

北京谱仪 BES 辐射本底水平的测定

李金 李建平 汤月里 刘曙东 安力生 李铁辉 邵贝贝

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 北京谱仪 BES 辐射本底水平是由大厅内的辐射水平决定的. 降低厅内的辐射水平是减少 BES 的辐射本底和提高 BES 探测效率和“信噪比”的重要途径. 文中着重研究了谱仪厅内辐射本底的强度, 来源及特点, 并探讨了减少辐射的方法.

关键词 北京谱仪 BES 辐射本底 粒子丢失 辐射剂量

1 辐射本底来源及特点

北京谱仪 BES^[1]是北京正负电子对撞机 BEPC^[2]上用于探测粒子的大型通用磁谱仪, 位于 BEPC 储存环的南端, 距能量为 1.1GeV 正负电子注入点约 60m. 谱仪大厅与储存环隧道相联通, 平面布置见图 1.

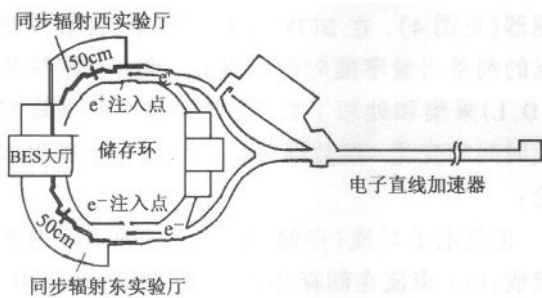


图 1 BEPC 和 BES 平面布置图

BEPC 储存环的注入是采用多圈阻尼方式进行的, 当来自输入线的注入束流到达储存环注入点时, 位于储存环注入区内的快速冲击磁铁将闭轨中心移向注入束, 注入束以一定初始振幅进入储存环内, 某些粒子由于角度或位置不合适, 可能被损失在储存环注入区的其他位置. 其余粒子经过一定时间的阻尼后, 振幅衰减, 等待进行第二次注入. 所以注入有一定的效率. 特别是来自直线加速器的正电子(e^+)脉冲流强较低, 注入效率一般只能达到约 50%, 因此通常需要注入上万次才能达到储存环所要求的

流强.

注入结束后, 在束流被加速到储存环运行能量或转换到对撞(储存)模式过程中可能再损失约 10%.

束流在稳定地对撞(储存)时, 束流还会由于各种原因逐渐衰减, 主要有束-束韧致辐射损失, 量子起伏损失和托歇克效应损失等. 束流的衰减服从指数规律, BEPC 总的束流寿命一般为 6—8h.

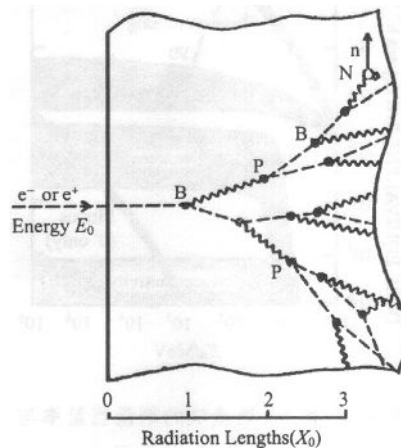


图 2 电磁级联过程示意图

能量大于临界能量 E_c 的电子入射到介质中, 会产生韧致辐射(通常称为韧致辐射光子, 如图 2 中的波纹线所示), 其中部分高能量(大于 1.02MeV)的光子会产生正负电子对(图 2 中的虚线表示), 而电子再产生韧致辐射, 光子又再产生电子对, 如此重复

进行直至能量全部损失。同时,部分具有足够能量的光子又能在核 N 上发生 (γ, n) 光核反应产生中子。当光子能量在光核反应阈值以上、30MeV 以下时,称为巨共振反应。当光子能量大于 30MeV 时,发生伪氘核反应,可以产生能量大于 20MeV 的中子。

