

探测器束流相关本底的实验研究*

金大鹏¹⁾ 杨胜东 赵棣新 过雅南 周能锋 王贻芳

刘振安 郁忠强 徐昊

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 介绍了在北京正负电子对撞机上进行的束流相关本底实验研究,并与计算结果进行了比较.通过实验获得了束流相关本底的特征;并用相应的软件(TURTLE和GEANT3)对束流-气体相互作用本底进行了细致的模拟.实验和模拟结果的比较表明,现有的软件工具模拟在4倍以内是可靠的,从而为正在设计建造的新一代北京正负电子对撞机和北京谱仪的本底模拟奠定了基础.

关键词 本底 束流-气体相互作用 丝击中率 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)和北京谱仪(BES III).研究 BEPC II 的束流本底及其对 BES III 探测器的影响,对 BES III 的安全与正常运行具有非常重要的意义.束流相关本底主要包括同步辐射光子和由于束流-气体相互作用和 Touschek 效应^[1]导致的丢失电子,其中,束流-气体作用又主要包括非弹性的韧致辐射(bremsstrahlung)和弹性的库仑散射(Coulomb scattering).这些粒子打到探测器上,会对探测器的安全与正常运行造成严重影响.

为了对束流本底特征有比较深入的了解,同时验证当前本底模拟工具的可靠性,对目前正在运行的北京正负电子对撞机(BEPC I)及北京谱仪(BES II)的本底情况进行了实验研究.我们系统研究了探测器束流相关本底的特征,并对束流-气体作用本底做了细致的蒙特卡罗模拟.本文给出了实验结果以及实验结果与模拟计算的比较.模拟工具为 Decay Turtle^[2]和基于 GEANT3^[3]的 SIMBES^[2]; Decay Turtle 用于模拟电子在储存环内的输运及电子与储

存环内残余气体分子的作用, SIMBES 用于模拟丢失电子与真空管道、磁铁及探测器物质的相互作用. BES III 束流相关本底的蒙特卡罗模拟研究的详细结果将另文发表.

2 BES II 本底实验

2002年5月,在 BES II^[4]上做了三天的本底实验.用随机取数的触发条件获取了一批本底数据,研究了探测器的本底特征.本节以顶点室^[5]第5层第10,20,30和40号丝单丝计数率随实验条件的变化为例研究本底特征.其中,第10号信号丝位于储存环上方,第20号丝位于储存环外侧,第30号丝位于储存环下方,第40号丝位于储存环内侧.实验中,除 Touschek 效应实验外,其他实验束流均为单束团.

BES II 本底实验主要包括以下内容:

2.1 探测器本底与流强的关系

图1为顶点室第五层第10,20,30和40号丝单丝计数率与流强的关系.实验束为负电子束.由图

2003-03-24 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: jindp@mail.ihep.ac.cn

2) BES II 模拟工具. SIMBES by the Monte Carlo Group, IHEP, China

中可见,相同条件下,环外侧丝(VC-L05-20)计数率明显高于其他丝;探测器本底与流强大致成二次关系. 后者是因为,对于束流-气体本底,储存环真空度值随流强增加线性增加,而本底与流强和真空度两者均成正比关系,所以束流-气体本底随流强二次幂变化;对于 Touschek^[1]本底,其作用截面与带电粒子密度平方成正比,即与流强平方成正比,所以, Touschek 本底也随流强二次幂变化.

