

北京谱仪积分亮度测量的新方法*

黄光顺¹⁾ 程宝森 苑长征 李新华 祁向荣 刘靖 陈光培
陈江川 胡海明 胡涛 巨新 李金 毛泽普
薛生田 张良生 郑志鹏 周莉 赵政国

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 介绍了利用 e^+e^- 对撞中双 μ 产生和双 γ 产生两种 QED 过程来测量积分亮度的新思路. 前者的特色在于用单根径迹选择双 μ 事例, 后者则是首次利用双 γ 事例测定亮度. 两种方法分别用于 1998 年春季北京谱仪(BES)R 值扫描 6 个能量点的积分亮度测量, 所得结果的误差分别小于 8.0% 和 7.5%, 在误差范围内与大角度巴巴事例积分亮度值一致.

关键词 积分亮度 双 μ 产生事例 双 γ 产生事例

1 引言

亮度是对撞机的一个重要指标, 直接反映对撞束流的性质. 在高能物理实验数据分析中, 积分亮度是一个基本参数, 尤其在绝对测量中是各种实验数据归一的基础. 原则上说, 在 e^+e^- 对撞实验中任何一种 QED 过程, 只要理论上能精确计算, 且其反应截面足够大, 都能用于亮度测量. 北京谱仪^[1,2] 主要依据(辐射)巴巴过程 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$ 来确定亮度, 因为它是作用截面最大的一种 QED 过程. 小角度亮度监测器具有计数率高和统计误差小的特点, 可以给出统计精度很高的结果; 在小角度附近, 巴巴散射截面与角度的四次方成反比, 因而对亮度监测器的定位精度要求极高, 但这是难以保证的. 物理分析中用到的积分亮度, 也常来自于大角度巴巴事例^[3], 这是由于它与其他物理末态事例取数条件相同, 无须死时间校正. (辐射)双 μ 产生过程 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$ 也常用于确定亮度^[3], 但该过程截面较小, 统计误差较大, 给出的亮度值一般作为参考. 双 γ 产生过程 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ 是另外一种可能用于亮度计算的过程, 其截面比巴巴过程小, 比双 μ 过程大.

北京谱仪在 1998 年春季第一轮 R 值扫描测量实验中, 在 2—5GeV 能区 6 个能量点获取了数据. 上述 3 种过程分别用于亮度测量, 得到的结果在误差范围内是一致的. 由于

1999-05-12 收稿

* 国家自然科学基金(19991480), 中国科学院重大及特别支持项目(KJ95T-03)和国家杰出青年基金(19825116)资助

1) E-mail: huanggs@pony1.ihep.ac.cn

3种事例的选择依赖于不同的子探测器信息,因而3种方法具有相对独立性,这不仅保证了亮度测量的可靠性,而且说明各子探测器的工作状态是正常的.从统计精度考虑, R 值测量中采用巴巴过程给出的亮度值,其误差在3%以内;本文描述用后两种过程确定亮度的方法,这种相互校验也是很有意义的.

2 双 μ 产生事例的选择

双 μ 产生事例的突出特征是有两根背对背飞行的、带相反电荷的径迹,且其飞行时间大体相当,在簇射计数器中沉积能量较小,在 μ 计数器中有击中.通常选择双 μ 事例依据的就是上述特征,但是在 R 值取数期间,由于主漂移室的噪声比较严重,造成径迹重建质量较差,事例选择不应过分依赖径迹重建信息.为此,本文采用了单根径迹选择的方法,基本思路是:只要在一个事例中找到一根可能的 μ 径迹,就认为该事例是候选双 μ 事例;这样选出的事例中必然包含宇宙线和强子本底,由于宇宙线径迹的顶点 z 坐标是一个均匀分布,故可以通过拟合的办法加以扣除,而强子本底则可以依据强子本来扣除.