电子束流在注入期间产生的辐射占空比是由注入束流的脉冲宽度(2.5ns)和重复频率(12.5pps)所决定。电子束流在存储期间产生的辐射场占空比是由束团长度(0.5ns)和重复频率(12.5×10^5 pps)所决定。

1.1GeV 电子与物质相互作用,产生的韧致辐射光子能谱为连续谱,最高能量为电子能量。角分布各向异性,在与入射电子束方向成 0° 的方向最强。

根据巨共振光核反应的机制,产生的中子具有“蒸发能谱”,即近似于裂变中子能谱,角分布各向异性。光子、中子以及 μ 子的剂量当量率与电子能量(束流功率)的关系见图 3,该图给出 1kW 电子束打靶产生的次级辐射在距靶 1m 处造成的剂量当量率与电子能量 E_0 的关系,图中曲线的宽度是由于靶物质的材料和厚度不同造成的。

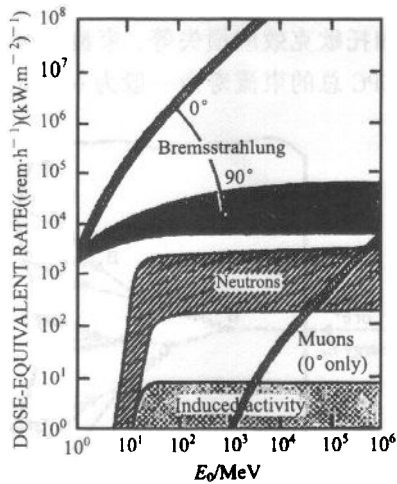


图 3 距靶 1m 处造成的剂量当量率与电子能量 E_0 的关系

2 测量方法

为测量北京谱仪 BES 周围,即北京谱仪大厅内的 γ 和中子的辐射剂量,安排了由 3 台中子,5 台 γ 探测器和数据采集器(D.D.L)组成的测量系统。

探测器满足以下要求:

- 1) 对于脉冲辐射场有正确的剂量响应;
- 2) 能对低水平辐射和高水平辐射进行剂量测

量,即有较宽的剂量测量量程;

- 3) 有合适的能量响应范围。

测量所用的监测器的主要技术指标如下:

- a) 高灵敏度中子监测器^[3]:

注量率灵敏度 12cps/n/cm²·s

能量响应范围 0.2eV—5MeV

抗 γ 性能 对 0.65mSv/h 以下不灵敏

- b) 中子雷姆计数器^[4]:

灵敏度 200cps/mSv/h

测量范围 10^{-3} — 10^3 mSv/h

抗 γ 性能 对 2Sv/h 以下不灵敏

- c) γ 监测器^[4]:

灵敏度 5×10^{-4} μ Sv/脉冲

测量范围 0.1 μ Sv/h—1mSv/h

能量范围 50keV—3MeV

3 测量结果

为测量正负电子注入或对撞(存储)期间厅内的辐射水平,在北京谱仪的周围布置了 8 台中子和 γ 监测器。在 BES 大厅与 BEPC 隧道联接处,东、西耐火砖屏蔽墙(厚度为 0.5m)的两侧布置了中子和 γ 监测器(见图 4)。在 BEPC 运行过程中,连续测量了各点的剂量当量率随时间的变化,并由数据采集器(D.D.L)采集和处理了数据,得到每天的剂量当量率随时间的变化。经数据分析处理后可以得出以下结论:

3.1 正负电子对撞(存储)期间辐射的来源由两部分组成:(1)束流在储存环内对撞(存储)过程中,发生电子束流的损失,损失的电子与周围部件结构材料发生相互作用产生次级辐射,主要是韧致辐射光子,其次是中子,还可能有 μ 子等。这些辐射产生在北京谱仪大厅内真空管道及各部件附近,称之为“本