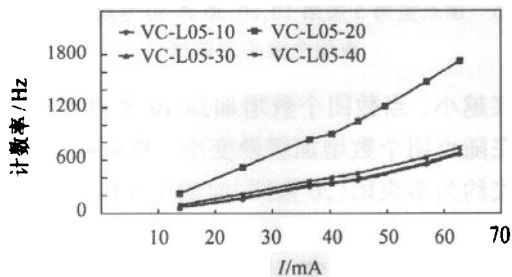


图 1 顶点室第 5 层第 10,20,30 和 40 号丝计数率随流强的变化

2.2 探测器本底与束流在对撞点处穿越角度的关系

为了达到最高亮度,正负电子束团在对撞点对撞时的角度经常不为零;同时,稳定运行时,束流在对撞点处的穿越角度也时常小幅偏离中心轨道(远小于 1.0mrad). 因此,研究束流在对撞点处的穿越角度对探测器本底的影响对于将来 BESⅢ的正常运行具有比较重要的参考意义. 实验中,我们保持束流在对撞点穿过,利用几组校正子磁铁调节束流在对撞点处的穿越角度,先由环外向环内调,待调至一定角度后,再回调. 图 2 为顶点室第五层第 10,20,30 和 40 号丝计数率与束流在对撞点处穿越角度的关系曲线. 实验束流为 40mA 正电子,横坐标为束流在对撞点处的穿越角度 θ (mrad),纵坐标为顶点室第五层第 10,20,30 和 40 号丝单丝计数率(Hz). 由图 2 可见,本底计数率随束流在对撞点处的穿越角度变化是可逆的,当束流在对撞点处的穿越角度恢复原值后,探测器本底计数率也恢复原值;探测器本底随束流在对撞点处穿越角度增大而增大,且角度越大,本底增大越快. 当束流在对撞点处的穿越角度由 0.0mrad 增大到 1.0mrad 时,顶点室单丝计数率增加约 4 倍. 实际运行中,这种情况出现的几率很小,但作为一个参考,在将来新一代北京正负电子对撞机(BEPCⅡ)和北京谱仪(BESⅢ)的运行过程中,应保证束流在对撞点处的穿越角度不要偏离中心轨

道太远.

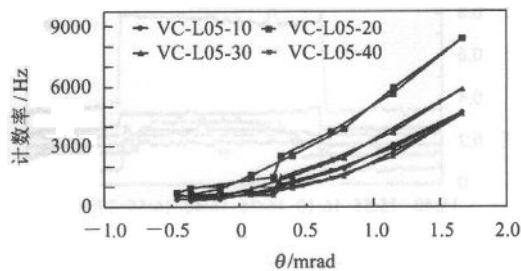


图 2 顶点室第 5 层第 10,20,30 和 40 号丝计数率随束流在对撞点处穿越角度的变化

2.3 探测器本底与储存环上不同区域真空度的关系

储存环上不同区域的真空度各不相同,且某一区域的真空度也随流强的变化而变化. 图 3 为储存环上的真空计分布图,正负电子运动方向如图中箭头所示,图中每一真空计旁边均标有实验时的真空度值(单位:Pa).

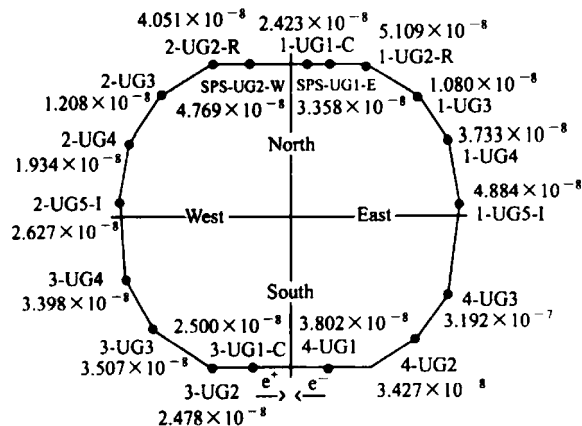


图 3 储存环上真空计分布及实验时的真空度

为了研究探测器本底对储存环上不同区域真空度的敏感程度,我们选择了 30mA 的负电子束流,并先后改变了对撞点上游不同区域的真空度. 实验结果表明,改变对撞点上游距对撞点 160m 到 140m 区域内的真空度,及 200m 到 160m 和 100m 到 40m 区域内的真空度时,探测器本底基本无变化,如图 4(a)和图 4(b)所示(以 200m 到 160m 和 100m 到 40m 区域为例). 而改变对撞点上游距对撞点 30m 到 13m 区域真空度时,探测器本底随真空度变差明显变大,如图 4(c)和图 4(d)所示,探测器单丝计数率基本与此区域内真空度同时变化,且变化比例大体相当. 所以,探测器本底主要来自于对撞点上游距对撞点 30m 以内真空管道内的残余气体.