单根 μ 径迹选择条件具体是:径迹在三层 μ 计数器的击中数之和大于或等于3(当径迹由主漂移室外推至 μ 计数器某层的位置与实际击中位置的距离在限定值之内,则认为径迹在 μ 计数器有击中;若为单管击中,则在该层的击中数被认为是1,若为双管击中,则击中数是2);径迹出射极角范围 $|\cos\theta| < 0.67$;飞行时间要求 $3 < \text{TOF} < 6\text{ns}$,飞行时间测量值与预期值的差别在1ns之内;径迹的动量小于束流动量的1.4倍;径迹顶点在 $r-\phi$ 平面与对撞点的距离在1.5cm之内.

单径迹选择方法不仅减弱了事例挑选对数据质量的强烈依赖,同时也提高了事例选择效率,使得真实数据与蒙特卡罗模拟中丝效率的差别所造成的影响可以忽略不计.

对双 μ 事例而言,最容易混入的本底是宇宙线事例,从单径迹选择得到的候选双 μ 事例的 ϕ 方向分布可以很明显地看到(图1),宇宙线集中于垂直方向.不过,对撞事例的顶点分布集中于对撞区域,而宇宙线事例的顶点则基本上是均匀分布,据此可以对顶点的 z 坐标分布做高斯加多项式拟合,高斯峰面积可看作对撞事例数,而多项式部分则可看作本底,如图2所示.

对于强子本底,由于它也是对撞产生的事例,其顶点坐标分布与双 μ 事例没有什么区别,故要采取直接扣除的办法.利用 R 值数据分析工作中已有的强子样本(二叉以上事例),通过单根 μ 径迹判选条件,得到的事例数再除以强子选择效率(补偿二叉事例的贡献),即为候选双 μ 事例中可能误判的强子数.

根据单根 μ 径迹选择方法得到的事例样本中,宇宙线本底的成分大约为30%,强子本底的成分大约为3%.所用强子样本的纯度在90%以上,强子选择效率是用LUND模型JETSET74产生器通过蒙特卡罗模拟得到的.LUND模型经过参数调整,能够较好地反映BEPC能区强子产生性质^[4].

当质心系能量 E_{cm} 在 τ 轻子对产生阈值(3.5554GeV)以上时,还需要考虑来自于 τ 轻子衰变的本底. τ 有大约17%的几率衰变到 μ ,这将是较大的本底贡献,此外 τ 通过强子道衰变模式产生的强子,也可能被误判为 μ .单径迹选择方法不能排除 τ 对的影响,只能

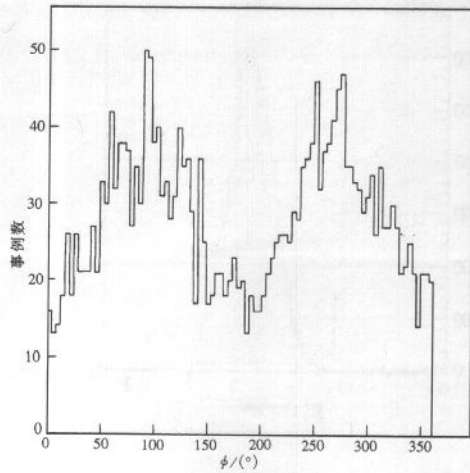


图 1 候选双 μ 事例中包含宇宙线本底

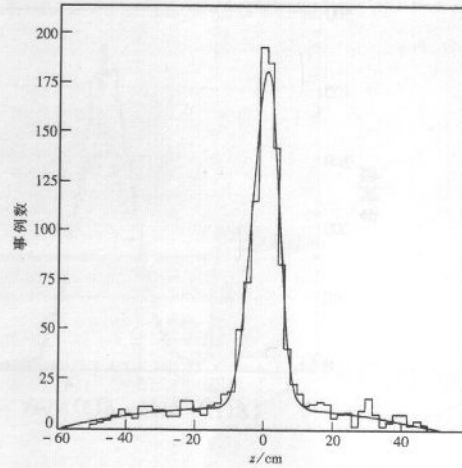


图 2 用顶点 z 坐标拟合方法扣除宇宙线本底

通过蒙特卡罗模拟来扣除. 在 4.6 和 5.0 GeV 能量点, 双 τ 产生截面与双 μ 产生截面相当, 考虑到分支比和探测效率, τ 本底所占的比例为 12%—15%.

