

BEPC II 束流相关本底的蒙特卡罗模拟研究 (I) * ——同步辐射

周能锋¹⁾ 金大鹏 童国梁 王贻芳 过雅南

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 正负电子对撞机中的电子束流在磁场中发生偏转时会产生同步辐射, BEPC II 中的束流在对撞区附近产生的同步辐射可能会损坏铍管或影响探测器的正常工作. 为了确定同步辐射的影响, 使用程序 SRGEN 计算了同步辐射光子的能谱、分布及其在铍管上产生的功率, 并进一步用 SRSIM 和 EGS 模拟了光子与铍管等物质的相互作用及光子在探测器中产生的击中率.

关键词 同步辐射 本底 蒙特卡罗模拟

1 引言

我们正在设计建造新一代的北京正负电子对撞机 (BEPC II)^[1] 和北京谱仪 (BES III)^[2]. 同任何高亮度对撞机一样, 本底研究是一个非常重要的课题. 本底在真空盒上产生热量, 真空盒受热过多就可能被损坏, 从而导致 BEPC II 无法正常工作; 过高的本底还会使探测器的击中率过大, 从而增加数据获取系统的设计难度, 甚至会使将来 BES III 无法正常工作; 同时, 过高的本底还会加速 BES III 各子探测器的老化, 缩短 BES III 的工作寿命. 因此, 模拟 BEPC II 工作条件下 BES III 的本底情况, 并采取相应的保护措施, 如铍管镀金、铍管冷却和合理设置挡板等, 对于 BES III 的设计建造, 以及将来 BES III 的正常安全运行具有非常重要的意义. 作为参考, 表 1 中列出了各子探测器典型的辐射剂量安全上限.

表 1 各探测器典型的辐射剂量安全上限

探测器	辐射剂量限制
MDC 电子学	小于 1000rad/year
MDC 丝	小于 100kHz
CsI 晶体	小于 500rad/year
Si 亮度探测器	小于 5000rad/year

束流相关本底包括同步辐射、束流 - 气体作用和 Touschek 效应等, 本文只讨论同步辐射本底. 同步辐射是电子以接近光速作曲线运动时沿切线方向发出的强电磁辐射, 最初于 1947 年在电子同步加速器上被观察到. 本文计算了对撞区附近的同步辐射在真空盒及其铍管上产生的功率, 并模拟了同步辐射在主漂移室中产生的击中率.

2 同步辐射模拟的原理及工具

电子束流在四级磁铁或二级磁铁的磁场中横向加速时产生同步辐射, 同步辐射光沿束流的切线方向, 功率如下

$$dP[\text{kW}] = \frac{d\phi}{2\pi} \cdot 88.47 \cdot E_{\text{beam}}^4 [\text{GeV}] \cdot I [\text{A}] / \rho [\text{m}],$$

其中 ρ 是束流局部的曲率半径, $d\phi$ 是以弧度为单位的束流偏转角度, E_{beam} 是电子束的能量, I 是束流强度. 同步辐射光子的特征能量由下式给出

$$U_c [\text{keV}] = 2.2 \cdot E_{\text{beam}}^3 [\text{GeV}] / \rho [\text{m}].$$

同步辐射本底计算用到了 3 个程序, SRGEN, SRSIM^[3,4] 和 EGS^[5,6], 模拟的过程如图 1 所示. 程序 SRGEN 模拟正负电子束流在二级磁铁或四级磁铁的磁场中作横向运动时产生同步辐射光子的过程,

2003 - 06 - 04 收稿

* 国家自然科学基金 (19991480), 国家杰出青年科学基金 (10225524) 和中国科学院重大项目基金 (KJ95T - 03) 资助

1) E-mail: zhounf@mail.ihep.ac.cn

计算光子的空间分布和能量沉积. 程序 SRSIM 模拟同步辐射光子与真空盒物质的相互作用, 计算从各个真空盒表面散射到束流管上的光子能谱以及透过束流管的光子能谱. EGS 是一套模拟电磁簇射的通用程序, 可以模拟光子或电子与各种物质的电磁相互作用, 包括光电作用、瑞利散射、康普顿散射和正负电子对产生湮没过程, 应用范围比较广泛. 利用 SRGEN 的输出结果, EGS 也可以模拟同步辐射与真空盒物质的相互作用. 通过 EGS 模拟与 SRSIM 模拟的比较可以验证两者的一致性. EGS 比 SRSIM 功能强大, 有些材料 SRSIM 无法模拟, 在模拟透射到主漂移室的光子时只使用了 EGS.

