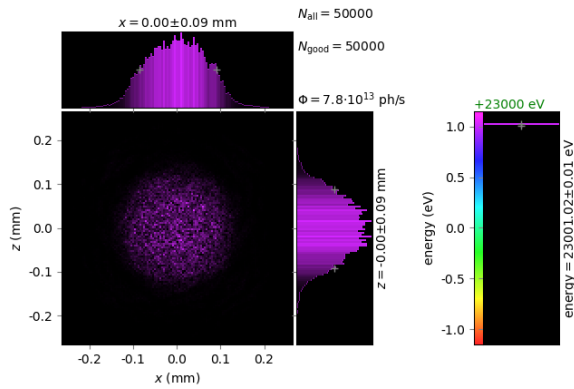
图 2-1 几何追迹，光源尺寸(a)和发散角(b)，第二透镜位置(c)和样品处(d)的光场分布，以及传播方向 yz 界面的分布(e)，半高全宽尺寸的变化曲线(f)



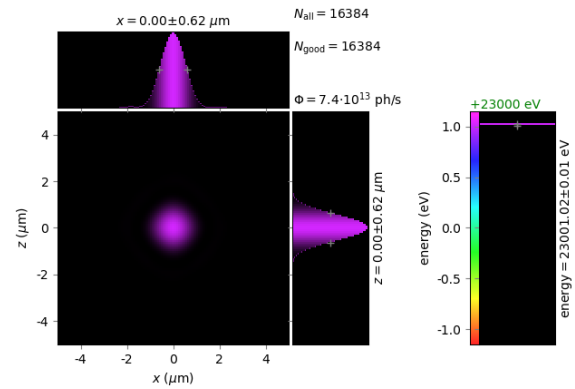
(a)



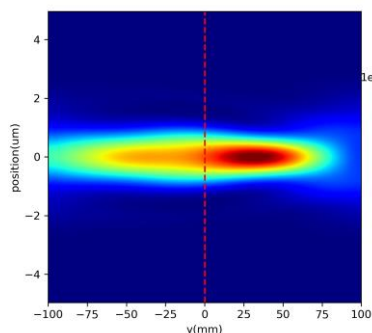
(b)



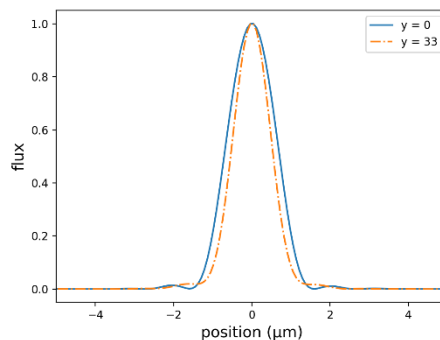
(c)



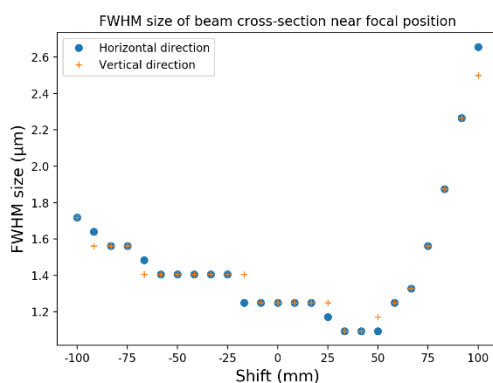
(d)



(e)



(f)

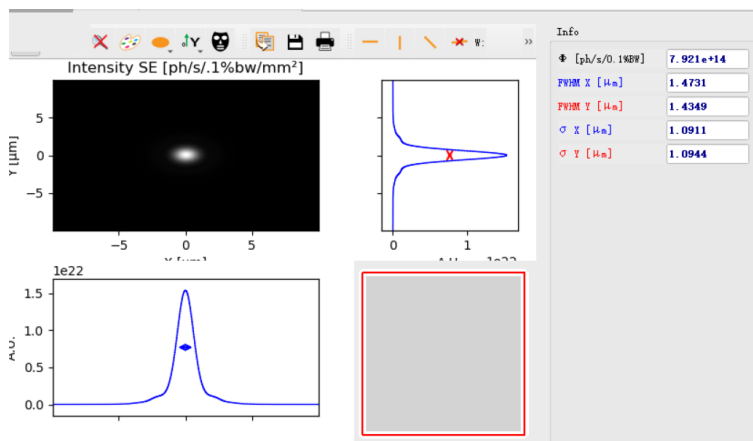


(g)

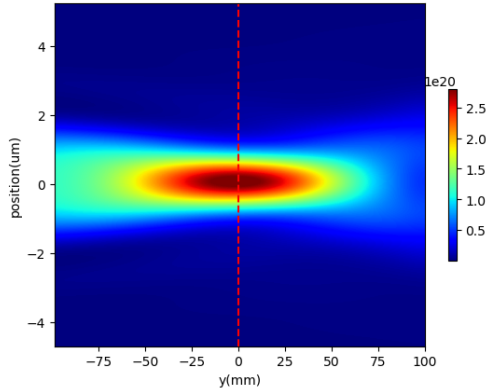
图 2-2 波动传播，光源尺寸(a)和发散角(b)，第二透镜位置(c)和样品处(d)的光场分布，以及传播方向 yz 界面的分布(e)， $y=0$ 和 33mm 处的一维曲线(f)，半高全宽尺寸的变化曲线(g)

