

HEPS束线轫致辐射追迹画法 及辐射防护设计一般原则

石泓

2020.5.9

主要内容

1. 韧致辐射的来源
2. 辐射防护设计的参考标准、指南
3. 韧致辐射追迹画法
4. 辐射防护设计一般原则

1. 轫致辐射的来源

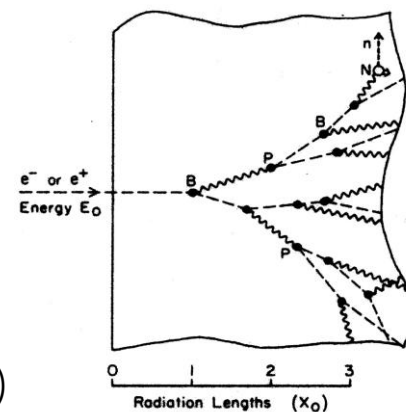
- 轫致辐射

- 带电粒子（尤其是电子）通过物质时，在原子核的强电场附近突然减速或突然偏转而产生的电磁辐射。
- 轫致辐射能谱是一个连续谱，分布范围从零到电子最大动能。
- 储存环的真空盒内有残余气体，束流与残余气体碰撞产生轫致辐射
- 气体轫致辐射的发射角：

$$\theta_c = \frac{mc^2}{E}$$

(mc^2 是电子的静止质量， E 是电子束流的能量；在HEPS光源上，发射角为0.085mrad)

- 电磁簇射：轫致辐射产生的光子可以与物质继续作用，产生光电效应、康普顿散射和正负电子对等。在高能量范围内，产生正负电子对是主要的。如果这些正负电子的能量足够高，还可以产生轫致辐射。于是，轫致辐射和正负电子对会不断发生，其粒子数目也不断增加，这种现象称为“电磁级联”或“簇射”



2. 辐射防护设计的参考标准、指南

- 国标：电离辐射防护与辐射源安全基本标准（GB18871-2002）
 - 连续5年以内年平均有效剂量不超过20mSv，任何单一年份有效剂量不超过50mSv。
 - BEPCII职业放射性工作人员年管理目标值：5mSv/a（年工作2000小时，则相应辐射剂量率为2.5 μ Sv/h）
- BSRF
 - BSRF光束线的辐射防护设计规范修改本Aug-1

BSRF同步辐射光束线辐射防护的设计规范

(修改本 2006.8.2)，李大仕、王庆斌

光束线要防护和屏蔽的辐射源可分五类：

1. **初级高能轫致辐射** (primary bremsstrahlung radiation, 缩写为 BR)，其由储存环内正负电子束与真空盒内剩余气体或真空盒碰撞产生，可沿光束线管道传出。
2. **次级轫致辐射** (secondary bremsstrahlung radiation, 缩写为 SBR)，由初级轫致辐射被光束线上的光学部件或管道散射产生。
3. 中子，由 BR 或 SBR 被光束线上的光学部件或管道散射产生。
4. 同步辐射，由储存环内电子束经过弯铁或插入件时产生。
5. **康普顿散射**，由同步辐射被光束线上的光学部件或管道散射产生。其能量范围接近同步辐射，散射方向为 4π ，故在光束线的辐射屏蔽防护上亦不可疏忽其存在。

BSRF同步辐射光束线辐射防护的设计规范

(修改本 2006.8.2)，李大仕、王庆斌

9. 硬 X 光光束线在聚焦镜和单色器后，入射光束的方向上要加 Beamstop。

Wiggler 磁铁引出光束线 Beamstop 厚 250mmPb、高 60mm、宽 50mm+光束水平宽度；弯转磁铁引出光束线 Beamstop 厚 200mmPb、高 40mm、宽 25mm+光束水平宽度。

11. 各条光束线均应做出辐射光源光路图，当辐射光路超出管道时，要加装扁管和铅准直器。

Wiggler 磁铁引出光束线准直器厚 250mmPb、高 100mm+扁管高度、宽 100mm+扁管水平宽度；弯转磁铁引出光束线准直器厚 200mmPb、高 50mm+扁管高度、宽 50mm+扁管水平宽度。