3 双 γ 产生事例的选择

1998 年春季第一轮 R 值扫描测量实验期间, 桶部开放了 3 个触发道, 其中包括 1 个中性道, 触发条件的设置保证了纯中性事例的正常获取, 客观上为用双 γ 事例确定亮度提供了可能. 在桶部簇射计数器覆盖范围内, 双 γ 产生截面是双 μ 产生截面的大约 5 倍, 而且桶部簇射计数器的立体角覆盖比 μ 计数器宽, 因此挑选双 γ 事例计算亮度可望得到较高的统计精度. 另外一个好处是, 它几乎没有本底过程, 信号十分干净. 用双 γ 产生过程确定亮度, 在 BES 数据分析中是第一次. 双 γ 事例也具有比较鲜明的特征, 即两条背对背的中性径迹, 在簇射计数器中沉积能量较大. 双 γ 事例的选择仅仅依赖于簇射计数器的信息. 选择方法是: 首先找出 3 条能量最大的径迹, 其能量分别为 $E_{\max 1}, E_{\max 2}, E_{\max 3}$, 束流能量为 E_{beam} , 要求径迹能量满足(如图 3 所示, 以 $E_{\text{cm}} = 3.55 \text{ GeV}$ 能量点的数据为例)

$$\bullet E_{\max 1} > 0.6 E_{\text{beam}}$$

$$\bullet E_{\max 2} (+ E_{\max 3}) > 0.45 E_{\text{beam}}$$

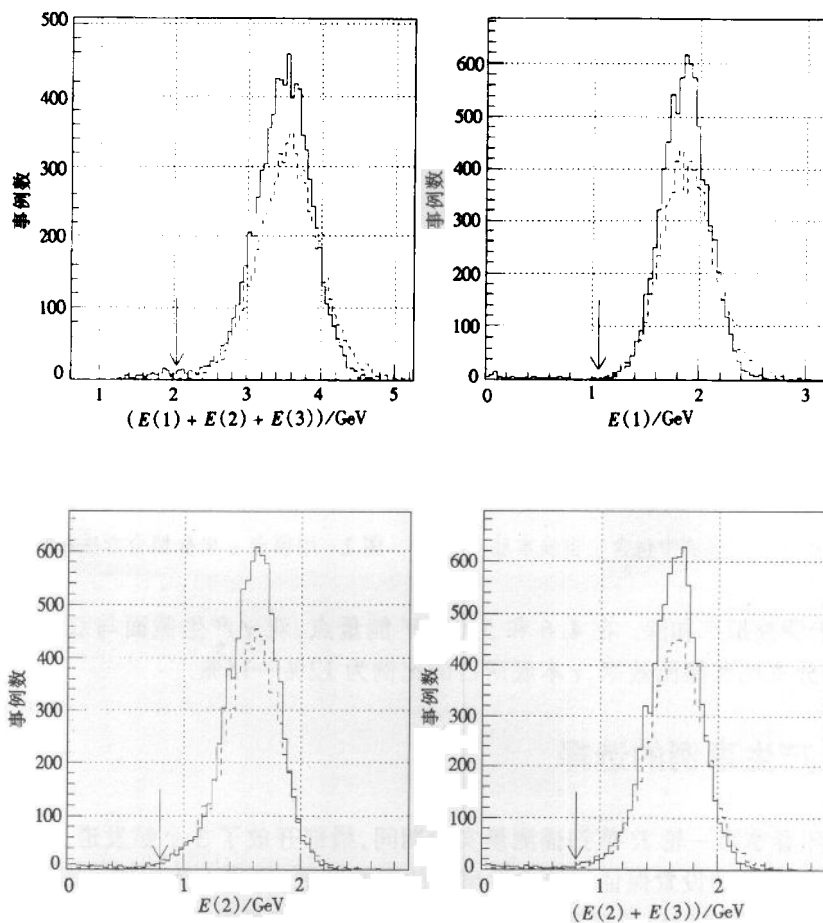
$$\bullet E_{\text{sum}} = E_{\max 1} + E_{\max 2} + E_{\max 3} > 1.15 E_{\text{beam}}$$