几何追迹结果和波动计算结果均显示最小光斑位置大致在 $20\text{-}50\text{mm}$ 之间。从图 2-2(f)曲线看出，理想成像的焦点应该在 0mm 处，此处的波形体现的振荡特征与光源相近。但在 $y=33\text{mm}$ 处光斑尺寸是最小的。

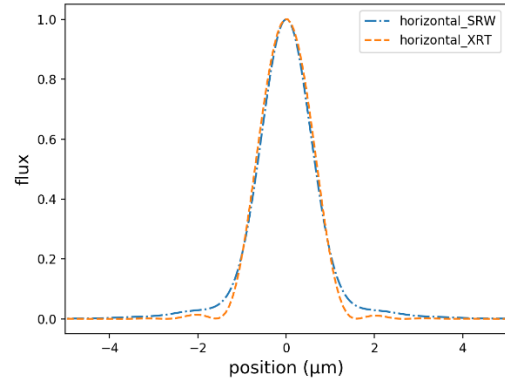
进一步地，使用 SRW 开展单电子波动追迹。截面分布与 XRT 单电子波动计算结果一致。SRW 中的透镜焦距为 6.47 m ，由于 B3 前级为准直，因此基本最小光斑位置在焦点位置附近。



(a)



(b)

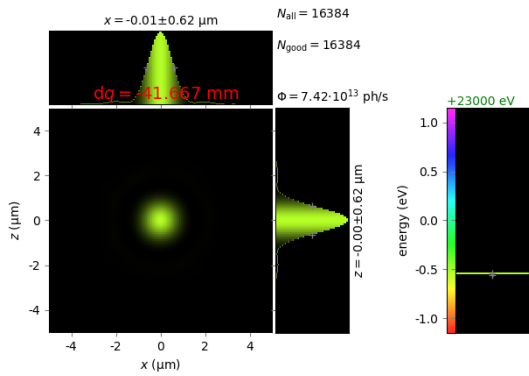


(c)

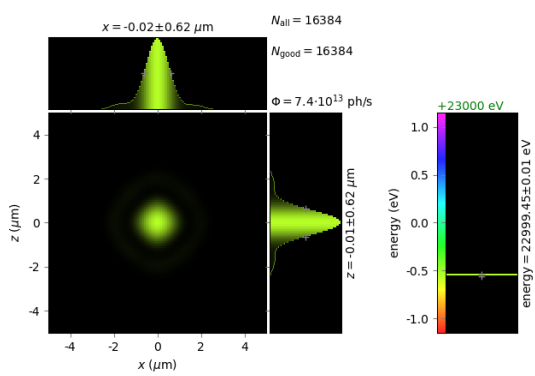
图 2-3 SRW 波动传播结果, (a)xy 截面分布; (b)6.23m 处光场分布与 XRT 结果对比

2.1.2 面形误差-单色情况

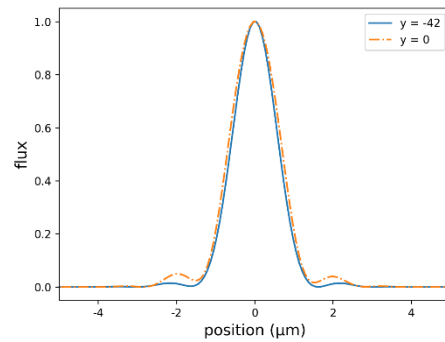
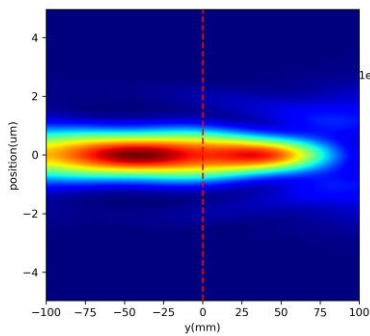
对于 B3 束线, 误差只加载在第二组透镜上。与无误差情况相比, 光源、第二透镜上的分布相同。这里仅给出样品上的分布变化。从波动计算结果来看, 如图 2-4 所示, -41mm 处的强度分布更接近理想成像结果。但与 $y=0\text{mm}$ 位置的一维曲线宽度非常接近。对比几何追迹结果, 单电子发光光线追迹和波动计算得到的最小光斑位置一致, 但是光斑尺寸有差异, 几何结果较大。



(a)

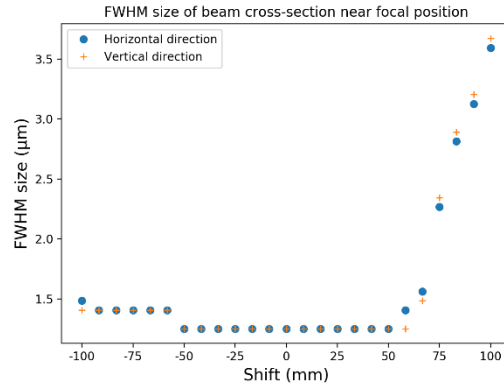


(b)



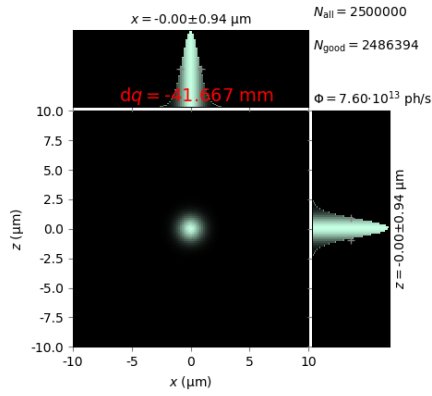
(c)