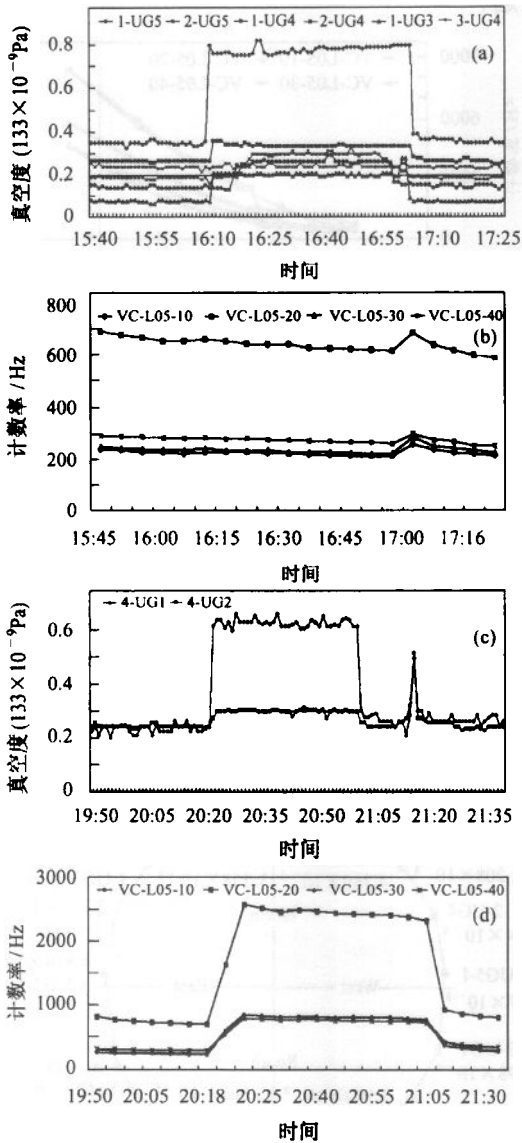


图 4 (a) 对撞点上游距对撞点 200m 到 160m 和 100m 到 40m 区域内真空度随时间变化曲线; (b) 顶点室第 5 层第 10, 20, 30 和 40 号丝计数率随时间变化曲线; (c) 对撞点上游距对撞点 30m 到 13m 区域真空度随时间变化曲线; (d) 顶点室第 5 层第 10, 20, 30 和 40 号丝计数率随时间变化曲线.

2.4 Touschek 效应

Touschek 效应是指同一束团内部带电粒子之间的库仑散射. 束团尺寸越小, Touschek 效应越强; 单束团流强越大, Touschek 效应越强. 实验束流为负电子. 实验时, 保持总流强(40mA)不变, 改变束团个数(分别为 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10 和 20 束团), 研究探测器本底的变化情况. 图 5 为顶点室第 5 层第 10, 20, 30 和 40 号丝计数率与束团个数的关系曲线.

由图中可见, 相同流强下, 束团个数越多, 探测

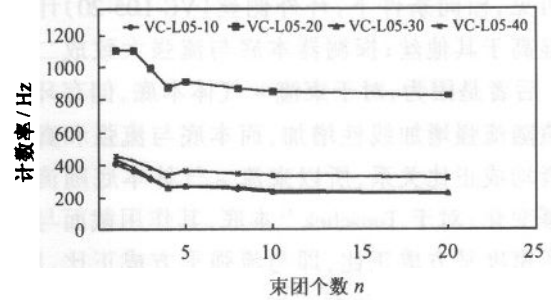


图 5 顶点室第 5 层第 10, 20, 30 和 40 号丝计数率与束团个数关系曲线

器本底越小. 当数团个数增加到 10 个以上时, 探测器本底随束团个数增加缓慢变小. 单束团时的探测器本底约为多束团(20 束团)时的 1.5 倍.

3 BES I 本底实验与模拟比较

为了验证现有模拟工具的可靠性, 以便为 BES III 的本底模拟做好准备. 我们对 BES II 本底实验和模拟进行了比较. 我们首先对本底实验与模拟的特征进行了比较, 然后比较了顶点室各层单丝平均计数率. 模拟和实验流强均为 40mA, 模拟时储存环上不同区域的真空度按实验时真空度刻度. 储存环上真空计分布和实验时真空度如图 3. 真空度单位为 Pa.

3.1 本底来源

模拟结果表明, 束流-气体本底中, 韧致辐射为主要本底来源(占整个束流-气体本底的 85% 左右). 韧致辐射本底主要来自于对撞点上游 40m 到对撞点区域, 这和 2.1 节实验结果一致. 图 6 为丢失在对撞区的韧致辐射电子来源图. 图中所有粒子

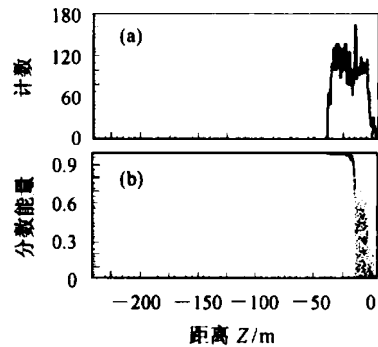


图 6 (a) 对撞点上游不同区域丢失到对撞区的韧致辐射电子相对个数示意图; (b) 对撞点上游不同区域丢失到对撞区的韧致辐射电子分数能量.

