

单韧致辐射用于 BESⅢ亮度测量的模拟研究*

杨杰, 张黎明, 伍健, 许咨宗, 张子平

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230027)

摘要:快速实时的亮度监测器将为升级后的北京正负电子对撞机的操作提供很大帮助. 把单韧致辐射过程产生的光子转化为带电粒子, 收集带电粒子在辐射体中产生的 Čerenkov光可用来测量亮度. 论文模拟研究了单韧致辐射过程的性质, 并用 GEANT3 和 GEANT4 模拟了亮度测量的整个过程, 初步给出设计参数的最优化结果.

关键词:亮度监测器; 单韧致辐射过程; BBBREM; GEANT

中图分类号: O411.3; TL506; TL815 **文献标识码:** A

0 引言

北京正负电子对撞机(BEPC)将在升级中改造为双环, 使得在 BESⅢ的对撞点处亮度达到 $10^{33}(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 量级. 电子和正电子束在对撞点(IP)处有 22 mrad 的夹角^[1]. 快速实时的亮度监测器将会为加速器的操作提供很大帮助.

零角度的单韧致辐射过程可以用来做实时的亮度监测器的测量途径, 这种过程已被应用在正负电子对撞机的亮度监测器上^[2,3]. 它的优点是计数率较高, 受对撞区的位置、形状以及对撞机工作条件的影响很小. 我们设计的这套测量系统能测量对撞机的亮度, 并能迅速地反馈以便调整它. 另外, 我们还希望能得到每一个束团的相对亮度信息, 乃至束流对撞轴夹角和对撞点位置变化的信息.

1 物理模拟

亮度信号主要来自单韧致辐射过程($e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^- + \gamma$), 又叫作辐射 Bhabha 过程. 出射光子沿着入射粒子束流方向成柱对称, 且集中在 $\sim m_e/E_{\text{beam}} = 1/\gamma$ 角度内, m_e 是电子的质量, E_{beam} 是入射 $e^-(e^+)$ 的能量. 能谱分布近似为 $1/k$, k 是出射光子的能量. 出射光子的最大能量 k_{max} 满足:

* 收稿日期: 2002-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(10175060)

作者简介: 杨杰, 女, 1973年生. E-mail: physics_yang@sina.com

$$k_{\max} = \frac{\omega}{2} - \frac{m_e^2 c^4}{2\omega} \cong \frac{\omega}{2}$$

ω 是对撞束在质量中心系的总能量。

这个过程的蒙特卡罗程序 BBBREM 是由 Kleiss 写出的一个快速模拟程序,它对电子的散射角没有限制^[3]. 为了得到更为精确的辐射光子的性质,我们也使用了此过程的精确微分截面表达式^[4],蒙特卡罗抽样出光子的分布. 为了避免光子能量在零处的红外发散,这两种方法都需要给出光子的最小能量截断值 k_T , 此值对应着探测器探测光子的最小值. 从图 1 定义出射角为光子与入射粒子束流方向夹角,总截面为光子能量大于 k_T 出射角小于 $\pi/2$ 的积分截面. 在图 2 中可以看出,在 0.5 mrad 内的光子数占总数的 66% 以上,1 mrad 内的占 87% 以上. 总截面与能量截断的关系见表 1.

表 1 总截面与能量截断的关系

(取 $L = 10^{33}(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$)

Tab. 1 Relation between total cross section and energy threshold (choosing $L = 10^{33}(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$)

能量截断/MeV	总截面/mb	计数率/ 10^8 s^{-1}
50	161.120	1.610
100	120.260	1.200
200	82.632	0.826
400	49.438	0.494
600	32.612	0.326

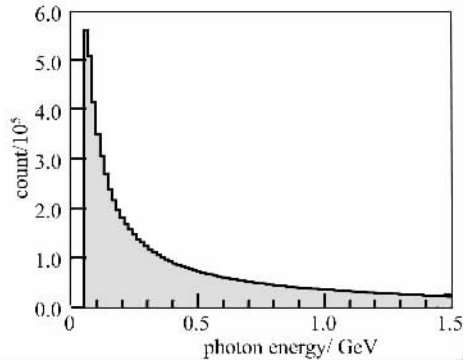
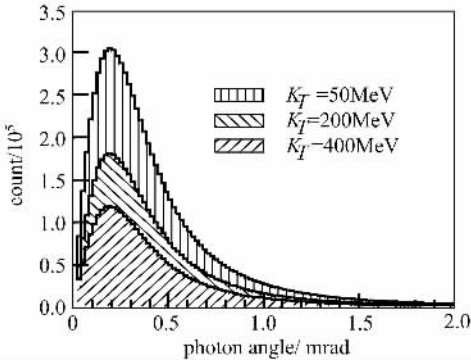