(d)

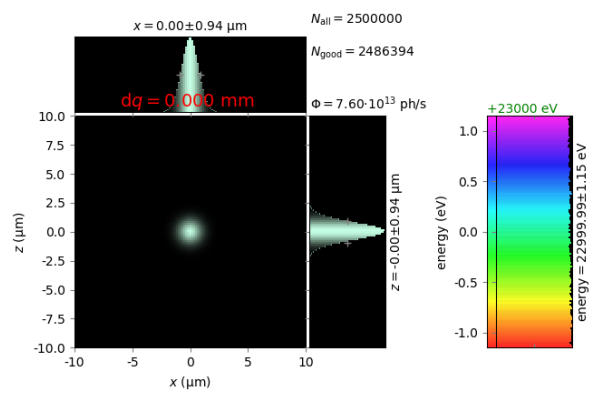


(e)

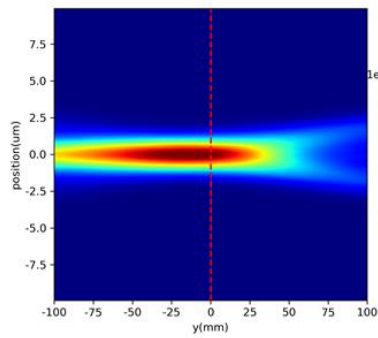
图 2-4 波动传播， $y=0$ 和 33mm 处的光场分布(a) (b)，以及传播方向 yz 界面的分布 (c), $y=0$ 和 33mm 处的一维曲线(d)，半高全宽尺寸的变化曲线(e)



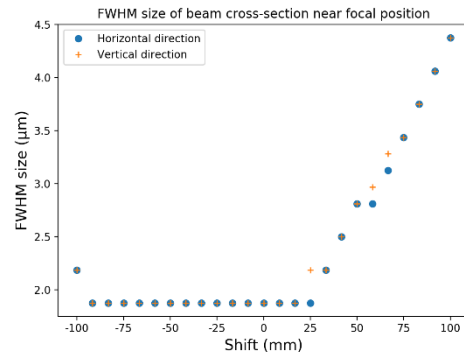
(a)



(b)



(c)



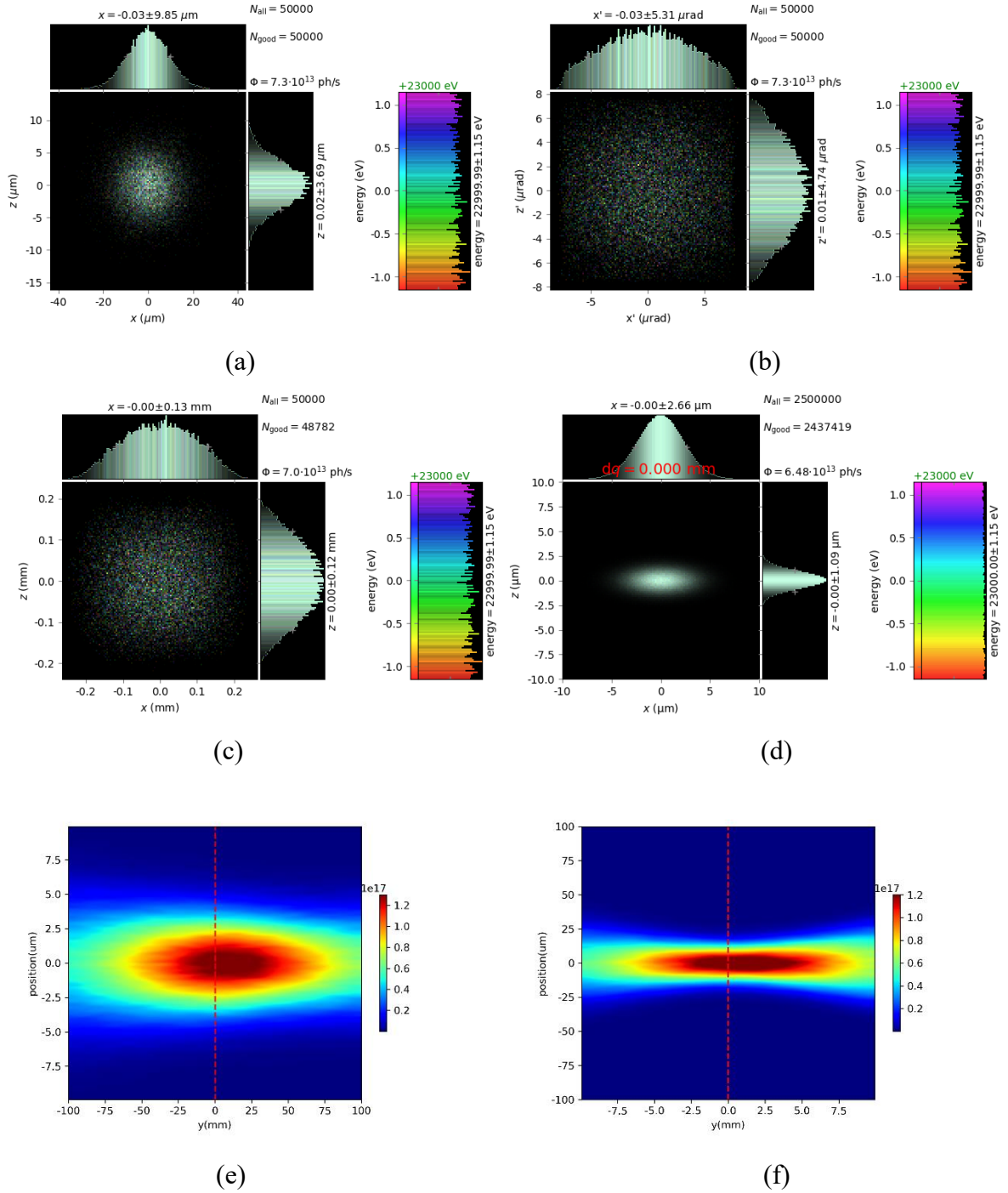
(d)

