

# 大角度巴巴散射和双 $\mu$ 产生的 研究与亮度测量\*

BES 合作组

白景芝	陈光培	陈宏芳 <sup>1</sup>	陈少敏	陈雅清	陈宇	陈元柏
程宝森	崔象宗	丁慧良	杜志珍	范晓舫	方建	高翠山
高美丽	高树琦	顾建辉	顾树棣	顾维新	顾以藩	过雅南
韩世温	韩纓	何炬	何瑁 <sup>2</sup>	胡贵云	胡涛	胡晓庆
黄德强	黄因智	姜春华	金山	金艳	康书辉	柯尊建
赖元芬	兰慧彬	郎鹏飞	李芳	李金	李佩琴	李群
李如柏	李蔚	李卫东	李卫国	李新华	李小南	林树子
刘怀民	刘靖	刘经华	刘琦	刘荣光	刘延	刘晔
刘振安	吕军光	鲁建业	罗栓群	罗勇	马爱民	马恩成
马基茂	毛慧顺	毛泽普	孟祥承	倪蕙苓	聂晶	漆纳丁
阙友昆	荣刚	邵毓莺	沈本蔚	沈定力	沈红	沈肖雁
盛华义	史焕章	宋晓非	孙舫	孙汉生	孙式军	谈益平
唐素秋	童国梁	王锋	王临洲	王灵淑	王曼	王佩良
王平	王少敏	王泰杰	王运永	魏诚林	席德明	夏小米
谢佩佩	熊伟军	徐德之	许榕生	徐芷菁	薛生田	谢昱
颜洁	严武光	杨长友	杨春敏	杨杰	杨蔚	叶铭汉
叶诗章	叶树伟 <sup>1</sup>	于传松	喻纯旭	郁忠强	苑长征	张炳云
张长春	张达华	张会领	张建	张家文	张霖	张良生

\* 国家自然科学基金资助(项目号 19290400); 中国科学院重大基础科研项目(KJ85)。

张少强 张羽 张月元 赵棣新 赵海文 赵京伟 赵萌  
 赵平德 赵维仁 郑建平 郑林生 郑志鹏 周光谱 周化十  
 周莉 周小帆 周月华 朱启明 祝玉灿 朱永生 庄保安

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1 (中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

2 (山东大学物理系 济南 250100)

1996-03-13 收稿

## 摘 要

利用北京谱仪 (BES) 在  $\sqrt{S} = 4.03 \text{ GeV}$  下正负电子对撞数据, 研究了巴巴和双  $\mu$  事例的 QED 过程. 结果表明, 实验数据在误差范围内同 QED 预言较好地一致, 且从  $e^+e^-$  和  $\mu^+\mu^-$  末态测出的两个亮度值在 4% 范围内相互一致. 计算给出: BES 在该能区获取数据的总积分亮度为  $23.1 \text{ pb}^{-1}$ .

**关键词.** 巴巴散射, 双  $\mu$  产生, 亮度.

## 1 引 言

辐射巴巴过程  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$  和双  $\mu$  辐射产生过程  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$  可以用 QED 理论很好地描述<sup>[1]</sup>. 七十年代以来, 随着加速器能量的提高, 许多实验在各种对撞能量和不同出射角范围, 对这两种 QED 过程进行了测量, 结果表明实验与理论令人满意地一致<sup>[2]</sup>. 北京谱仪小角度亮度监测器具有计数率高和统计误差小的特点<sup>[3]</sup>. 大角度巴巴散射和双  $\mu$  产生事例, 已被直接用于探测器的刻度和性能研究. 由于这两类事例和其他物理末态事例取数条件相同, 避免了数据获取死时间的校正, 而且事例特征突出, 剔除背景容易, 因此, 大角度巴巴散射和双  $\mu$  事例, 在正负电子对撞亮度的测量中也得到广泛应用.

北京谱仪实验在  $4.03 \text{ GeV}$  正负电子对撞能量下获取了大量数据. 准确地测定亮度, 不仅是实验可靠性和探测性能的重要测试, QED 物理过程和蒙特卡罗模拟的有意义的检验, 而且在分支比的测定中起着重要作用.