其中, 第 3 条径迹是可能的辐射光子. 前两条径迹应该满足背对背关系, 由于中性径迹在磁场中无偏转, 所以在簇射计数器中表现为严格的背对背(如图 4 所示), 与巴巴事例明显不同. 用 θ_1, θ_2 和 ϕ_1, ϕ_2 分别表示两条径迹的极角和方位角, 背对背要求为

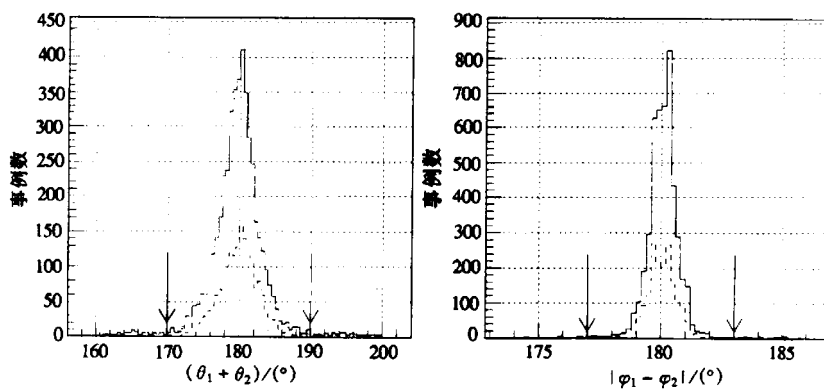
$$\bullet |\theta_1 + \theta_2 - 180^\circ| < 10^\circ$$

$$\bullet ||\phi_1 - \phi_2| - 180^\circ| < 3^\circ$$

图 3 和图 4 均为非归一的比较, 以便更清楚地反映蒙特卡罗和真实数据的形状。

图3 $\gamma\gamma$ 事例的能量选择条件

—蒙特卡罗模拟,---真实数据.

图4 $\gamma\gamma$ 事例的背对背条件

—蒙特卡罗模拟,---真实数据.

在簇射计数器的 $z=0, \pm 95.5\text{cm}$ 处有 3 个宽 2.8cm 的加强筋层, 形成探测死区; 同时加强筋也给蒙特卡罗模拟造成很大困难, 落入加强筋区域内的粒子, 其行为不能很好地

模拟. 而探测效率必须由蒙特卡罗模拟得到, 上述两方面的因素使得出射位置在加强筋附近的事例不能用于亮度计算, 为保证结果的可靠性, 事例选择过程中排除了 3 个宽约 20cm 的加强筋带. 同时要求径迹在簇射计数器的击中位置 $|z| < 125\text{cm}$, 这相当于几何接收范围在 $|\cos\theta| < 0.71$ 以内.

4 结果和讨论

积分亮度的计算公式如下:

$$L = \frac{N_{\text{obs}}}{\sigma \cdot \epsilon \cdot \epsilon_{\text{tr}}},$$

其中, N_{obs} 是观察到的事例数, σ 是蒙特卡罗事例的产生截面, ϵ 是北京谱仪探测器对于给定末态的接收度或称探测效率, ϵ_{tr} 是事例的触发效率.

