

北京正负电子对撞机本底辐射及 高 Z 闪烁体辐照损伤研究

陈宇 戴长江¹⁾ 顾以藩 雷传蕻¹⁾
李建平¹⁾ 刘曙东¹⁾ 邵贝贝¹⁾ 汤月里¹⁾

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要

在北京正负电子对撞机上首次从粒子物理实验的需要出发开展了对撞区辐射本底的系统研究. 发展了动态研究对撞区辐射水平的有效方法, 能够灵敏地反映出对撞机不同工作状态下的本底辐射水平与其分布情况以及在对撞状态下随时间变化的规律. 考察了国产 BGO 及 BaF₂ 晶体在对撞机辐射环境中的抗辐照性能.

一、引 言

在正负电子对撞机上开展粒子物理实验, 辐射本底是首先需要认真研究的问题. 了解对撞区辐射环境, 对于探测器的合理设计、实验条件的恰当安排以及保证实验高质量进行都有着重要意义.

国外对撞机上的实验工作提供了不少可资借鉴的正反经验. 在 SPEAR 对撞机上工作的晶体球探测器, 由于预先研究了对撞机本底辐射情况, 并采取了相应措施, 从而保证了它在对撞机上多年工作期间未曾受到本底的辐照损伤^[1]. 相反, 在 PEP 对撞机上的双光子实验所采用的 NaI(Tl) 双臂磁谱仪, 在未加必要的屏蔽措施的情况下, 由于注入时电子束“丢失”所致的超量辐照, 造成了 60 块大 NaI(Tl) 晶体严重损伤的不幸事故^[2].

在正负电子对撞机环境中, 本底辐射的来源, 除宇宙线外, 还可能为: 正负电子束在弯转磁铁处以及聚焦磁铁处产生的同步辐射; 正负电子束在管道内以及在对撞点处与残余气体的相互作用; 在对撞点处的束-束相互作用; 以及双光子作用过程^[3]. 在通常类型的储存环对撞机环境中, 本底主要来自聚焦磁铁处的同步辐射 X 射线以及束与残余气体的相互作用, 后者形成的慢化电子和部分韧致辐射光子通过电磁簇射过程产生能量分布很宽

1) 参加了 BEPC 对撞区本底辐射研究的实验工作.

的 γ 射线,而能量高出光核反应阈值的光子还可能产生中子.

在充分了解本底辐射情况的基础上,可以针对性地采取措施来改善对撞机辐射环境或减小其对粒子物理实验可能产生的不利影响.另一方面,由于探测器(以及若干电子学线路)所用材料与元件在工作条件下长时间地处于对撞区辐射环境中,它们的抗辐照能力也是探测器设计中不可忽视的一项指标要求.

近年来,为新一代对撞机实验而设计的探测器方案强调了对于电子和光子的精密测量,并建议采用高原子序数无机闪烁晶体(例如BGO, CsI, BaF₂等)作为全吸收电磁量能器材料^[4-6].这类晶体材料的辐照损伤性能及其可能的改进途径成为粒子物理实验人员与材料科学工作者共同关心的问题,随着对撞机能量和亮度的提高,其重要性愈见突出.

本文报道在北京正负电子对撞机(BEPC)上对于对撞区的本底辐射以及在该辐射环境中若干国产闪烁晶体的抗辐照性能进行研究的实验结果.

二、BEPC 对撞区本底辐射研究

1. 测量方法

在对撞机上通常采用热释光剂量计(TLD)来测量和监视对撞区本底辐射情况^[1,7].这种方法简便可靠,但仅能给出累积辐射剂量.

在本工作中,采用了多个TLD分布在北对撞区内紧贴与离开束流管道的一些选定点上,测量比较了1989/1990及1990/1991两次运行期间对撞区本底辐射水平及其分布情况.所用TLD外包工业塑料及铜过滤器,对 γ 射线的能量响应范围为30keV—4MeV,总的测量误差不大于 $\pm 10\%$.