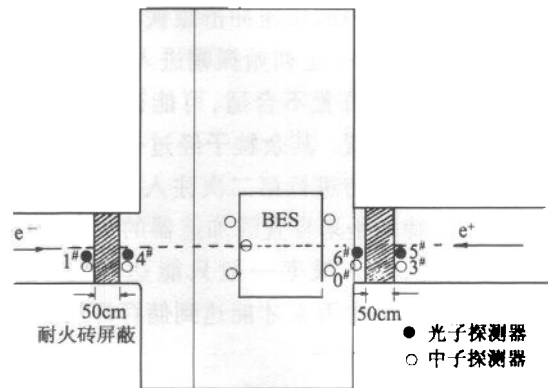


图 4 BES 大厅的屏蔽及测量点的布置

地辐射”。(2)另外一些辐射不是在大厅内各部件附近,而是在大厅外某处产生的,如 e^+ 或 e^- 注入区产生,通过隧道经过多次散射传输到厅内,称为“外来辐射”。从图 5,图 6 和图 7 中都可以看到, e^+ 或 e^- 束流向储存环注入和对撞(储存)过程中,中子和光子的剂量当量率随时间的变化。束流在注入期间产生较高的瞬时剂量当量率(图中的峰值),对撞(储存)期间剂量水平较低,并且随时间衰减,持续时间较长。本文首先讨论束流对撞(储存)期间的辐射来源和特点,然后再讨论注入期间的辐射强度及特点。

3.2 “本地辐射”

从图 5(a)和图 6(a)中可以看到,在束流处于对撞(储存)期间中子剂量当量率随时间的变化在半对数坐标中为一直线(个别有扰动),即按指数函数变化。我们知道,中子只能产生在电子束流损失形成的瞬时辐射中,与剩余辐射无关。这表明环内电子

束流损失与中子一样按指数函数随时间变化。从图 5(b)和图 6(b)半对数坐标中可以看到,在同一监测点,光子剂量当量率随时间变化不是 1 条直线,它是 2 条直线的和。

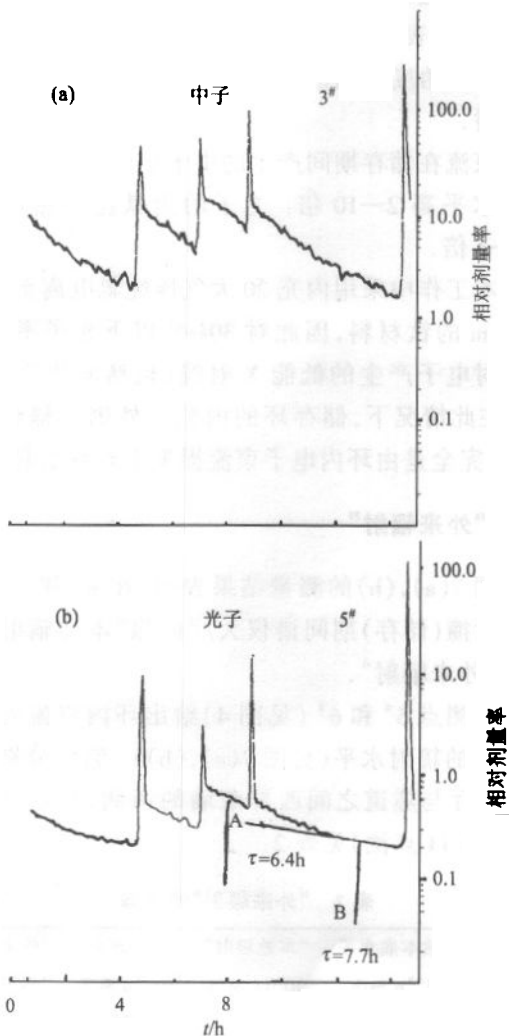


图 5 (a),(b)束流注入和对撞(储存)期间,中子和光子剂量当量率随时间的变化(3号,5号位置)