## 2 探 测 器

北京谱仪及其性能指标已有专门的文章作了描述<sup>[4]</sup>. 正负电子对撞产生的次级带电粒子在  $z$  向均匀磁场中偏转, 穿过主漂移室和飞行时间计数器, 电子在簇射计数器中形成电子光子簇射而被吸收,  $\mu$  子穿透簇射计数器和轭铁, 进入最外边的  $\mu$  子计数器. 带电粒子的动量由主漂移室径迹的曲率测定, 粒子飞行速度由它的飞行时间与距离算出.

粒子在簇射计数器和  $\mu$  子计数器中的行为将直接用于电子和  $\mu$  子的识别.

### 3 事例选择

辐射巴巴和双  $\mu$  产生事例的共同特征是两根带有相反电荷的径迹. 为了排除宇宙线背景, 正反粒子的飞行时间之差必须小于 4 ns (见图 1), 事例产生顶点必须落入正负电子对撞区域. 对于巴巴事例, 每根径迹距原点的最近距离满足  $R_{\min} < 0.6$  cm 和  $|z_{\min}| < 18$  cm; 而在双  $\mu$  事例分析中, 从每根径迹的  $R_{\min}$  和  $z_{\min}$  值计算了作用顶点的位置, 因而要求顶点位置  $R_{xy} < 1$  cm 和  $|z_v| < 20$  cm. 在桶部簇射计数器的  $z=0, \pm 95.5$  cm 处有三个宽 2.8 cm 的加强筋层, 形成探测死区. 粒子出射方向落入  $|\cos\theta| < 0.05$  区域的事例, 将不用于亮度的计算, 而  $z = \pm 95.5$  cm 区加强筋的影响将在蒙特卡罗模拟中加以估计.

巴巴事例和强子末态事例在桶部簇射计数器中的能量沉积存在很大差别. 巴巴事例满足以下条件:

$$\begin{aligned} E_{e^+} &> 0.2 E_{\text{CM}}, \\ 0.6 E_{\text{CM}} &< E_{e^+} + E_{e^-}. \end{aligned}$$

此外, 电子动量  $E_{\text{CM}}/4 < P_{e^+} < 2.5$  GeV/c 以及正负电子非共线角截断条件  $\cos\eta > 0.90$  进一步减少强子背景事例.

由于  $\mu$  子计数器几何的限制, 选择出射角落入区间  $|\cos\theta_\mu| < 0.6$  的  $\mu$  子.  $\mu$  子在桶部簇射计数器中能量沉积满足  $0 < E_\mu < 0.7$  GeV. 至少有一根径迹在主漂移室、桶部簇射计数器和  $\mu$  子计数器中找到相互匹配的径迹, 因而被识别为  $\mu$  子. 为了剔除强子末态和双光子过程的  $\mu$  子背景, 每个  $\mu$  子的动量需落入区间

$$0.7 \leq p_{\mu^+} / E_{\text{beam}} \leq 1.2.$$

### 4 分析与讨论

巴巴事例的背景主要来自  $e^+e^- \rightarrow h$  和  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$  过程, 而宇宙线  $\mu$  子是双  $\mu$  事例的可能背景源. 图 2 给出电子在桶部簇射计数器中的能量沉积分布. 研究表明, 强子的能量沉积和  $\mu$  子相近, 而比大动量电子的能量沉积小得多. 因此, 强子事例在巴巴样本中的混入是可以忽略的. 在  $E_{\text{CM}} = 4.03$  GeV 下, 双光子过程产生截面小, 背景贡献小于 0.1%. 实验观察到的  $\mu$  子出射角  $\varphi$  方向的均匀分布清楚表明, 上述选择条件十分有效地排除了宇宙线  $\mu$  子事例.