与此同时,在原设计用于高能物理研究所质子直线加速器及BEPC环境辐射监测系统的 γ 及中子探测器的基础上,发展了动态研究对撞机辐射水平的有效方法.所用 γ 及中子探测器的性能详见文献[8],总的测量不确定度,前者约为6%,后者约为11%.由6套 γ 探测器和3套中子探测器组成的测量系统安放在北对撞区的特定位置上,在线测量各点本底辐射情况,通过数据采集处理器(D. D. L.)每15分钟采集一次数据,每周或每天一次将剂量率按时间分布作图输出.输出结果与对撞机运行历史在时间上进行归一,灵敏地反映出了对撞区辐射水平(及其分布)与对撞机工作状态之间的关系以及在对撞情况下随时间变化的规律.利用这种方法还成功地发现了北京谱仪(BES)实验大厅内辐射本底的额外来源,从而改善了BES的辐射本底水平(详见文献[9]).

此外,还采用NaI(Tl)闪烁谱仪测量了本底辐射场 γ 能谱.谱仪用直径为5cm、厚度为4cm的NaI(Tl)闪烁晶体,经放射源检验线性并进行了能量刻度.

2. 实验结果

(1)本底辐射水平与对撞机工作状态的关系

图1给出 γ 剂量率随时间变化的典型测量结果,与对撞机工作状态很好地对应起来:当束流向储存环注入时,辐射水平急剧增高;对撞建立后,辐射水平降低并随时间逐渐衰减;当束流突然丢失或被“打掉”时,辐射水平又随之增高.测量还显示:当注入顺利时,正

负电子束依次注入的时间间隔很短,在 γ 剂量率的时间谱中将只观察到一个峰;而当注入不顺利时,则与正负电子注入相对应的两个峰能够清楚地分辨开来。

由位于离对撞点5米远处的 γ 探测器读得的对应于对撞机不同工作状态的辐射水平典型数据归纳在表1中。从表看到,注入时的 γ 剂量率与对撞建立后相比至少高出1个数量级。同 γ 剂量率数据比较,中子剂量率至少要不小1个数量级以上。

表1 不同对撞机工作状态下的 γ 剂量率

对撞机工作状态	γ 剂量率(10^{-6}Gy/h^*)
不开机	~ 0.1
储存对撞	0.28—0.42
注入	5—28
束流丢失(或打掉)	与注入同一水平

* $1\text{Gy}=100\text{rad}$

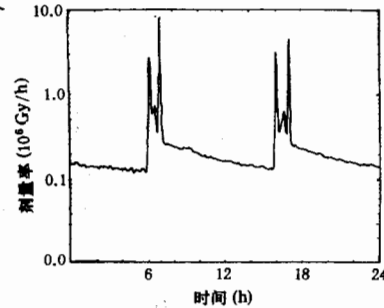


图1 γ 剂量率随时间变化的典型结果

对撞机的本底辐射水平主要为束流注入及突然丢失(或打掉)所决定的事实不难从对撞机工作原理得到解释^[10]。束流向储存环注入时,通过输运线导向元件、Lambertson 磁铁与快速冲击磁铁系统引向注入点并到达储存环中心轨道。这个过程不可避免地造成束流的瞬间显著丢失,从而导致本底辐射陡增。束流突然丢失(或打掉)可以因为高频腔高压、磁铁电源或主电源等的突然中断引起,也将造成瞬间本底辐射的增加。至于束流进入储存环后,在储存对撞期间由于束-束韧致辐射、量子起伏、残余气体散射以及 Touschek 效应而导致的损失,则是一个按指数函数随时间逐渐进行的过程,束流寿命一般可达6—8小时;与此相应,本底辐射水平也基本上随时间作指数衰减。

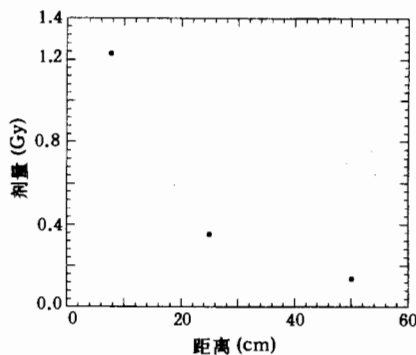


图2 累积剂量沿垂直束流线方向的分

(2)本底辐射水平的几何分布

测量表明:在沿束流线的方向上, γ 剂量率最大点当注入时靠近聚焦磁铁,对撞建立后移向对撞区中心点;累积剂量分布则表现为在聚焦磁铁附近为最大。这与本底辐射水平主要来自注入及突然丢失(或打掉)是一致的。在垂直于束流线的方向上, γ 剂量率和累积剂量均随距离增加而递减。图2显示了在对撞区中心点处累积剂量与距离的关系。