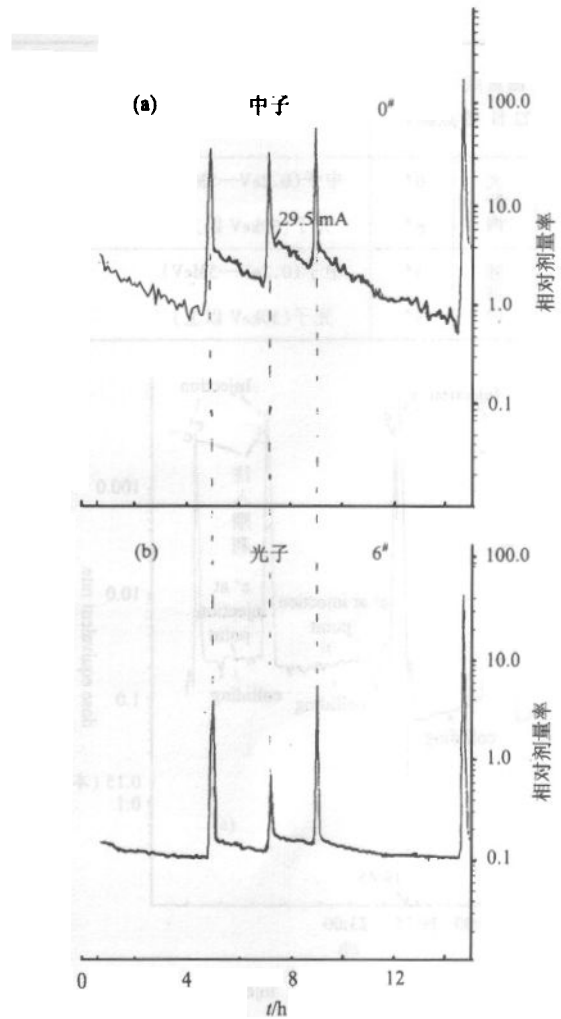


图 6 (a),(b)束流注入和对撞(储存)期间,中子和光子剂量当量率随时间的变化(0号,6号位置)

用作图法可将该曲线分析成 A, B 2 条直线。直线 A 表示电子束流损失产生的辐射随时间按指数函数减弱。直线 B 表示了储存环部件活化,剩余辐射随时间衰减,其半衰期为 14h。一般来讲,储存环先注入 e^+ , 然后注入 e^- , 但有时不太顺利,此时可看到 e^+ 和 e^- 注入峰明显分开(见图 7(b)), 储存时剩余辐射成分明显。注入顺利时(即图中 e^+ 和 e^- 峰重合), 剩余辐射成分明显减少。在屏蔽墙大厅内一侧监测到的剩余辐射成分少, 而屏蔽墙隧道内一侧监测到的剩余辐射成分明显增多(见图 5(b)和图 6(b))。这些现象说明了厅内剩余辐射主要是在注入期间由高强度的光子和中子辐照引起储存环部件结

构材料的活化形成的. 在环内无束流时, 可以看到这一剩余辐射叠加在本底之上. 图 5 及图 6 为单束 (e^-) 注入储存期间(同步辐射专用模式)时, 剂量当量率随时间的变化. 中子和光子从大厅西屏蔽墙两

侧监测点的测量结果(见表 1)可以看出, 厅内监测器测量辐射水平比隧道内监测器辐射水平低. 这说明辐射来源于本地. 天然辐射水平及光子和中子剂量当量率之比见表 1.

表 1 中子与光子的剂量当量贡献比值

测量点 (6月22日15点测)		辐射种类及监测器 能响范围	天然本底水平 $10^{-2} \mu\text{ Sv/h}$	储存期间辐射水平 $10^{-2} \mu\text{ Sv/h}$		最高辐射水平 (减本底)	光子与中子 剂量贡献比
				最高	最低		
大厅西屏蔽墙两侧	大厅内	0° 中子(0.2eV—5MeV)	0.3	3	0.63	2.7	2:1
		6° 光子(30keV以上)	10	15	10	5	
	隧道内	3° 中子(0.2eV—5MeV)	0.13	12	1.5	11.87	3:1
		5° 光子(30keV以上)	16	52	20	36	