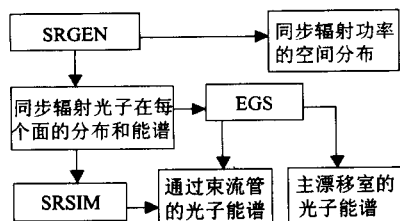


图 1 同步辐射本底模拟的简略流程图

3 模拟结果

同步辐射本底的影响有两部分, 一是打在真空盒上的同步辐射使真空盒的温度升高, 可能损坏真空盒, 尤其是其中的铍束流管 (简称铍管); 二是透过铍管进入探测器的同步辐射会使探测器的计数率增大, 从而增加数据获取系统的负担, 加速探测器的老化. 铍管是真空盒中最脆弱的部分, 最容易受到损坏, 本文给出了真空盒各个面上的同步辐射功率, 重点介绍了铍管上的同步辐射功率计算. BEPC II 工作环境下的同步辐射本底特征能量低, 对外层子探测器影响小, 主漂移室最容易受到同步辐射本底的影响, 本文给出了同步辐射本底在主漂移室中产生的击中率.

BEPC II 有两种工作模式, 对撞模式和同步辐射模式, 本文只介绍对撞模式下的同步辐射本底模拟.

3.1 铍管上的同步辐射功率

对撞区附近的真空盒孔径、磁铁的位置及主要磁铁同步辐射的扇面分布如图 2 所示, 在对撞区附近, 束流经过一块偏转磁铁和 6 块四级磁铁后到达对撞点, 只有这些磁铁对铍管上的同步辐射光子有

直接的贡献, 这 7 块磁铁的位置及参数如表 2 所示^[1,2].

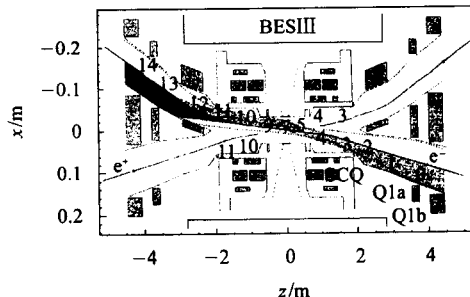


图 2 对撞区附近的真空盒孔径, 磁铁的位置及主要同步辐射的分布 (俯视图)

表 2 对撞区附近磁铁的参数

名称	轴向位置	长度	x 向偏移	四级磁铁	偏转	偏转
				聚焦强度 /m ⁻²	半径/m (水平)	半径/m (竖直)
SCQ	1.096	0.407	0.0	-2.578748		
Q1A	3.55	0.2	0.077542	1.245		
Q1B	4.05	0.4	0.093745	0.65500		
Q2	5.552	0.5	0.135670	-0.373244		
Q3	9.553	0.5	0.243680	-0.237569		
Q4	12.554	0.4	0.32341	0.6536		
OWBL	13.520	0.9322			18.295	10 ³⁰

在对撞模式下, BEPC II 的正负电子束流在对撞区附近是对称的, 真空盒孔径和磁铁也是对称的, 只需对其中一个电子束流进行模拟, 如果没有特别说明, 本文中的每一幅图表都是单束流的结果. BEPC II 电子束流的能量是 1.89 GeV, 单束流的流强是 0.9 A (模拟中流强是 1 A), 在对撞点处电子束流与中心轴的夹角是 11 mrad, 水平发射度是 0.18 mm · mrad, 竖直发射度是 0.09 mm · mrad, 计算同步辐射时考虑