(3)不同对撞机运行期间的累积剂量水平

表2列出 BEPC 两次运行期间在对撞区沿束流线的不同位置上累积剂量的测量结果。可以看到不同运行期间累积剂量水平的显著变化。在换算成日平均剂量率后进行比较,第二次较第一次各点大约降低了半个至1个数量级,而平均达到 $\sim 0.01\text{Gy/天}$,相当于国外同类对撞机辐射水平^[1,7]。这种变化看来与对撞机运行情况密切相关。从图3给出的两次运行情况的比较^[11]不难看出,第二次较第一次运行水平明显提高,表现为储存环注入和调束时间缩短,故障时间减少,运行效率增加。预期随着运行水平的继续提高,BEPC 辐射环境还有可能进一步得到改善。

表2 BEPC 两次运行的累积剂量测量结果(单位:Gy)

运行日期	累计天数	TLD 位置(离对撞区中心点,cm)						
		-190	-100	-24	0	+24	+100	+190
89/9/8-90/1/23	135	19.33	10.19	7.82	6.99	9.08		9.72
90/10/4-91/2/6	122	1.38	1.28	1.08	1.23	1.32	1.49	1.85

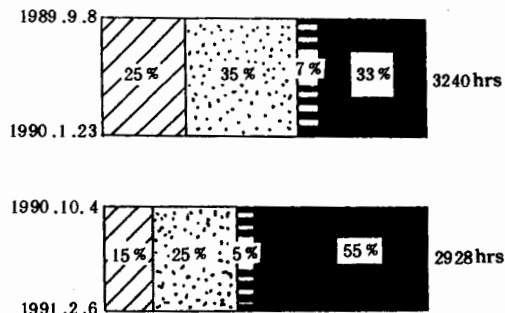
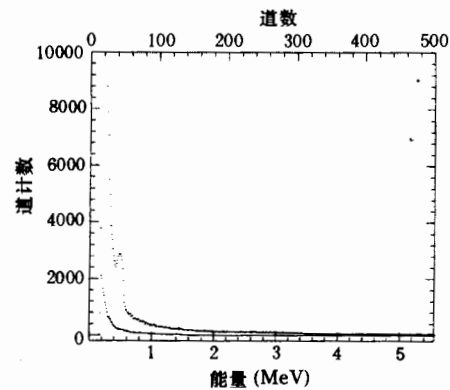


图3 BEPC 两次运行情况的比较(取自[11])

■ BES 实验; ▨ 同步辐射实验; ▩ 调束; ▧ 故障

图4 对撞建立后的 γ 本底能谱;同时表出去束情况下的相应能谱

(4)本底辐射场 γ 能谱

图4为对撞建立后在离对撞点2米远处测得的 γ 本底能谱.除在0.511MeV附近有一不甚明显的小峰外未见其他结构.图中同时表出去束时的谱形,后者到 $E_\gamma \approx 1\text{MeV}$ 处已可忽略不计.在1—5MeV之间测得的能谱数据利用幂函数拟合得到 $381E_\gamma^{-0.59} - 105$ 的能量关系,与SPEAR对撞机所得结果^[12]在形式上基本一致.

三、国产高Z闪烁晶体在BEPC辐射环境中的辐照损伤研究

1. 实验方法

采用常规的核探测技术,通过测量辐照前后晶体闪烁光输出的变化来确定其辐照损伤.晶体样品放置于光电倍增管光阴极上,从光电倍增管阳极输出的讯号经放大器后送入多道脉冲幅度分析器中进行分析.测量系统的稳定性由发光二极管(LED)光源进行监测.同时测量LED光输出幅度与晶体对 ^{137}Cs 0.662MeV γ 射线的输出脉冲幅度,得到晶体相对光输出幅度,用以消除测量系统不稳定性引起的误差.实验方法细节参阅工作[13].