图 1 用 BBBREM 模拟的出射光子的角分布和能量分布图

Fig. 1 Angle and energy distributions of the emerging photons simulated by BBBREM program

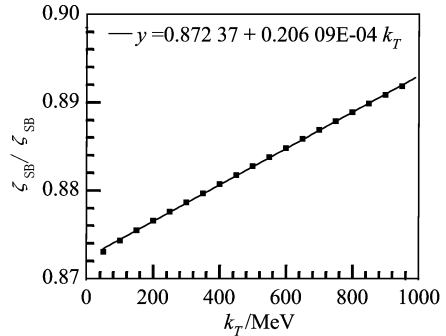
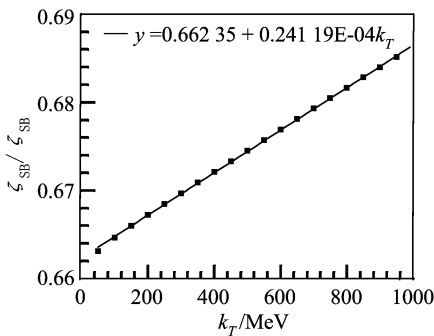


图 2 $\zeta = 0.5 \text{ mrad}$ 和 1.0 mrad 内的截面占总截面的份数与能量截断的关系图

Fig. 2 The ratios of cross section within 0.5 and 1.0 mrad to total cross section as a function of energy threshold

光子角分布的方差 σ 由对撞轴夹角的方差 σ' 和 $1/\gamma$ 决定, $\sigma = \sqrt{\sigma'^2 + (1/\gamma)^2}$, 取 σ' 为 0.4 mrad , $1/\gamma$ 为 0.333 mrad , σ 为 0.52 mrad . 我们的探测器放在离对撞点 10 m 处的地方,

则斑点的半径为 0.52 cm . 当对撞轴夹角或对撞点位置变化时, 在固定接收角范围内的光子个数也会随之变化. 从图 3 和图 4 可以看出接收角为 0.5 mrad 时接收到的光子个数对对撞

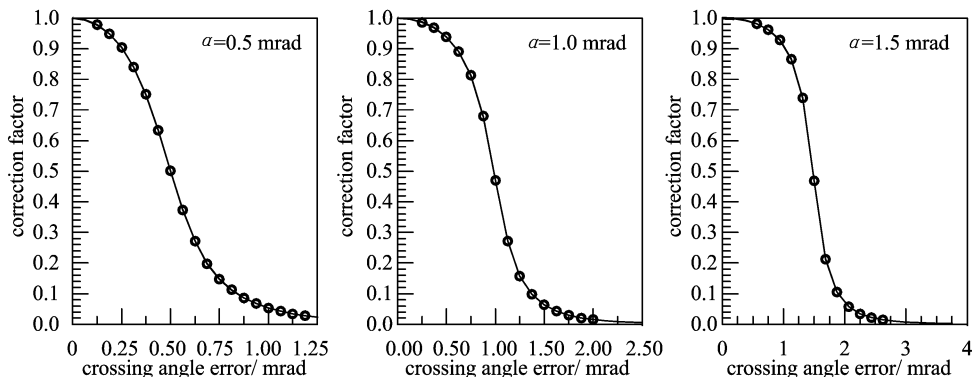


图 3 不同接收角下相对接收光子个数随对撞轴夹角变化的关系曲线(取正常情况下为 1)

Fig. 3 Relations between relative number of photons and the IP crossing angle error with different accepted angle (choosing normal to 1)

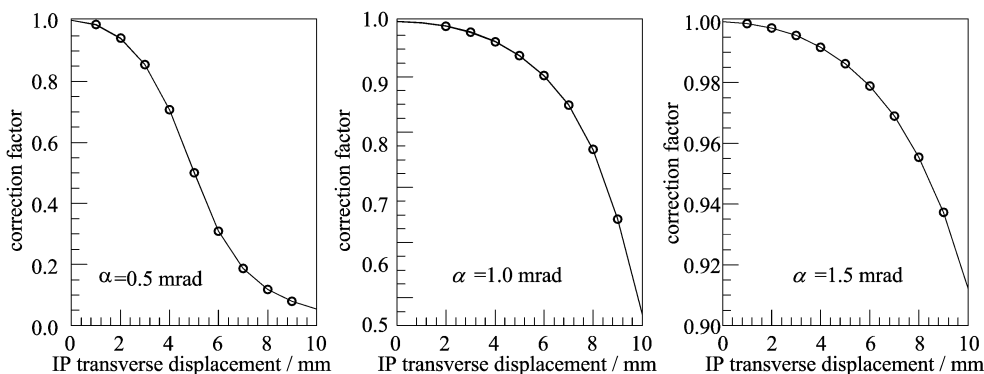


图 4 不同接收角下相对接收光子个数随对撞点位置变化的关系曲线(取正常情况下为 1)