表 3 每个表面上的同步辐射功率

表面标号	轴向位置/m	功率/W
0	3—4.5	2.42
1	2.2—3	14.80
2	2—2.2	20.80
4	0.7—0.8	<0.01
5	0.151—0.7	0.10
6	0.15—0.151	0.07
7(铍管)	-0.15—0.15	0.93
9	-0.7—-0.151	32.80
11	-2.0—0.8	42.80
13	-3.0—-2.2	<0.01
14	-4.5—-3.0	46.41

了 10σ 的束流包络线. 表 3 列出了每个表面对应的轴向位置及 SRGEN 计算的每个面上的同步辐射功率, 主要的同步辐射功率是电子束流经过二级磁铁 OWBL 和超导四级磁铁 SCQ 产生的; 铍管上的同步辐射功率主要来自二级磁铁 OWBL, 单束流时铍管上的总功率是 0.93W.

铍管上的总功率并不多, 但是如果同步辐射功率分布不均匀, 就可能会在局域产生特别多的热量, 从而把铍管击穿, 为此需要研究铍管上光子的空间分布. 铍管是半径 3.15cm, 长 30cm 的圆筒, 铍管的中心是对撞点. 图 3 是打在铍管上的光子在各个方向的分布, 坐标系的中心是对撞点, 其中, z 是电子束流运动的方向, $+x$ 指向环内侧, y 是竖直向上的方向. 光子在铍管水平向外方向上呈宽度约 1cm 的比较均匀的带状分布, 最大的面功率在双束流对撞时为 $0.16\text{W}/\text{cm}^2$.

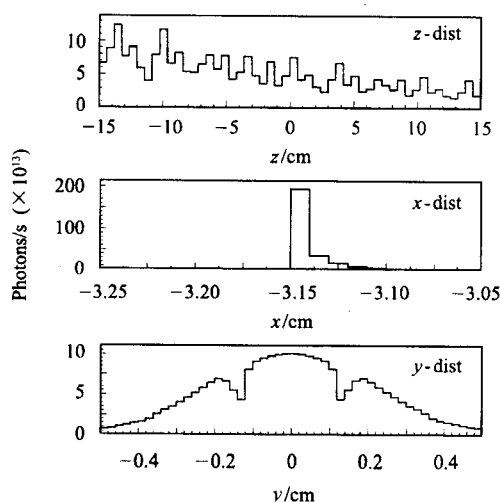


图 3 同步辐射光子在铍管上的分布

从铍管附近的真空盒面散射到铍管上的光子对铍管上的功率也会有贡献. 铍管的下游是内表面镀铜的不锈钢管(表面 9), 半径 3.35cm, 长 55cm, 不锈钢管上的同步辐射功率是 32.8W, 主要来自 SCQ (26.91W) 和 OWBL (4.23W). 计算表明这些光子中散射到铍管上的光子的比例小于 0.001, 功率小于 0.03W, 远少于直接打在铍管上的光子. 表面 11 也是表面镀铜的不锈钢管, 半径 5.035cm, 长 120cm, 同步辐射功率是 42.8W, 从这个面散射到铍管上的光子的比例小于 0.001, 功率小于 0.04W, 远少于直接打在铍管上的功率. 从其他面散射到铍管上的光子也都可以忽略. 因此在计算进入主漂移室的光子时, 散射光子可以忽略.

3.2 主漂移室中的同步辐射本底

同步辐射光子与主漂移室中的气体会发生相互作用, 过多的同步辐射会影响主漂移室的正常工作, 因此主漂移室中的同步辐射剂量需要进行精确计算. SRGEN 能计算出铍管上的同步辐射能谱及分布, 同步辐射透过铍管和主漂移室的内壁才能进入主漂移室, 为了得到主漂移室中的同步辐射的能谱及分布, 需要模拟光子与铍管及主漂移室内壁等物质的相互作用. 铍管分两层, 中间是 2mm 厚的冷却氦气, 内层厚 0.8mm, 内表面镀了 $10\mu\text{m}$ 厚的金, 外层厚 0.5mm ^[1,2]. 主漂移室内壁主要由 0.5mm 厚的 G10 板组成(G10 板的主要成分是 C:H:O:N = 115.1:1:49:0.0036), G10 板的内表面镀了 $50\mu\text{m}$ 的铝, 外表面镀了 $127\mu\text{m}$ 的 Kapton 和 $36\mu\text{m}$ 的铝.