为使晶体辐照前后的输出幅度能够直接比较,特别需要控制重放晶体引起的误差.研究表明,重放误差主要来自晶体在光阴极上重放位置以及硅油耦合情况的变化.采用硅油耦合同时还影响到晶体光输出幅度的长期稳定性.为此,在光阴极上加设定位片以限定晶体每次重放的位置,同时将硅油耦合.改为空气耦合.测试表明,经过以上改进后,重放晶体引起的误差同LED及光电倍增管系统稳定性达到了同一水平,约为0.3%.

建立了两套分别由 GDB-44F 及 XP2020Q 光电倍增管组成的探测系统, 测量准确度各自达到 0.5% 及 1%; 其中 XP2020Q 光阴极由透紫外光的石英玻璃做成, 专门用于 BaF₂ 晶体测量.

辐照中采用了 4 块 BGO 晶体样品, 由上海硅酸盐研究所提供, 尺寸均为 10×10×15mm³, 两个端面(10×10)抛光, 四侧及一端面涂以白漆; 3 块 BaF₂ 晶体样品, 由北京玻璃研究所提供, 尺寸分别为 $\phi 20 \times 10\text{mm}^3$, $\phi 20 \times 15\text{mm}^3$, $\phi 20 \times 20\text{mm}^3$, 两端面及侧面均抛光, 除开一个端面外均包以白纸. 采用上述包装后的晶体样品较裸晶体可以提高脉冲输出幅度 20—60%.

为了将晶体样品送到适当的位置进行照射并及时地取出送回实验室测量, 而不影响对撞机的正常运行, 设计建立了简易的输运操纵装置, 并通过多次试验证明该装置工作可靠. 照射剂量可由样品所在位置吸收剂量率($\sim 0.02\text{Gy}/\text{天}$)及照射时间估计.

2. 测量结果

采用 BGO 晶体进行了两次短时间照射实验: 第一次照射时间为 30 小时, 经过三个平稳的 BES 数据采集周期; 第二次仅在正负电子注入期间进行照射. 两次照射剂量估计为 0.01—0.02Gy. 晶体样品用黑纸包装送去照射, 照射结束后 15 分钟内送回实验室测量, 操作在红灯下进行. 两次照射后, 对晶体连续跟踪测量表明: 在测量误差 $\pm 0.5\%$ 内未见辐照损伤.

还采用 BGO 和 BaF₂ 晶体样品各一块进行了长时间照射. 照射持续时间取为 BEPC 一次运行期, 约 4 个月, 在对撞机停止运行前取出晶体样品测量. 照射剂量比照同时放置于相应位置处 TLD 给出的剂量值, 估计为 1.2Gy. 在两套装置上同时对照射后的 BGO 和 BaF₂ 晶体样品进行跟踪测量, 在 78 小时内的测量结果表明: 在测量误差 $\pm 2\sigma$ 范围内, 未见小块 BGO 和 BaF₂ 晶体的辐照损伤.

作为测量自洽性的检验, 采用 BGO 和 BaF₂ 晶体样品在中国军事医学科学院放射医学研究所 $1.5 \times 10^5\text{Ci } ^{60}\text{Co}$ 放射源装置上进行了大剂量辐照实验(有关细节参阅工作[13]). 在 $5 \times 10^3\text{Gy}$ 吸收剂量下, BGO 晶体辐照损伤及其恢复情况与工作[13]一致. BaF₂ 晶体的两次辐照表明本工作所用晶体的抗辐照性能较工作[13]有了明显改进: 辐照后呈浅蓝色, 辐照损伤恢复时间约 1 天, 损伤恢复达 4%—6%, 但仍保留了 15%—20% 的损伤不能自然恢复; 辐照后晶体自身发出乳白色光, 并出现强噪声, 其衰减时间约为 1 天. 值得指出的是: 晶体在经天然光或日灯光再照射后, 强噪声重新出现, 而其辐照损伤并不因为光照而得到治疗. 这与工作[14]中报道的情况是不一致的. 关于噪声来源及其产生机制的问题看来需要作进一步的研究.