Fig. 4 Relations between relative number of photons and the IP displacement with different accepted angle (choosing normal to 1)

轴夹角和对撞点位置十分灵敏, 随着接收角的增加, 灵敏度迅速下降. 所以在测量亮度时接收角应尽可能的大, 而在监测对撞轴夹角和对撞点位置时横向颗粒度应 $< \sim 1$ cm.

单韧致辐射过程的辐射量很大, 不能用闪烁晶体直接收集. 此过程的微分截面有一个近似公式 $\frac{d\sigma}{dk} = \frac{C}{k} \ln \left(\frac{S}{m_e^2} \right)$, 其中 $C = 3.0$ mb, S 是对撞束在质量中心系的总能量的平方^[3]. 取 $L = 10^{33} (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$, 则产生光子的功率 $P = L \int dk \frac{C}{k} \ln \left(\frac{S}{m_e^2} \right) \cdot k = 12.54 \text{ mW} = 1.25 \times 10^5 \text{ erg/s}$, 扩展在一个 σ 面积(1.6 cm^2)区域内, 如果晶体每辐射长度吸收光子能量的 10%, 物质的辐射长度为 10 g/cm^2 , 辐射危害为 $\frac{dD}{dt} = \frac{1.25 \times 10^5 \text{ erg/s}}{1.6 \text{ cm}^2} \cdot 0.01 \text{ cm}^2/\text{g} \approx 8 \times 10^7 \text{ rad/yr}$. 这已经超出了闪烁晶体的抗辐照量.

下面考虑此过程的本底. 一种主要的本底是同步辐射光, 它的角分布与辐射 Bhabha 相

似,功率很大,但能量很低. 如果 BES III 选用超导磁铁,磁场是 1 T,电子流强 288 mA. 由公式

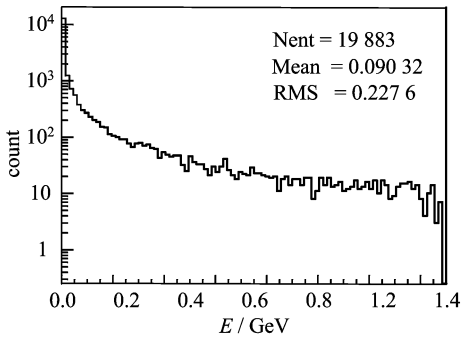


图 5 束流-气体韧致辐射光子的能谱分布图

Fig. 5 Energy distribution of beam-gas bremsstrahlung photons

可得出同步辐射功率为 25.8 kW,光子的临界能量为 1.496 keV,角发散度为 0.333 mrad. 如此低能量的光子可以很容易地被吸收,对本装置的影响很小. 另外一种主要的本底是束流-气体韧致辐射产生的光子. 束流在真空度为 1.3×10^{-5} Pa 的储存环内飞行 30 m,与气体作用产生韧致辐射光子,光子的个数约是辐射 Bhabha 的百分之一左右. 这种过程与束流是否对撞无关,即过程中产生的本底与单束流运行产生的束流-气体韧致辐射相同,可以测出它的谱形,并在最终结果中扣除它的贡献,见图 5. 双韧致辐射也是一种本底,根据计算可

得它的截面约是辐射 Bhabha 的 0.1%,故可以忽略.