击中铍管内表面的同步辐射光子的能谱如图 4 所示, 光子的特征能量为 0.8keV. 光子在铍管上的分布如图 3 所示, 光子在铍管上呈带状分布, 光子以 25mrad 左右的角度水平入射镀金铍管, 这些光子中只有很少一部分能够透过镀金铍管及主漂移室内壁. 为了确定模拟的可靠性, 分别用 EGS 与 SRGEN 两种独立的工具模拟了光子与铍管的相互作用. EGS 和 SRSIM 分别计算的透过镀金铍管后的光子能谱如图 4 所示, 透射光子能量超过 9keV 时, 两者符合得很好, 透射光子能量小于 9keV 时, SRSIM 的结果偏低; 由于 EGS 得到的进入主漂移室的光子大多数都是能量超过 9keV 的, 因此模拟的结果是可靠的. 比较了 EGS 对各种材料的透射系数与伯克利实验室的数据^[7], 发现两者差别很小, 例如对于光子垂直入射 $10\mu\text{m}$ 金箔的透射系数计算, 两者的最大差别在 7% 的范围内.

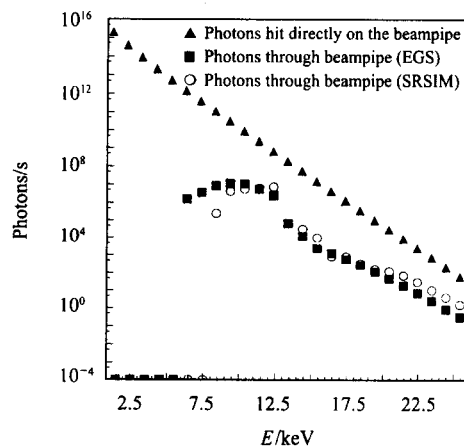


图 4 铍管上的光子能谱, 以及 EGS 与 SRSIM 分别模拟的透过镀金铍管的光子能谱

图 5(a), (b) 是 EGS 模拟得到的进入主漂移室第一层的光子能谱以及这些光子在第一层各单元的分布, 光子的最小能量为 7keV, 到达第一层的光子数约为 $(1.9 \pm 0.2) \times 10^7$, 单元内的最大光子数约 $(2.25 \pm 0.5) \times 10^6$. 主漂移室中的气体是 60% He + 40% C₃H₈, 压强为一个大气压. 根据伯克利实验室的数据, 1cm 厚 0.6 大气压的氮气和 1cm 厚 0.4 大气压的丙烷对 7keV 光子的吸收系数分别为 0.00002 和 0.00401; 丙烷和氮气对光子的吸收系数随着光子能量增大逐渐变小, 为了简化, 在计算气体对光子的吸收时假定光子的能量都是 7keV, 这样的处理不会使模拟结果偏小. 假设吸收的每个光子都在最近的丝上产生一个计数, 则最大的单丝计数率小于 (18 ± 0.2) kHz ($= 2.25 \times 10^6 \times 0.00401 \times 2$, 已考虑双束流). BES III 的主漂移室允许的最大单丝计数率为 100kHz, 因此理想情况下同步辐射产生的计数率在容许的范围内. 计算表明, 主漂移室电子学系统中的同步辐射剂量约为 100rad/year, 也比安全上限 1000rad/year 要小很多.