20. 前端区安全光闸的闸板厚 300mmPb（或 180mmW），光闸闭合时其横向（包括水平和垂直方向）宽度要按本文第 17 条计算。另光闸闭合时，光闸的活动挡块与固定挡块之间不能留纵向的直通缝隙，需采用折弯的缝结构，以防止辐射泄漏。

BSRF同步辐射光束线辐射防护的设计规范

(修改本 2006.8.2), 李大仕、王庆斌

17. 设计安全部件 (如 **collimators, hutch shutters, beamstops**) 和局部辐射屏蔽时^[10], 除保证沿射线方向有足够的厚度 (根据射线的衰减长度推算) 外, 还应保证横向有足够的宽度, 即要在射线照射到的横向位置外, 再扩展一定的宽度。这是由于射线进入屏蔽体后, 会产生电磁簇射, 造成横向展宽 (根据 **Moliere** 半径 X_m 推算), 故横方向的扩展宽度是为保证射线横向不外泄。在 BEPC II 的能量下, Wiggler 磁铁引出光束线的安全部件采用铅材料时, 要横方向扩展 50mm (对初始韧致辐射), 对次级韧致辐射要横方向扩展 25mm; 弯转磁铁引出硬 X 光束线的安全部件采用铅材料时, 要横方向扩展 25mm (对初始韧致辐射), 对次级韧致辐射要横方向扩展 15mm。

18. 相邻的安全部件间要相互交搭和重迭^[10] (**overlap**), 对于铅材料重迭部分要不小于 6.5mm。

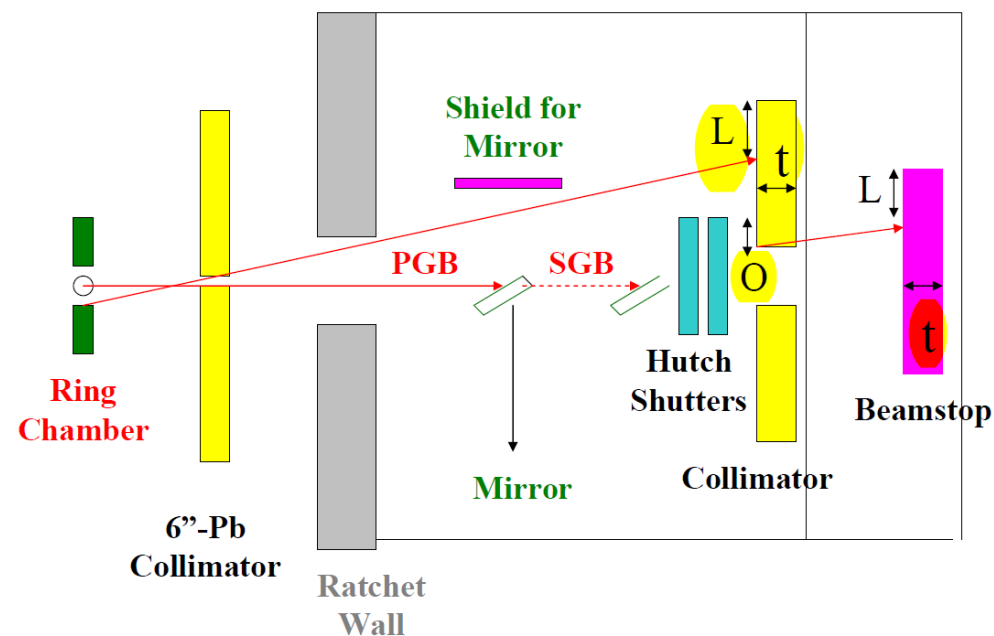
2. 辐射防护设计的参考标准、指南

- APS
 - Guidelines for Beamline and Front-End Radiation Shielding Design at the APS(ANL/APS/TB-44 Rev.4 2012.10)
- NSLS-II
 - Guidelines for Beamline Radiation Shielding Design at the National Synchrotron Light Source II
- SLAC
 - Radiation Safety Design for SPEAR3 Ring and Synchrotron Radiation Beamlines
- Diamond
 - Guidelines for Beamline Radiation Shielding Design at the National Synchrotron Light Source

2. 辐射防护设计的参考标准、指南

- **L**
 - 3倍Moliere半径
 - 铅：12~15mm，取50mm
 - 钨：8~10mm，取35mm
- **t**
 - 20倍辐射长度
 - 铅：5.6mm，取300mm
 - 钨：3.5mm，取180mm
- **O**
 - 重叠6.5mm