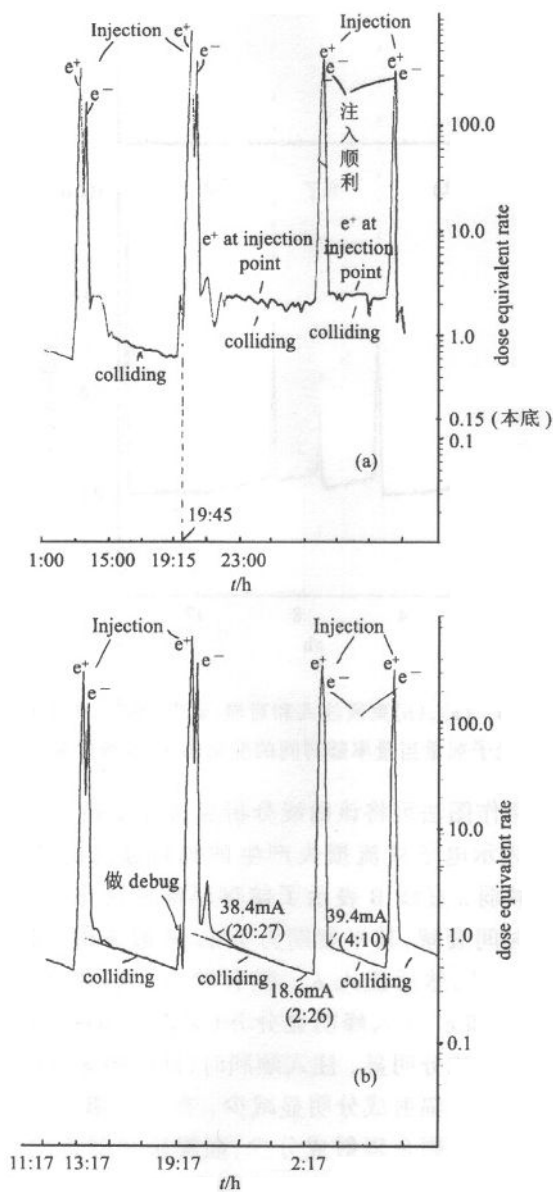


图 7 (a),(b) e^+ “停留”在注入点时西屏蔽墙两侧的光子的辐射水平

束流在储存过程中由于束流损失产生的辐射, 由图 3 可知, 在与电子束入射方向成 90° 方向的辐射光子与中子的剂量当量率比与 0° 方向比较为最小. 在本次测量中得到的光子与中子剂量贡献比为 2:1 与 3:1. 这表明测到的辐射水平, 大都来自与入射电子束成大角度方向的辐射, 即在测定附近部件产生的辐射.

束流在储存期间产生的中子剂量当量率比天然本底水平高 2—10 倍. 光子的贡献比天然本底高 1.5—4 倍.

本工作中采用内充 20 大气压纯氩电离室, 壁厚为 3mm 的钛材料, 因此对 30keV 以下光子不灵敏, 所以对电子产生的低能 X 射线(包括同步光)不灵敏. 在此情况下, 储存环的内侧比外侧的辐射水平高, 这完全是由环内电子束流损失不对称引起的.

3.3 “外来辐射”

图 7(a),(b)的测量结果表明, 在 e^+ 和 e^- 束流处于对撞(储存)期间谱仪大厅内除“本地辐射”外, 还有“外来辐射”

监测点 5° 和 6° (见图 4)给出环内束流处于对撞状态的辐射水平(见图 7(a),(b)). 它们分别处于 BES 大厅与隧道之间西屏蔽墙的两侧, 测量结果(5月 26 日 11 点测)见表 2.