几乎都丢失在对撞区(对撞点上游 8.70m,对撞点下游 6.05m). 横坐标表示丢失粒子与残余气体分子发生作用的位置到对撞点的距离(单位 m),负号表示对撞点上游.(a)图纵坐标为计数;(b)图纵坐标为丢失电子相对于母粒子(TURTLE 模拟的原始束流粒子)的分数能量¹⁾.

3.2 顶点室丝击中率

图 7(a)为实验时顶点室 5—8 层丝的击中率分布,图 7(b)为模拟顶点室 5—8 层丝的击中率分布,其中包括韧致辐射和库仑散射. 顶点室 5—8 层各有 40 根信号丝,横坐标依次为顶点室 5—8 层的信号丝;其中,第 20,60,100 和 140 号丝位于环外侧,第 1,40,80,120 和 160 号丝位于环内侧.

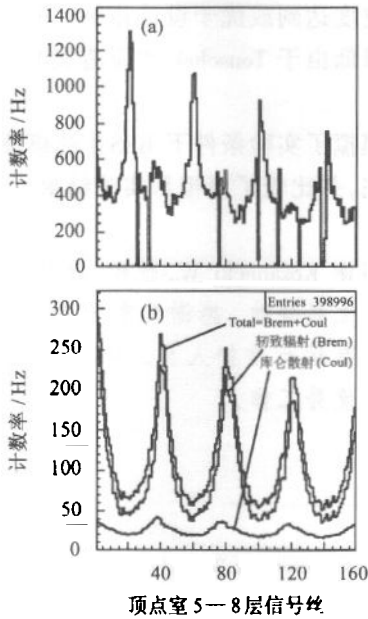


图 7 (a) 实验时顶点室 5—8 层丝击中率分布;(b) 模拟顶点室 5—8 层丝击中率分布.

图 7(a)和图 7(b)的主要差别在于,实验时,顶点室环外侧明显的有一个峰,而模拟没有(模拟中只考虑束流-气体作用,没有考虑同步辐射). 二者在环内侧均有一个峰. 根据同步辐射模拟结果,顶点室前 3 层环外侧有明显的同步辐射击中峰,但峰高随层号增加迅速下降(如图 8(a)),到第 5 层,同步辐射击中率已经比较小了. 由于同步辐射模拟采用理想情况,没有考虑束流振荡,所以,图 7(a)中顶点室 5—8 层环外侧峰是不是同步辐射本底,有待进一步

的研究. 图 8(b)为实验时顶点室 1—4 层丝击中率分布.

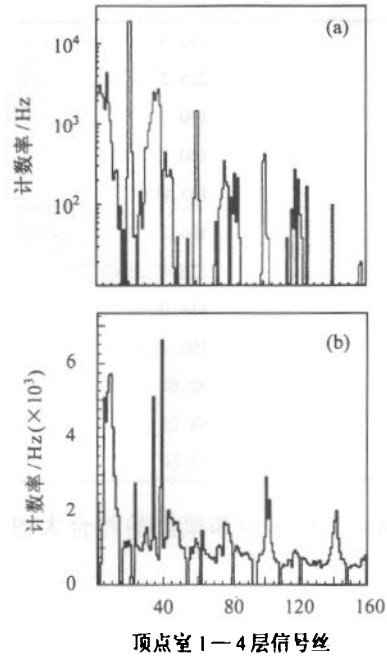


图 8 (a) 模拟顶点室 1—4 层同步辐射丝击中率分布;(b) 实验顶点室 1—4 层丝击中率分布.

3.3 实验和模拟顶点室各层平均单丝计数率比较

我们按实验真空度和流强模拟束流-气体作用,并考虑 Touschek 效应的 1.5 倍修正(如图 5,单束团时顶点室单丝计数率约为多束团时的 1.5 倍),对实验和模拟顶点室各层平均单丝计数率进行了比较. 表 1 为顶点室各层单丝平均计数率实验与模拟的比较,包括不去掉环外侧峰情况和去掉环外侧峰情况.