GB Types, Ray Trace, Shielding Requirements



3. 韧致辐射追迹画法

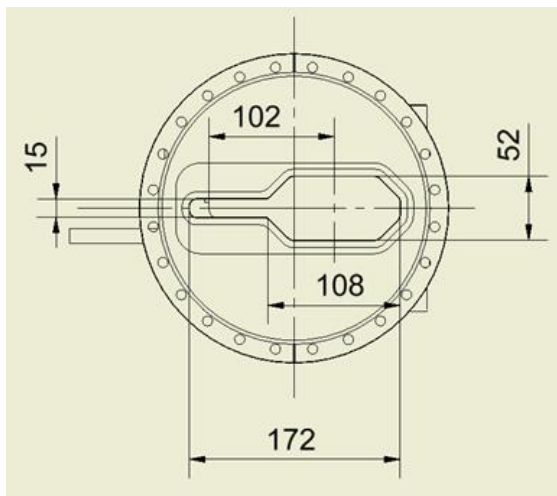
- 光源

- 位置：

- ID：直线节下游出口法兰端面
 - BM：弯铁中心（？）

- 尺寸：

- 真空盒内表面



BEPC II 真空盒截面

- 准直器

- 基本尺寸：

- 上下游法兰端面间距：400mm
 - 厚度 (t)：300mm (铅) 或180mm (钨)
 - 外轮廓：依据BR追迹图 (L=50 (Pb) 或35 (W) mm)
 - 孔径余量：2~5mm