表 2 “外来辐射”的贡献

监测点	天然本底水平	“本地辐射”	“外来辐射”	“外来辐射”
	$10^{-2} \mu\text{ Sv/h}$	$10^{-2} \mu\text{ Sv/h}$	$10^{-2} \mu\text{ Sv/h}$	“本地辐射”
5°	16	50	200	4 倍
6°	10	50	0	0

由图 7(a)可知, “外来辐射”是在 e^+ 和 e^- 注入

后,环内束流处于对撞(储存)出现的.它的辐射水平不随时间变化,不像“本地辐射”那样辐射水平随时间按指数函数衰减.按该辐射出现的时间与 e^+ 和 e^- 束流运行状况核对,表明此时是 e^+ 和 e^- 束流先后向环内注入完了之后,来自直线加速器的注入束流没有偏向垃圾桶而打在注入点附近的部件上,产生的次级辐射,通过隧道经过多次散射传输到 BES 大厅.

监测点 6[#]在屏蔽墙大厅内侧,它测到的只是“本地辐射”,与监测点 5[#]同一时刻测得辐射数据比较表明,由于耐火砖屏蔽墙的作用,“外来辐射”被 0.5m 厚的耐火砖屏蔽墙屏蔽掉(见图 7(a)与(b)).这一测量结果表明(见表 2),正负电子对撞期间,厅内辐射主要来源是“外来辐射”,它是天然本底的 20 倍,是“本地辐射”的 4 倍.在大厅的东、西两侧设置的屏蔽墙,是减少厅内“外来辐射”的有效办法.对正电子(1.1GeV)打在注入点产生的瞬时辐射估算如下:

计算时用的参数: e^+ 的能量 1.1GeV,脉冲宽度 2.5ns,脉冲流强 3mA,重复频率 12.5pps,平均电流 9.4×10^{-11} A,平均功率 0.1W.

按图 3 与经验公式:

$$H_p = \frac{K_p \cdot J \cdot B}{(s + d)^2 / \sin^2 \theta} \exp\left(\frac{\mu_p \cdot \rho \cdot d}{\sin \theta}\right),$$

其中 K_p 是单个电子打靶后,在距靶 1m 处由光子产生的剂量当量:

$$K_p(E_0, \theta) = \frac{1.8 \times 10^{-5} E_0}{(1 - 0.9 \cos \theta)^{1.2}},$$

$$\begin{aligned} K_p(E_0, 90^\circ) &= 1.8 \times 10^{-6} E_0 (\text{GeV}) \quad (\mu\text{Sv}/e) \\ &= 1.8 \times 10^{-5} E_0 (\text{GeV}) \quad (\mu\text{Sv}/e). \end{aligned}$$

计算结果:能量为 1.1GeV 束流功率为 0.1W 的正电子打靶时,在距靶 1m 与入射束流成 0° 和 90° 方向处产生的光子剂量当量率:

$$\dot{H}_\gamma(0^\circ) = 30\text{Sv}/\text{h}/\text{m}^2 \cdot 0.1\text{W},$$

$$\dot{H}_\gamma(90^\circ) = 3 \times 10^{-2}\text{Sv}/\text{h}/\text{m}^2 \cdot 0.1\text{W}.$$

在距靶 60m 处产生的光子剂量当量率:

$$\dot{H}_\gamma(0^\circ) = 8\text{mSv}/\text{h},$$

$$\dot{H}_\gamma(90^\circ) = 8\mu\text{Sv}/\text{h}.$$

考虑到束流管道、各部件以及隧道墙壁对辐射的散射都会使辐射在传输过程中减弱.到达 BES 厅内的辐射水平完全可以达到 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$.

此外,环内束流处于储存(对撞)状态,有 e^+ “停”在注入点时,在同步辐射西厅产生较高辐射剂量,在 BES 大厅内也有较高辐射水平,但对第二对

撞点的辐射剂量无影响.这表明辐射在注入点产生,而且有明显方向性,(见图 3)第二对撞点在 e^+ 入射点的大角度方向上,辐射水平明显低.