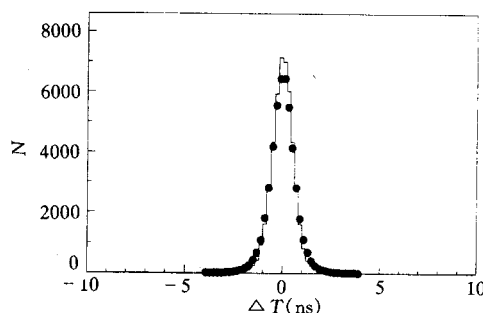


图 1 正负电子飞行时间之差的分布

· 实验数据; — 蒙特卡罗模拟.

描述辐射巴巴和双 $\mu$ 辐射产生过程 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ 和 $\mu^+\mu^-\gamma$ 的蒙特卡罗程序是由 Berends 等人完成的<sup>[1]</sup>. 他们在计算中考虑了 $\alpha^2$ 和 $\alpha^3$ 级 Feynman 图的贡献. 这里,  $\alpha$ 是精细结构常数.

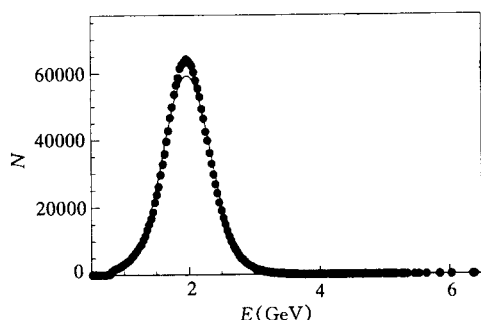


图2 出射电子在桶部簇射计数器中的能量沉积  
· 实验数据; — Gauss 分布拟合曲线.

出射电子和 $\mu$ 子的 $\cos\theta$ 分布是辐射巴巴和双 $\mu$ 产生过程的特征性分布. 图3(a)给出了巴巴事例实验和 QED 理论预期的 $\cos\theta$ 分布. 图3(b)是双 $\mu$ 事例的实验分布, 图中实线为 $1 + A\cos^2\theta_\mu$ 的拟合结果, 其中 $A=1.02$ . 为了避免加强筋的影响, 这里要求 $|\cos\theta_\mu| < 0.5$ .

由于事例数据量大, 事例数观察值的统计误差非常之小. 系统误差主要来自以下几个方面:

个方面:

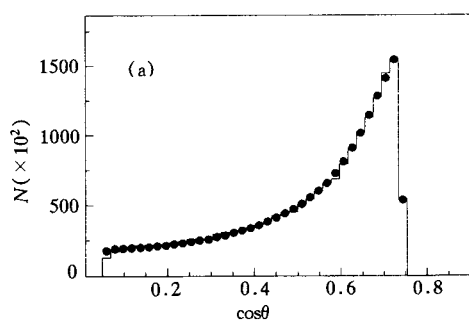


图3(a) 出射电子的 $\cos\theta$ 分布  
· 实验数据; — 蒙特卡罗模拟.

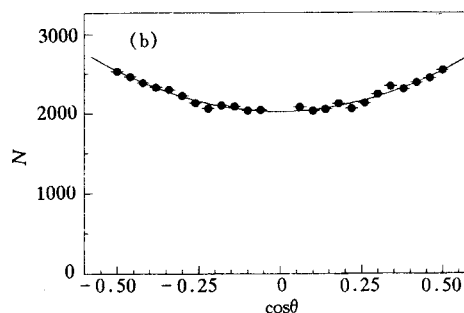


图3(b) 出射 $\mu$ 子的 $\cos\theta$ 分布  
· 实验数据; —  $1 + A\cos^2\theta$ 的拟合曲线.

(1) QED 理论截面的计算. Berends 蒙特卡罗计算给出 $\alpha^3$ 项贡献占截面值的 1.2% (巴巴) 和 5.4% ( $|\cos\theta_\mu| < 0.6$  的双 $\mu$ 产生). 这里, 这两个值被用作 $\alpha^4$ 及更高阶项贡献之和的近似估计.

(2)  $\phi$  方向死道影响 (包括主漂移室、飞行时间计数器和桶部簇射计数器). 从明显偏离均匀分布的区域找出校正因子分别为 1.1% (巴巴) 和 1.8% (双 $\mu$ ). 未校正部分带来的系统误差可以用这两个值做近似估计.