实验上,顶点室 1—4 层靠近束流管,容易受同步辐射(图 8(a))高次模效应影响,其丝的击中率不是很正常(图 8(b)). 所以,我们认为从第五层开始比较更为合理. 由表 1 中可见,实验和模拟顶点室各层单丝平均计数率的比值随层号增加(到束流管距离变大)而减小,原因之一可能是越靠近束流管的顶点室信号层越容易受到同步辐射的影响(图 8(a)). 不去掉环外侧峰时,实验和模拟按层单丝平均计数率的比值不超过 3.73;去掉环外侧峰时,实验和模拟按层单丝平均计数率的比值在 3 倍以内. 可见当前的模拟工具在 4 倍以内是可靠的. 目前国

1) 分数能量是指丢失粒子与初始模拟粒子(稳定运行束流粒子)能量的比值.

表 1 顶点室各层单丝平均计数率实验与模拟比较

层	模拟/Hz	实验不去掉环外侧峰		实验去掉环外侧峰	
		实验/Hz	实验/模拟	实验/Hz	实验/模拟
01	255.3	2102	8.23	—	—
02	225.5	1146	5.08	979.8	4.35
03	190.7	925.0	4.85	645.1	3.38
04	160.2	688.8	4.30	494.3	3.09
05	147.0	547.6	3.73	426.5	2.90
06	136.2	498.4	3.66	378.5	2.78
07	126.1	405.5	3.22	308.0	2.44
08	114.0	341.4	2.99	253.5	2.22
09	102.1	297.9	2.94	198.9	1.95
10	92.62	262.5	2.84	179.8	1.94
11	88.21	237.9	2.70	165.2	1.87
12	81.68	201.0	2.46	135.5	1.66

实际上两个 B-工厂实验和模拟的符合大约在 2 倍以内¹⁾

4 总结

我们通过实验研究了 BES II 探测器本底的特征。束流在对撞点处的穿越角度,单束团电子密度和储存环上对撞点上游 30m 到对撞点之间区域的真空度对 BES II 本底影响很大。在将来的 BEPC II - BES III 运行中,应保证束流在对撞点处的穿越角度不要偏离设计值太远,同时应保证对撞点上游几十

米内的真空度达到或优于设计指标。采用多束团技术可有效降低由于 Touschek 效应造成的丢失电子本底。

我们模拟了实验条件下 BES II 的束流-气体丢失电子本底,并比较了模拟和实验结果。

作者感谢 Kozanecki W. 教授,秦庆、陈江川、徐刚等老师的无私帮助。感谢北京正负电子对撞机和北京谱仪所有运行维护人员。同时,感谢张德红博士以前做的优秀工作。

参考文献 (References)

- 1 Le Duff J. Single and Multiple Touschek Effects. In: CERN 95-06, 1995, 573-586
- 2 Carey D C., Brown K I., Iselin F C. Decay TURTLE (Trace Unlimited Rays Through Lumped Elements). SLAC-246, 1980. A modified version taking into account the beam-gas bremsstrahlung and Coulomb scattering was provided by Kozanecki W
- 3 GEANT Detector Description Tool, Version 3.21, CERN Program Library. W5103, CERN (1994)
- 4 BAI Jing-Zhi et al. Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res., 1994, A344: 319
- 5 ZHENG Jian-Ping et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, 25(5):423-428 (in Chinese)
(郑建平等. 高能物理与核物理, 2001, 25(5):423-428)

1) Kozanecki W. and Yamamoto H., private communication. 结果显示,当前的模拟工具在 4 倍以内是可靠的。通过模拟,得出了 BES II 本底的基本情况,同时可以估计 BES III 工作状态下的本底。

Study of BES II Backgrounds

JIN Da-Peng¹⁾ YANG Sheng-Dong ZHAO Di-Xin GUO Ya-Nan ZHOU Neng-Feng

WANG Yi-Fang LIU Zhen-An YU Zhong-Qiang XU Hao

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

Abstract The BES II backgrounds experiment and simulation are described. In the experiment, we have studied the characteristics of the beam-related backgrounds. In the simulation, we simulate carefully the beam-gas backgrounds with the mature tools-TURTLE and Geant3. Finally, we compare the results of the experiment and those of the simulation, they agree with each other within a factor of 4, which is acceptable in background simulation. This comparison proves the simulation tools are reliable, which makes it possible for us to simulate the beam-related backgrounds of the future BES-III.

Key words backgrounds, beam-gas interactions, single wire rate, Monte Carlo simulation

Received 24 March 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: jindp@mail.ihep.ac.cn