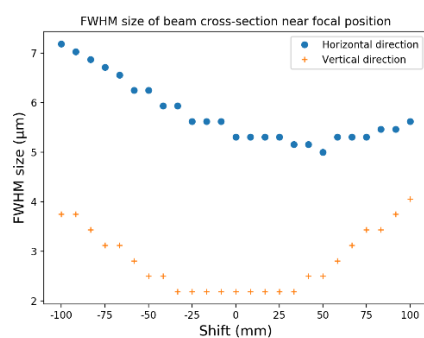
图 2-5 几何追迹， $y=-41.6\text{mm}$ 和 0mm 处的光场分布(a) (b)，以及传播方向 yz 界面的分布(c)，光斑半高全宽尺寸的变化曲线(d)

2.2 光源尺寸的影响

2.2.1 多电子几何-单色计算

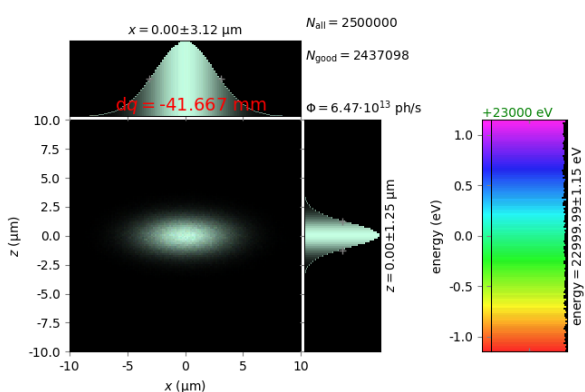
无误差和有误差情况的多电子追迹结果分别如图 2-6 和图 2-7 所示。可以看出，相比于单电子的分布，光斑的中心发生移动，特别是水平方向，而垂直方向基本没有变化。因此，考虑束团尺寸，CRL 聚焦的位置会发生变化。



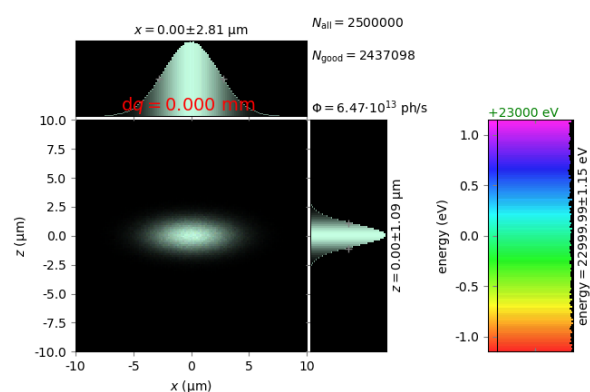


(g)

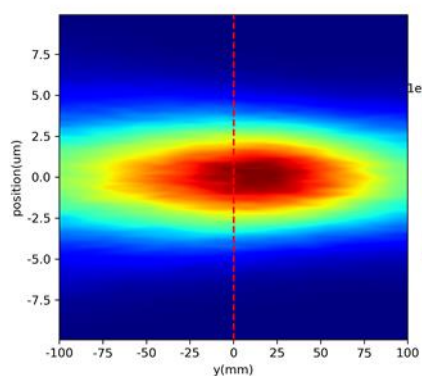
图 2-6 几何追迹,无误差,光源尺寸(a)和发散角(b),第二透镜位置(c)和样品处(d)的光场分布,以及传播方向 yx 界面的分布(e), yz 界面的分布(f); 半高全宽尺寸的变化曲线(g)



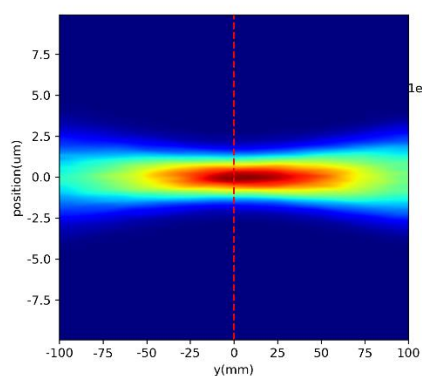
(a)



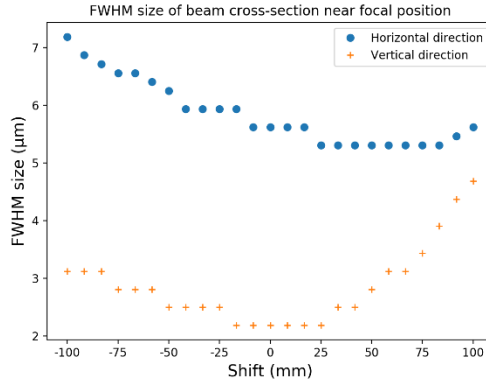
(b)



(c)



(d)