2 初步设计考虑

我们的基本思想是:把高能的光子转化为带电的粒子,收集带电粒子产生的 Čerenkov 光,由它们的正比关系得出亮度信息. Čerenkov 辐射的发光时间很短,一般小于 ns 量级,可以作快速测量,但此过程比较复杂,只能作相对亮度测量. 具体设计如下:

在对撞点沿束流方向的储存环壁上开一个窗,让光子可以出射. 离对撞点 10 m 处放置一个铅的转换器,把辐射 Bhabha 产生的光子转换为带电粒子——电子和正电子. 后面是高纯度的熔融石英 (fused silica) 辐射体,它有很好的抗辐射性能. 熔融石英的折射率在很大光谱范围内的平均值为 1.46,产生的 Čerenkov 光与入射带电粒子夹角为 47° ,全反射角为 43° . 把它做成是一个长方体,并在侧面切去一个一定角度的棱角,让光从这个切面出射. 光在辐射体内经过多次全反射到切面上,如果它的入射角小于全反射角就折射出来;反之,就会从别的面折射出去. 从切面出射的光子通过一个内部镀铝的圆筒引入光电倍增管 (具体见图 6). 这种辐射体可以并排放 4 块,前两块用来测量亮度,后两块给出对撞点和交角的信息. 下面模拟设计转换体的厚度和辐射体尺寸.

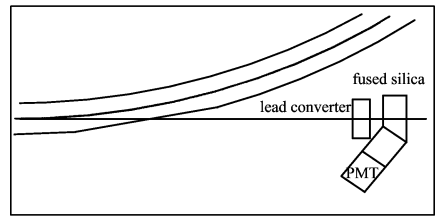


图 6 亮度监测器的初步设计图

Fig. 6 The preliminary layout of luminosity monitor

把 BBBREM 模拟产生的光子作为输入,用 GEANT3 模拟光子通过不同辐射长度的铅板,得到出射电子和正电子的个数、能量、角度和位置信息,见表 2. 综合表 2 可知厚度选择 3.5 个辐射长度比较合适,这样不但可以得到最多的带电粒子(出射的电子谱见图 7),同时还可以吸收同步辐射本底. 选择 3.5 个辐射长度进行下面的模拟.

由于 GEANT3 在模拟大量 Čerenkov 光子时会出现内存溢出现象,而 GEANT4 解决了这一问题. 各元件按上述设计放置,用 GEANT4 对辐射体的光收集效率进行模拟. 设辐射体的厚度为 z ,宽度为 $2x$,高度为 $2y$,切面的法线方向与原面的法线方向的夹角为 Δ . 如果不希望有光子直接打到切面上,要求 $x : z \geq \sqrt{n^2 - 1} = 1/0.9$,取 $x = 3.0$ cm, $z = 2.7$ cm. 选取

表 2 出射电子和正电子的个数、平均能量、角度与通过不同厚度的铅板的数据

Tab. 2 The data of the number, average energy and angle of electron and positron emitted from lead converters with different thickness

辐射长度数	e ⁻			e ⁺		
	个数	E / MeV	θ / (°)	个数	E / MeV	θ / (°)
2.5	116 025	57.71	26.34	105 963	65.6	23.96
3.0	127 983	47.32	28.61	114 652	54.96	25.97
3.5	133 498	40.46	30.02	117 465	47.20	27.59
4.0	133 904	34.86	31.54	115 565	41.80	28.79
4.5	130 764	30.63	32.71	111 333	37.17	29.75
5.0	125 903	27.15	33.94	104 836	33.59	30.94

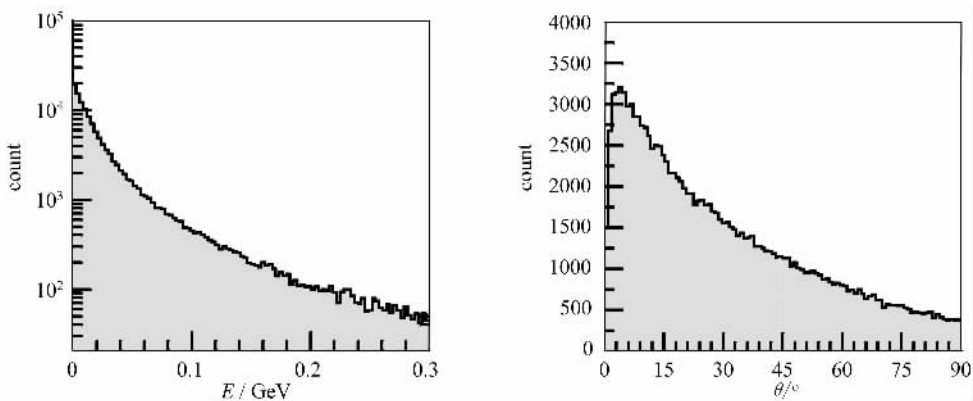


图 7 从 3.5 个辐射长度的铅转化体出射的电子谱能量和角分布

Fig. 7 The energy and angle distribution of the electrons from 3.5 radiation lengths thick lead