四、小 结

1. 在 BEPC 对撞区首次根据粒子物理实验的需要进行了辐射本底的系统研究.
2. 发展了动态研究对撞区本底辐射水平的有效方法: 区别于通常采用的 TLD 技术, 能够灵敏地反映出对撞机不同工作状态下的辐射本底及其分布情况, 并给出储存对撞状态下辐射本底随时间变化的规律. 基于这些规律, 发现了北京谱仪实验大厅内额外本底来

源.

3. 测量显示了对撞机辐射环境与运行水平的密切关系. 在较好的运行情况下, BEPC 日平均本底辐射剂量率达到 $0.01\text{Gy}/\text{天}$ 的水平, 与国外同类对撞机水平相当.

4. 测量表明: 对撞机本底辐射水平主要由束流注入及突然丢失(或打掉)造成, 在 γ 本底辐射剂量率的时间谱中表现为峰, 与储存对撞状态下的逐渐衰减过程比较, γ 剂量率要高出 1 个数量级以上.

5. 测量还表明: 对撞区本底辐射沿束流线方向的分布在靠近聚焦磁铁处趋于最大, 在垂直于束流线方向上的分布, 则随距离增加而递减.

6. 在 BEPC 辐射环境中首次测量了国产 BGO 及 BaF_2 晶体的辐照损伤性能: 经过 4 个月的长时间辐照, 在测量误差为 $\pm 2\sigma$ 范围内未发现损伤效应.

在工作过程中得到 BEPC 运行同志的配合和帮助, 承蒙于鸿璇和吴英志同志进行了有益的讨论, 上海硅酸盐研究所范世骥同志和北京玻璃研究所任绍霞同志提供了晶体样品, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- [1] I. Kirkbride, Crystal Ball Note No. 248, SLAC(Oct. 29, 1979).
- [2] M. A. Van Driel et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A215**(1983), 113.
- [3] SLAC-Report-229(June 1980), 176.
- [4] 顾以藩等, “锗酸铋晶体球实验方案建议”(修订稿), 高能物理研究所(1986).
- [5] J. Kirkby, Proceedings of the Tau-Charm Factory Workshop, SLAC-Report-343(June 1989)294.
- [6] GEM Collaboration, GEM Letter of Intent to the Superconducting Super Collider Laboratory(Nov. 30, 1991).
- [7] E. Blucher et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A249**(1986), 201.
- [8] 李建平等, 高能物理与核物理, **12**(1988), 12.
- [9] 李建平等, “北京谱仪大厅内的辐射水平测定”(内部报告), 高能物理研究所(1991).
- [10] CERN Accelerator School, CERN Report 8901, 2nd Advanced Accelerator Physics Course, edited by S. Turner(1989).
- [11] 于鸿璇, “BEPC 的运行和改进”, BEPC 国家实验室学术委员会第一次会议报告(1992).
- [12] I. H. O'neill, Crystal Ball Note No. 202, SLAC(Apr. 7, 1975).
- [13] 楚国柱, 中国科学院高能物理研究所硕士论文(1987); 朱国义等, 高能物理与核物理, **14**(1990), 8.
- [14] Ren Yuan Zhu, CALT-68-1767, DOE Research and Development Report(Jan. 18, 1992).

Study on Background Radiation at Beijing Electron Positron Collider and Radiation Damage of High-Z Scintillation Crystals

CHEN YU DAI CHANGJIANG GU YIFAN LEI ZHUANHENG
LI JIANPING LIU SHUDONG SHAO BEIBEI TANG YUELI
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039*)

ABSTRACT

A systematic study of radiation backgrounds in the interaction region at the Beijing e^+e^- Collider BEPC is carried out for the first time to the needs of particle physics experiment. An effective method to study dynamically the radiation environment of the collider is successfully developed which allows the measurement of the instantaneous radiation dose rate and its distribution for different beam conditions and as a function of time during a quiet luminosity run. The radiation sensitivity of domestic BGO and BaF₂ crystals in the BEPC environment is examined.