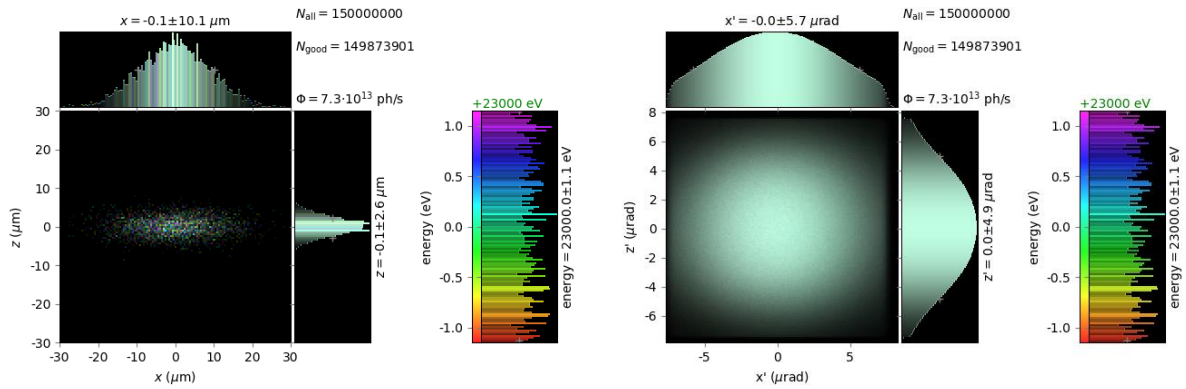


(e)

图 2-7 几何追迹,有误差,不同样品处(a)(b)的光场分布,以及传播方向 yx 和 yz 界面的分布(c) , 半高全宽尺寸的变化曲线(e)

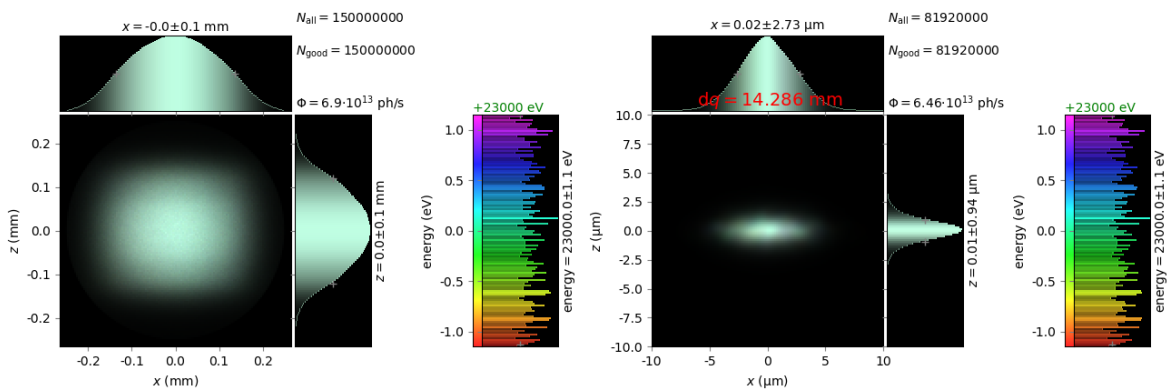
2.2.2 多电子波动-单色计算

追迹 0.0001 带宽, 电子数 5000, -100mm, 100mm 范围内选择 15 个截面计算。带误差和不带误差的计算结果如图所示。多电子波动传播仿真结果如图 2-8, 对比几何追迹结果, 可以看出二者基本一致, 从图 2-9 可以看出, 水平方向的光斑分布完全一致, 垂直方向上稍微有所差异。



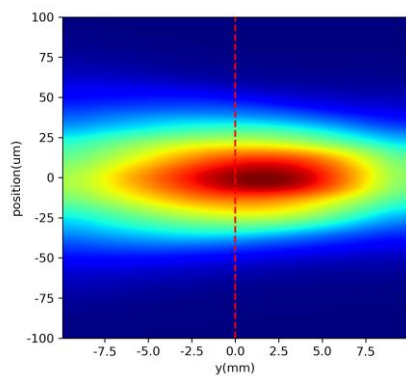
(a)

(b)

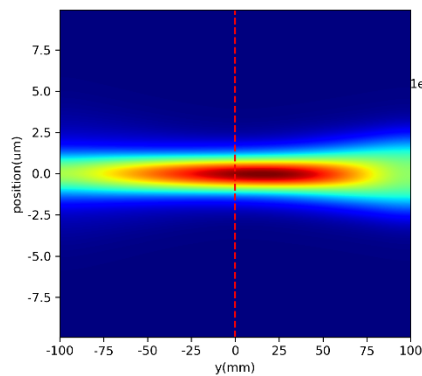


(c)

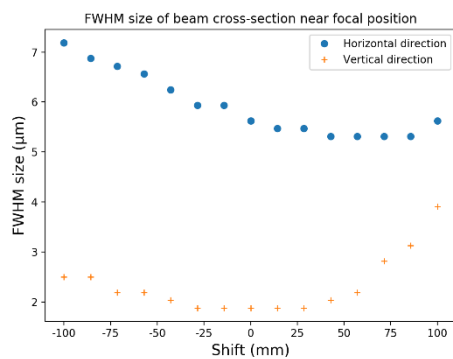
(d)



(e)



(f)



(g)

图 2-8 多电子波动传播，带误差，光源电子尺寸(a)和光场发散角(b)，第二透镜位置(c)和样品处(d)的光场分布，以及传播方向 yx 界面的分布(e)， yz 界面的分布(f)；半高全宽尺寸的变化曲线(g)