(3) 对于 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ 过程, 桶部簇射计数器加强筋效应已在蒙特卡罗计算中加以模拟, 而在双 $\mu$ 计算中剔除了 $|\cos\theta_\mu| \approx 0.6$ 附近加强筋区域的事例. 落入垂直方向加强筋区域的事例 (包括巴巴和双 $\mu$ ) 均已被剔除. 因此, 加强筋效应造成的系统误差可忽略.

(4) 蒙特卡罗事例的统计误差为 0.3% (巴巴) 和 0.3% (双 $\mu$ ).

(5) 触发效率和软件重建效率的系统误差估计为 0.5% (巴巴) 和 2% (双 $\mu$ ).

上述各项贡献的系统误差之和为 1.7% (巴巴) 和 6.0% (双 $\mu$ )。

## 5 亮 度

利用观察到的巴巴或双 $\mu$ 事例数  $N_{\text{obs}}$ , 可以直接计算正负电子对撞积分亮度如下:

$$L_{\text{int}} = \frac{N_{\text{obs}}}{\sigma \cdot \varepsilon},$$

这里,  $\sigma$  是蒙特卡罗事例的产生截面, 在  $|\cos\theta_e| < 0.9$  条件下, 巴巴事例产生截面  $\sigma(e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma) = 247.2 \text{ nb}$ , 而双 $\mu$ 事例产生截面  $\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma) = 4.285 \text{ nb}$ ;  $\varepsilon$  是北京谱仪探测器对于给定末态的接受度, 主要由几何因子决定. 对于上述两种 QED 过程, 利用 Bevends 等人的蒙特卡罗计算给出:

$$\begin{aligned}\varepsilon(ee\gamma) &= 0.1125; \\ \varepsilon(\mu\mu\gamma) &= 0.6039,\end{aligned}$$

这里, 要求电子和 $\mu$ 子都落入  $|\cos\theta| < 0.6$  区间. 而对于  $|\cos\theta_\mu| < 0.5$  的 $\mu$ 对事例,  $\varepsilon = 0.4807$ . 触发效率的研究表明, 巴巴和双 $\mu$ 事例的效率接近于 1<sup>[6]</sup>.

利用上述两个过程, 分析了 1992 年至 1994 年所获取的全部  $D_s$  物理数据 ( $\sqrt{S} = 4.03 \text{ GeV}$ ), 所测得的亮度数据已被用于  $D_s$  物理研究之中<sup>[7] 1)</sup>. 从辐射巴巴测知的亮度值为  $23.1 \text{ pb}^{-1}$ , 从双 $\mu$ 过程测出的亮度比这个值低 3.5%, 两者在误差范围内一致.

## 参 考 文 献

- [1] S. D. Drell, *Ann. Phys.*, **4**(1958) 75; T. D. Lee, G. C. Wick, *Phys. Rev.*, **D2**(1970) 1033; S. J. Brodsky, S. D. Drell, *Annu. Rev. Nucl. Sci.*, **20**(1970) 147.
- [2] L. H. O'neill *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976) 395; H. Newnan *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **32**(1974) 483; D. P. Barber *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **42**(1979) 1110.
- [3] 朱启明等, 高能物理与核物理, **17**(1993) 1057; 朱永生等, 高能物理与核物理, **18**(1994) 503;
- [4] 丁慧良等, 高能物理与核物理, **16**(1992) 769.
- [5] F. A. Berends, R. Kleiss, *Nucl. Phys.*, **B228**(1983) 537; F. A. Berends *et al.*, *Acta Physica Polonia*, **B14**(1983) 413; F. A. Berends *et al.*, *Phys. Lett.*, **63B**(1987) 432.
- [6] 郁忠强等, 高能物理与核物理, **19**(1995) 1062.
- [7] J. Z. Bai *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995) 4599; J. Z. Bai *et al.*, *Phys. Rev. D.*, **52**(1995) 3781.