- 位置

- 最佳位置：单色器前
 - 必要位置：白光狭缝后

- Beamstop

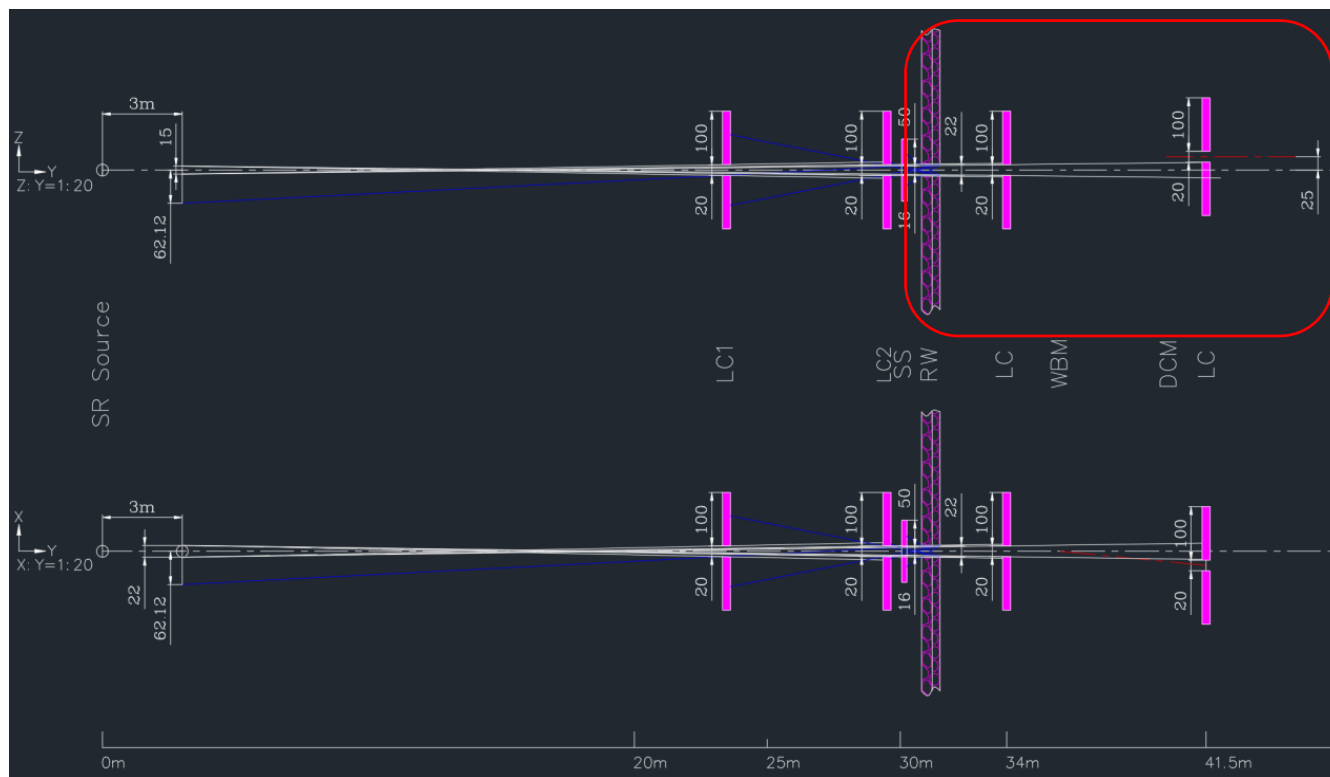
- 基本尺寸：同准直器

- 位置：

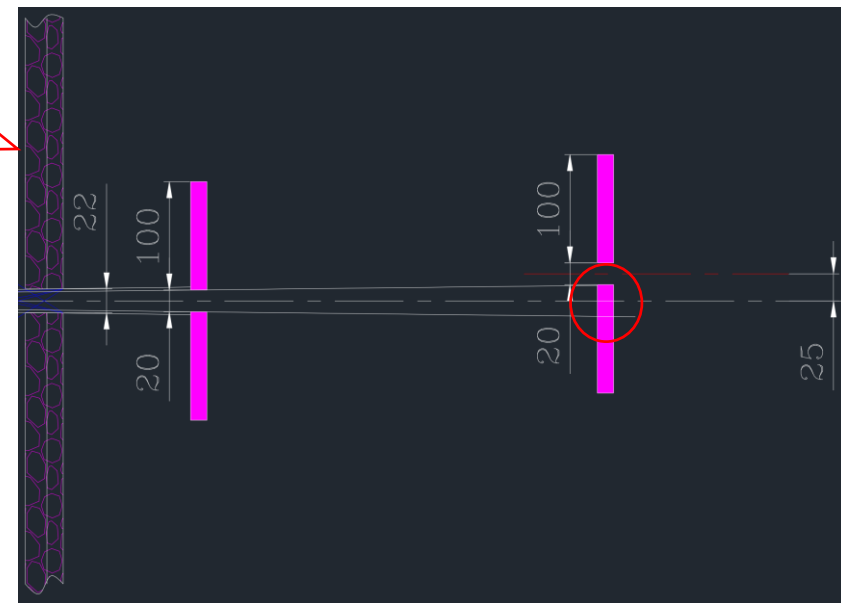
- 最佳位置：单色器后
 - 必要位置：FOE端墙前（或可以终止PBR的地方，例如白光束线实验hutch的端墙，建议尽可能接近样品）

单色器不同出高对辐射防护的影响 (刘平成)

- 问题的由来
 - 出高对单色器下游的辐射剂量影响



B5束线轫致辐射追迹



- 单色器出高25mm
- 初级轫致辐射 (PBR) 边缘与孔径距离不够3倍Moliere半径

4. 束线辐射防护设计的一般原则（建议）

- **准直器**

- 基本尺寸：
 - 上下游法兰端面间距：400mm
 - 厚度：300mm（铅）或180mm（钨）
 - 外轮廓：依据BR迹图
 - 孔径余量：2~5mm
- 位置
 - 最佳位置：单色器前
 - 必要位置：白光狭缝后

- **Beamstop**

- 基本尺寸：同准直器
- 位置：
 - 最佳位置：单色器后
 - 必要位置：FOE端墙前（或可以终止PBR的地方，例如白光束线实验hutch的端墙，建议尽可能接近样品）

- **单色器不同出高的影响**

- 出高小，FOE出口剂量高，可能需要在管道外覆盖铅皮或用棚屋遮挡
- 在保证光学设计的前提下，从辐射防护设计角度讲，尽可能增加单色器出高

- **其他**

- 尽可能减少次级韧致辐射的散射
 - 尽量避免PBR与管壁接触
 - 光阑或slits后安装准直器
- 尽可能将BR限制在FOE内
- **以剂量率划分棚屋类型**

谢谢！