3.4 束流向储存环注入期间在大厅内产生的辐射剂量

从图 7 中可以看到,注入时在大厅内产生的瞬时剂量当量率比对撞期间明显高 2—3 个量级.这一辐射是在注入区产生的,属于“外来辐射”.并具有以下特点:

- (1) 脉冲辐射场,其占空比为 3×10^{-8} ;
- (2) 光子与中子混合辐射场;
- (3) 中子和光子能量范围宽.

e^+ 或 e^- 束流向储存环注入时,从图 7 可以看到,第一对撞点有显著高的瞬时剂量当量率,我们同样看到在第二对撞点明显高的剂量当量率.这里看到现象与 e^+ “停”在注入点完全不同.说明注入期间束流损失,不仅在注入点,注入区有较大束流损失,而且沿整个储存环都有束流损失.一旦注入结束,束流进入储存状态,这束流损失明显减少,并随时间按指数规律变化.

在 BES 大厅和隧道相联接的屏蔽墙两侧,注入期间测量的结果同样表明,屏蔽对注入期间产生辐射无减弱作用.从环境辐射观察也看到这一点,屏蔽后环境辐射无明显减少.

4 辐射本底的屏蔽的效果

通过测量和分析,不难看出,在大厅与储存环隧道联接处设置两堵耐火屏蔽墙(0.5m 厚的耐火砖屏蔽墙,见图 4)有以下几点好处:

1) 可以屏蔽掉束流处于对撞(储存)期间的“外来辐射”.从表 2 看出, e^+ 打在注入点产生的辐射,在大厅内形成辐射是对撞期间厅内辐射的主要来源.屏蔽掉它是减少 BES 辐射本底,提高 BES 的“信噪比”的有效办法.

北京谱仪的实验数据也证明了这一点.没有屏蔽墙的时候,BEPC 的亮度为 $5 \times 10^{29} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$,桶部飞行时间计数器的计数率为 13400/s,端部飞行时间计数器的计数率为 6543/s,总的触发率为 4.75/s.有了屏蔽墙之后,BEPC 的亮度为 $7 \times 10^{29} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$,北京谱仪在相同条件下的测量,桶部飞行时间计数器的计数率为 9044/s,端部飞行时间计数器的计数率为 1784/s,总的触发率为 2.56/s.做亮度归一之后,

桶部飞行时间计数器的计数率减少到原来的 48%，端部飞行时间计数器的计数率减少到原来的 20%，总的触发率减少到原来的 37%。

2) 屏蔽对束流注入期间在大厅内产生的辐射水平可以降低近一个量级,减少 BES 结构部件的辐射损伤。同时减少 BES 结构部件在束流注入期间的活化,从而降低储存期间活化部件产生的剩余辐射,

即降低厅内的辐射水平。

3) 减少由 BES 大厅顶盖的辐射泄漏产生的天空反射效应,使环境辐射水平降低。提高调束期间 BES 大厅内工作人员的辐射安全性。另外,在储存环实现 e^+, e^- 对撞后,将直线加速器来的束流偏向垃圾桶而不直接损失在注入点附近,将会减小隧道内不必要的辐射,也十分有利于减少 BES 的辐射本底。

参考文献 (References)

- 1 XIE Jia-Lin et al. Beijing Electron-Positron Collider and Beijing Spectrometer. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Pub., 1996 (in Chinese)
(谢家麟等. 北京正负电子对撞机和北京谱仪. 杭州:浙江科学出版社,1996)
- 2 BES Collaboration. BES Detector Nucl. Instr. Meth. 1994, **A334**:319
- 3 TANG Yue-Li et al. Nuclear Electronics and Detection Techniques, 1988, **8**:244
- 4 LI Jian-Ping et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1988, **12**:1 (in Chinese)
(李建平等. 高能物理与核物理,1988,12:1)

Measurement for Radiation Background of BES Detector

LI Jin LI Jian-Ping TANG Yue-Li LIU Shu-Dong AN Li-Sheng LI Tie-Hui SHAO Bei-Bei

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The radiation background of BES detector depends on the radiation level in the BES experimental hall. The way to reduce radiation level of experimental hall is very important for suppression of radiation background of BES and improvement of detection efficiency. The radiation level, the source and distinguishing feature of radiation background have been studied. The way to reduce the radiation has been discussed.

Key words Beijing Spectrometer (BES), radiation background, particle lost, radiation dose