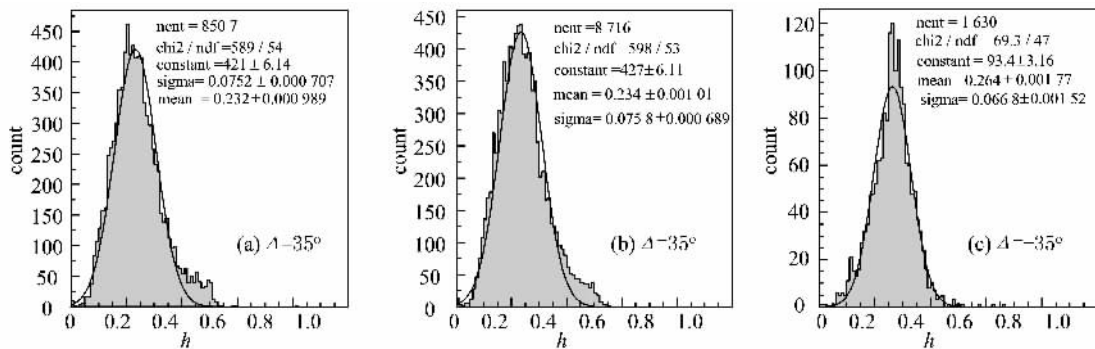


图 8 用 GEANT4 模拟的光收集效率

Fig. 8 Light collection efficiency simulated by GEANT4

$\Delta = 35^\circ$ (切去靠近转换体的那个菱角), y 分别为 2.5 cm 和 4.2 cm, 作出的光收集效率见图 8(a) 和 (b). 另外 $\Delta = -35^\circ$ (切去远离转换体的那个菱角), $x : y : z = 3\text{cm} : 2.5\text{cm} : 2.7\text{cm}$ 模拟见图 8(c) 和表 3.

这部分工作只作了初步模拟,要想得到最优的尺寸设计后面还需要对不同的 y 和 Δ 做更多的模拟.

3 结论

我们准备设计建造的是一个快速实时的亮度监测器,它只能进行相对的亮度测量,如果经过标定,也能给出绝对亮度.我们对此做了初步的模拟研究,辐射体的尺寸、光子出射的位置分布和最后的电子学还需要进一步研究.

参 考 文 献

- [1] 北京正负电子对撞机重大改造工程可行性研究设计方案
- [2] Ecklund S, Field C, Mazaheri G. A fast luminosity monitor system for PEP II [J]. Nucl. Instr. and Meth. A 2001, 463: 68-76.
- [3] Toshihisa Hirai. Zero-degree Luminosity Monitor for the Belle experiment[DB/OL]. <http://www.hp.phys.titech.ac.jp/prepri/TIT-HPE->

表 3 不同形状参数的辐射体下产生的总的和探测到的 Čerenkov 光统计

Tab. 3 The statistics of total and detected Čerenkov light from radiator with different geometric parameter

$x : y : z / \text{cm}, \Delta / (^\circ)$	\bar{N}_{tot}	\bar{N}_{det}	$\bar{N}_{\text{det}} / \bar{N}_{\text{tot}}$
3 : 2.5 : 2.7, 35	11 034	2 732	0.247 8
3 : 4.2 : 2.7, 35	11 300	2 776	0.245 7
3 : 2.5 : 2.7, - 35	11 769	3 123	0.265 4

99-09. ps. gz, 1999-03.

- [4] Kleiss R, Burkhardt H. BBBREM-Monte Carlo simulation of radiative Bhabha scattering in the very forward direction [J]. Comput. phys. Commun., 1994, 81: 372-377.
- [5] Altarelli G, Buccella F. Single photon emission in high-energy $e + e^-$ collisions [J]. II Nuovo Cimento, 1964, XXIV(5): 1 337.

Monte Carlo Study on BES III Luminosity Measurement Through Single Bremsstrahlung Radiation

YANG Jie, ZHANG Li-ming, WU Jian, XU Zi-zong, ZHANG Zi-ping

(Department of Modern Physics, USTC, Hefei, Anhui 230027)

Abstract: A fast and real time luminosity monitor will be helpful to Beijing Electron Positron Collider (BEPC) after its upgrade. The luminosity can be measured by collecting Čerenkov light induced inside radiator by charged particles which are converted from photons from single Bremsstrahlung radiations. This article explores the properties of the above process and simulates the whole process of luminosity measurement using GEANT3 and GEANT4 software packages. The optimized design parameters are given.

Key words: luminosity monitor; single bremsstrahlung process; BBBREM; GEANT