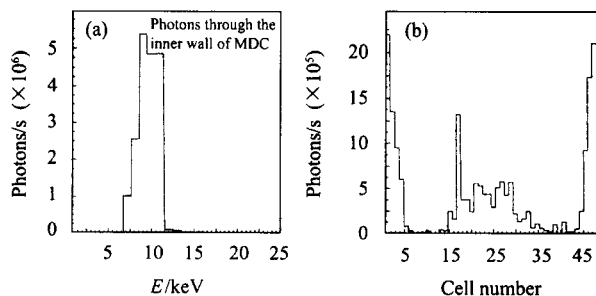


图 5 (a) 主漂移室第一层中光子能谱; (b) 光子在主漂移室第一层各单元的分布

实验上单独测量同步辐射本底很困难, 在北京正负电子对撞机上进行的束流相关本底实验^[8]测量

了北京谱仪(BES II)顶点室中所有本底引起的击中率, 可以用来验证各种本底模拟工具的可靠性. 实验中的本底主要包括丢失电子和同步辐射光子等, 文章^[8]已经比较了丢失电子模拟与本底实验的结果, 验证了模拟工具的可靠性; 通过该实验结果与同步辐射模拟的比较可以对同步辐射模拟进行一些验证. 使用 SRGEN 和 EGS 模拟了 BES II 顶点室中由同步辐射本底引起的击中率. 实验中前两层的击中率受到干扰较大, 第一层中实验观测到的所有本底击中率不超过模拟得到的同步辐射击中率的两倍. 从第三层开始, 实验上观测到每层都在环外侧有一个峰, 同步辐射也在前几层的环外侧有一个峰, 由于实验中的环外侧计数率下降比较缓, 而模拟得到的环外侧同步辐射计数率下降很快, 因此实验上观察到的后几层的本底中同步辐射本底所占比例很小. 通过比较发现, 模拟的结果与本底实验的结果是可比的.

4 总结

对 BEPC II 对撞区的同步辐射本底进行了蒙特卡罗模拟, 计算了各个真空盒表面上的同步辐射功率, 尤其是铍管上的功率. 还计算了同步辐射本底对 BES III 探测器的影响, 计算结果表明, 同步辐射在主漂移室中产生的本底击中率没有超出安全上限, 同步辐射在 MDC 电子学中的辐射剂量也远比安全上限小. 比较了 BEPC 上的束流相关本底实验结果与相应的同步辐射模拟结果, 两者是可比的.

感谢于程辉和秦庆副研究员的无私帮助, 感谢张德红博士做的优秀工作.

参考文献 (References)

- 1 IHEP, Design Report of BEPC II, May, 2002
- 2 IHEP, The BES III Detector (DRAFT), June, 2002
- 3 Stuart D. Henderson, Synchrotron Radiation Background Simulation with SRGEN/SRSIM
- 4 ZHANG De-Hong. Feasibility Study Report on Beijing Tau-Charm Factory, IHEP-BTCF Report-03, 1996
- 5 Hirayama H, Namito Y. Lecture Notes of EGS4 Course at KEK, KEK Internal 99-5, July 1999
- 6 Nelson W R, Hirayama H, Rogers W O. The EGS4 CODE SYSTEM, SLAC-Report-265, Dec. 1985
- 7 Henke B L, Gullikson E M, Davis J C. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1993, 54(2): 181-342(www-cxro.lbl.gov/optical_constants)
- 8 JIN Da-Peng et al. HEP & NP, 2003, 27(10): 846 (in Chinese) (金大鹏等. 高能物理核物理, 2003, 27(10): 846)

Monte Carlo Simulation of BEPC II Beam-Related Background (I) ——Synchrotron Radiation *

ZHOU Neng-Feng¹⁾ JIN Da-Peng TONG Guo-Liang WANG Yi-Fang GUO Ya-Nan

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract Synchrotron Radiation (SR) photons are generated when beam particles of BEPC II undergo the acceleration in magnetic fields of dipoles and quadrupoles. Three programs, SRGEN, SRSIM and EGS are used to simulate the SR spectra, power deposition and the background of SR in detectors of BES III due to the interaction of SR with the material of beam pipe etc.

Key words synchrotron radiation, background, Monte Carlo simulation

Received 4 June 2003

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19991480), National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (10225524) and Major Subject of The Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03)

1) E-mail: zhounf@mail.ihep.ac.cn