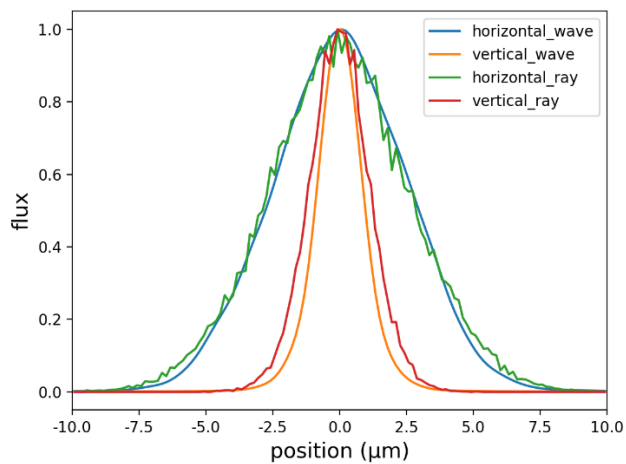


图 2-9 几何追迹与波动传播结果对比

2.3 色散的影响

2.3.1 几何追迹情况

考虑有误差和无误差，在近 0.03 带宽下的分布如图 2-10 和图 2-11。系统接收口径下，对应的带宽为 0.0107。该带宽在系统传输过程中，能够完全被系统传输，从图 2-10(c)可以看出蓝色的高能量光线在第二组透镜上的聚焦光斑更小，而低能量的光线扩展至 0.36mm，仍在第二透镜的口径范围内。

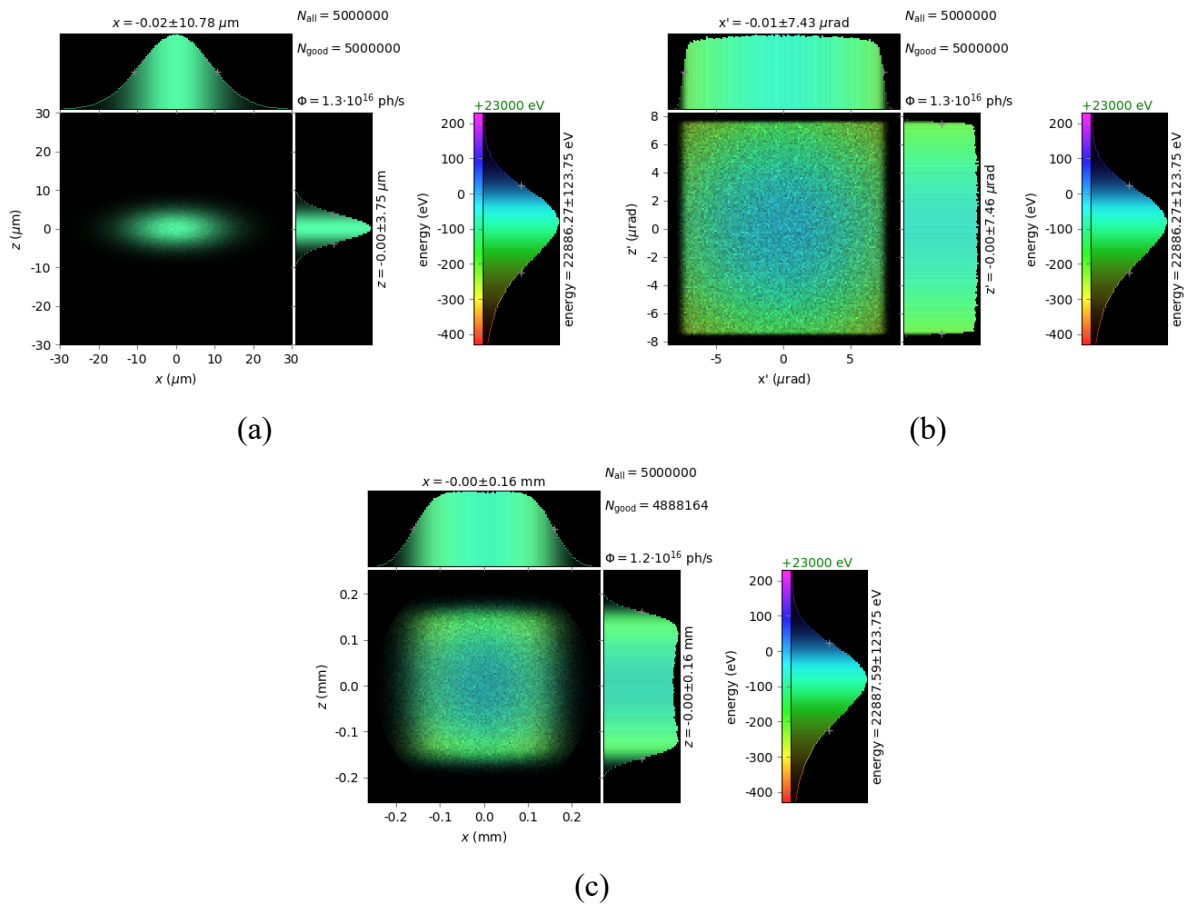
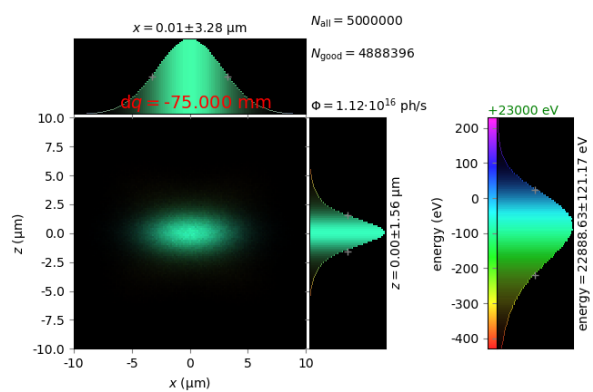
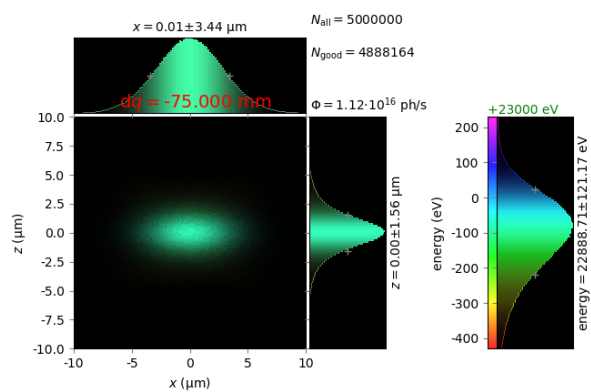