1) 已发表的文章中引用的积分亮度为  $22.3 \text{ pb}^{-1}$ , 扣去了物理事例样本中短缺的少量数据. 本文采用更准确的蒙特卡罗计算, 给出这个亮度为  $23.0 \text{ pb}^{-1}$ .

## A Study of the Processes of $e^+e^- \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$ at Large Angle and Measured Luminosities

BES Collaboration

Bai Jinzhi Chen Guangpei Chen Hongfang<sup>1</sup> Chen Shaoming Chen Yaqing  
 Chen Yu Chen Yuanbai Cheng Baosen Cui Xiangzong Ding Huiliang  
 Du Zhizhen Fan Xiaoling Fang Jian Gao Cuishan Gao Meili Gao  
 Shuqi Gu Jianhui Gu Shudi Gu Weixing Gu Yifan Guo Yanan Han  
 Shiweng Han Ying He Ju He Mao<sup>2</sup> Hu Guiyun Hu Tao Hu Xiaoqing  
 Huang Deqiang Huang Yinzhi Jiang Chunhua Jin Shan Jin Yan Kang  
 Shuhui Ke Zunjian Lai Yuanfen Lan Huibin Lang Pengfei Li Fang Li  
 Jin Li Peiqin Li Qun Li Rubai Li Wei Li Weidong Li Weiguo Li  
 Xinhua Li Xiaonan Lin Shuzi Liu Huaimin Liu Jing Liu Jinghua Liu  
 Qi Liu Rongguang Liu Yan Liu Ye Liu Zhenan Lü Junguang Lu Jianye  
 Luo Shuanqun Luo Yong Ma Aimin Ma Encheng Ma Jimao Mao  
 Huishun Mao Zepu Meng Xiangcheng Ni Huiling Nie Jing Qi Nading  
 Que Youkun Rong Gang Shao Yuying Shen Benwei Shen Dingli Shen  
 Hong Shen Xiaoyan Sheng Huayi Shi Huanzhang Song Xiaofei Sun  
 Fang Sun Hansheng Sun Shijun Tan Yiping Tang Suqou Tong Guoliang  
 Wang Feng Wang Linzhou Wang Lingshu Wang Man Wang Peiliang  
 Wang Ping Wang Shaomin Wang Taijie Wang Yunyong Wei Chenglin  
 Xi Deming Xia Xiaomi Xie Peipei Xiong Weijun Xu Dezhi  
 Xu Rongsheng Xu Zhijing Xue Shengtian Xie Yu Yan Jie Yan Wuguang  
 Yang Changyou Yang Chunmin Yang Jie Yang Wei Ye Minghan Ye  
 Shizhang Ye Shuwei<sup>1</sup> Yu Chuansong Yu Chunxu Yu Zhongqiang Yuan  
 Changzheng Zhang Bingyun Zhang Changchun Zhang Dahua Zhang  
 Huiling Zhang Jian Zhang Jiawen Zhang Lin Zhang Liangsheng Zhang  
 Shaoqiang Zhang Yu Zhang Yueyuan Zhao Dixin Zhao Haiwen Zhao  
 Jingwei Zhao Meng Zhao Pingde Zhao Weiren Zheng Jianping Zheng  
 Linsheng Zheng Zhipeng Zhou Guangpu Zhou Huashi Zhou Li Zhou  
 Xiaofan Zhou Yuehua Zhu Qiming Zhu Yucan Zhu Yongsheng Zhuang  
 Baoan

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

<sup>1</sup>*(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)*

<sup>2</sup>*(Department of Physics, Shandong University, Jinan 250100)*

Received 13 March 1996

### Abstract

Using the BES data collected at  $\sqrt{S} = 4.03$  GeV, the QED processes of  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$  have been studied. Our measurements agree with the QED prediction, and luminosities obtained from these two final states are compatible at a level of 4%. The total integrated luminosity of  $23.1 \text{ pb}^{-1}$  was given for all data collected at this energy region from the calculation.

**Key words** Bhabha scattering, di-muon production, luminosity.