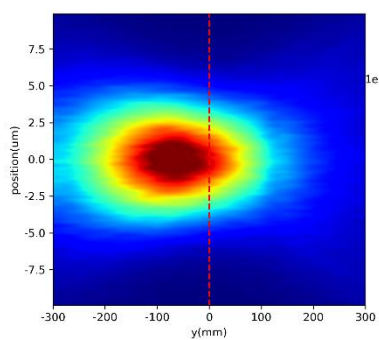
图 2-10 光线追迹结果，光源(a)(b)与 CRL-2 前的光场分布(c)



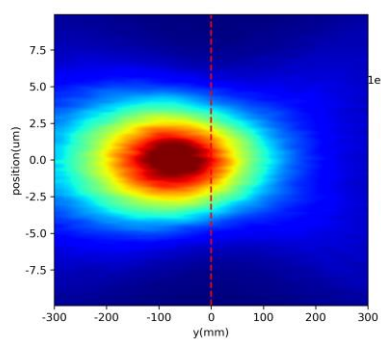
(a)



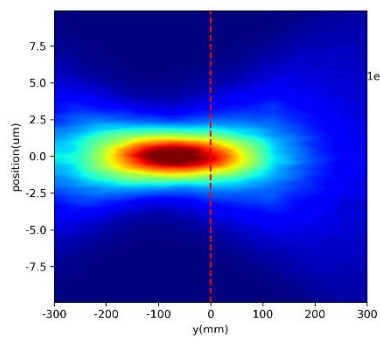
(b)



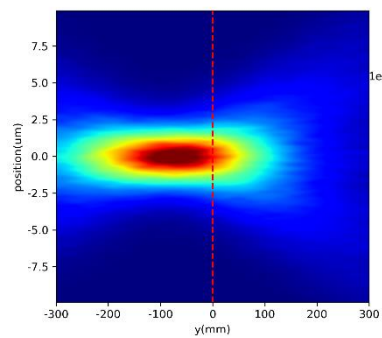
(c)



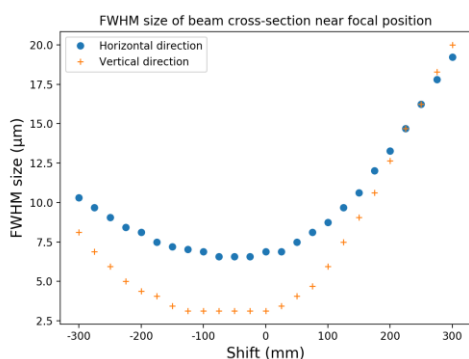
(d)



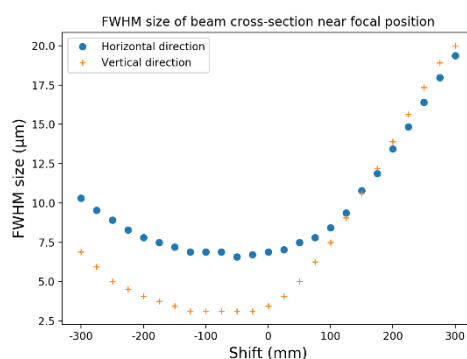
(e)



(f)



(g)

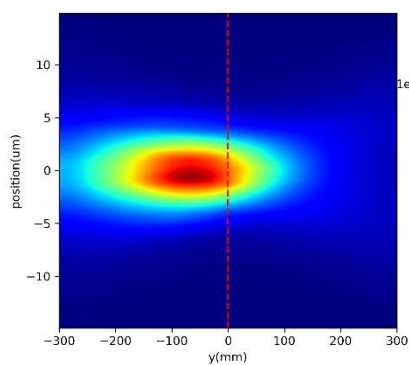


(h)

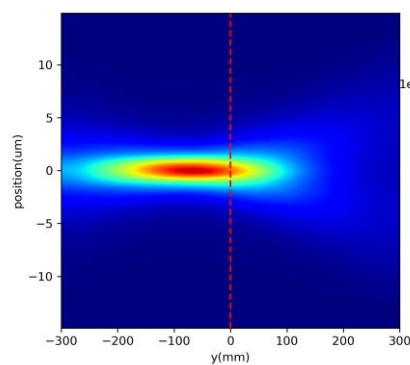
图 2-11 光线追迹结果, (a)(c)(e)误差, (b)(d)(f)有误差

2.3.2 多电子波动传播情况

这里仅追迹带有误差的情况,如图 2-12 所示,对比 2.3.1 节的几何追迹结果,二者接近:包括最佳成像位置的移动,光斑半高全宽尺寸等。这说明,由于色差的存在,几何光线追迹结果已经可以做出很好地近似,说明大致的问题。从像差的角度来说,由于色差问题比较严重,此时可以认为是非相干情况来处理。虽然多电子波动传播可以给出更准确的计算结果,缺点是耗时。将-85.7m 的中心位置光场分布一维曲线做在同一幅图中,如图 2-13 所示。



(a)



(b)

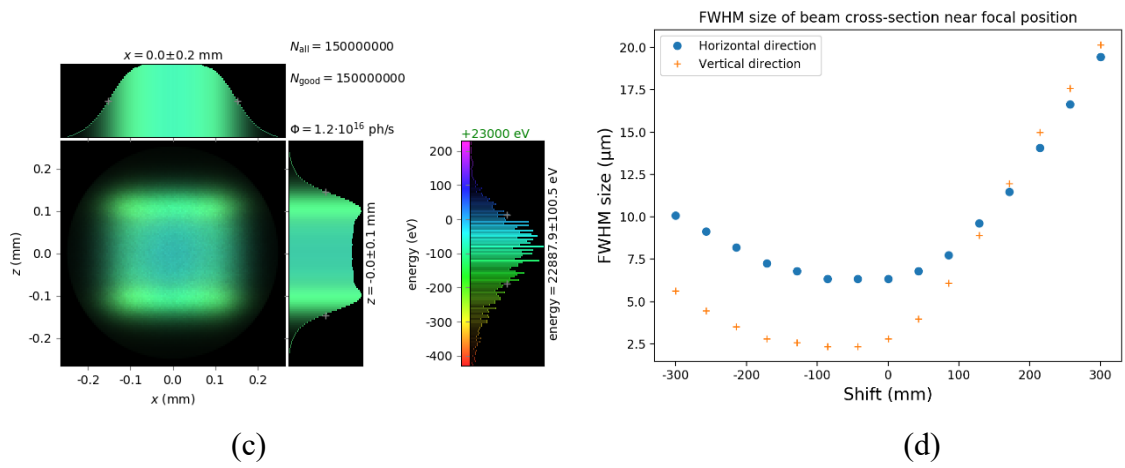


图 2-12 多电子波动追迹结果， y_x 和 y_z 截面图(a)(b)，CRL-2 入射光场分布，以及各个位置的光斑尺寸。

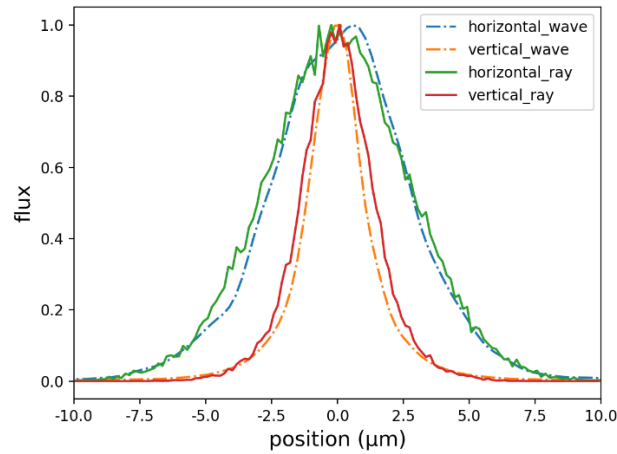
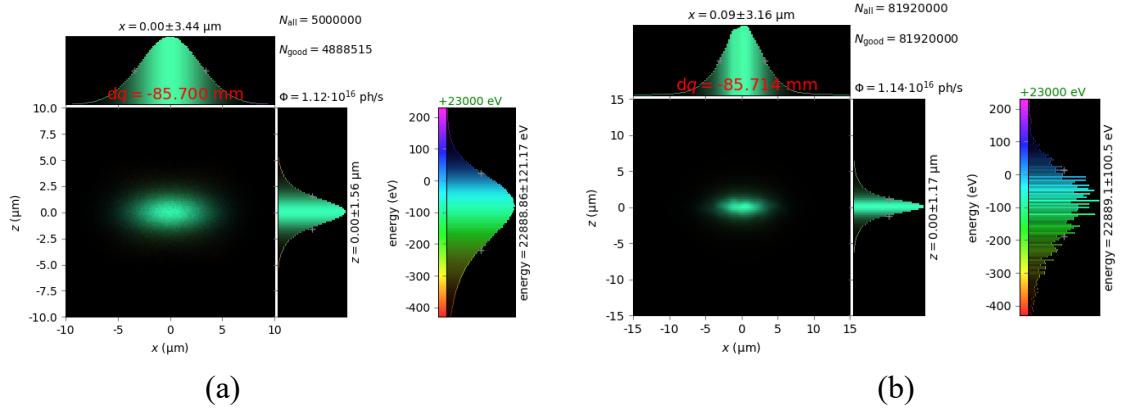


图 2-13 -87.5mm 处的光场分布，二维分布(a)(b)和一维分布曲线(c)

3 总结

第一，对于当前的束线，误差的影响很小可以忽略。

第二，当带宽比较窄时，由于光斑尺寸的扩展效应，波动传播和几何追迹结果一致。

第三，当带宽非常宽时，由于色散效应，光场的分布会发生变化，例如焦点位置的前移等。几何追迹结果可以很好近似波动传播。