(辐射) 双 μ 产生和(辐射) 双 γ 产生的蒙特卡罗模拟程序采用 Berends 等人编写的 radmu^[5] 和 radgg^[6], 考虑到了 α^2 和 α^3 级 Feynman 图的贡献, 此处 α 是精细结构常数. QED 理论截面的误差来源于 α^4 及更高阶的贡献, 估计小于 2%.

对于双 γ 事例, 选择条件带来的总的系统误差为 3.5%, 其中包括桶部簇射计数器加强筋的影响. 对于双 μ 事例, 总的系统误差为 6.4%.

R 值取数期间, 触发条件的设置相当宽松, 触发效率接近 100%^[7,8], 它所带来的误差可以忽略.

本文所述两种分析方法用于 6 个扫描点的数据, 得到的结果如表 1, 为便于比较, 由大角度 Bhabha 事例计算出的亮度值也列入表中, 可见各种方法给出的结果在误差范围内基本上是一致的, 但中心值存在系统偏离, 由双 γ 过程和双 μ 过程计算的亮度值略小. 需要说明的是, 在 4.6 和 5.0GeV 能点, 由于受电磁干扰较大, 数据质量较差, 飞行时间信息不可靠, 给双 μ 事例的选择造成了很大困难; 同时这两个能点在 τ 轻子对产生阈值以上, 因此还存在来自双 τ 产生的本底. 所以在这两个能点没有给出由双 μ 事例计算的亮度值.

表 1 R 值测量首轮实验 6 个能量点的积分亮度

E_{cm}/GeV	$L_{e^+e^-}/\text{nb}^{-1}$	$L_{\mu\mu}/\text{nb}^{-1}$	$L_{\gamma\gamma}/\text{nb}^{-1}$
2.60	292.9 ± 6.5	268.2 ± 18.9	266.7 ± 12.0
3.20	109.3 ± 3.4	108.9 ± 8.6	106.0 ± 5.9
3.40	135.3 ± 4.0	125.1 ± 9.8	130.7 ± 7.1
3.55	200.2 ± 5.2	192.1 ± 14.5	191.1 ± 9.7
4.60	87.7 ± 2.7	—	87.3 ± 6.5
5.00	102.3 ± 3.6	—	103.1 ± 7.7

作者感谢美国 Hawaii 大学 F. A. Harris 教授、张长春研究员、朱永生研究员的有益建议和讨论, 感谢王平副研究员在蒙特卡罗模拟方面给予的帮助及电子学室、加速器中心和

运行车间全体人员在 R 值取数期间的大力协作和支持.

参考文献(References)

- 1 BAI J Z et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. ,1994, **A344**:319
- 2 DING HuiLiang et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1992, **16**:769
(丁慧良等. 高能物理与核物理, 1992, **16**:769)
- 3 BES Collaboration. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1997, **21**:97
(BES 合作组. 高能物理与核物理, 1997, **21**:97)
- 4 QI XiangRong et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1999, **23**:1
(祁向荣等. 高能物理与核物理, 1999, **23**:1)
- 5 Berends F A et al. Phys. Lett. , 1987, **63B**:432
- 6 Berends F A et al. Nucl. Phys. , 1981, **B186**:22
- 7 YU ZhongQiang et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1995, **19**:1062
(郁忠强等. 高能物理与核物理, 1995, **19**:1062)
- 8 HUANG GuangShun, The 8th BES Annual Meeting. June 1999. Beijing

New Methods to Measure Integrated Luminosity at BES*

HUANG GuangShun¹⁾ CHENG BaoSen YUAN ChangZheng LI XinHua
QIXiangRong LIU Jing CHEN GuangPei CHEN JiangChuan HU HaiMing
HU Tao JU Xin LI Jin MAO ZePu XUE ShengTian ZHANG LiangSheng
ZHENG ZhiPeng ZHOU Li ZHAO ZhengGuo
(*Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China*)

Abstract Two new methods are introduced for the first time at BES to measure the integrated luminosity from events in large angle produced by QED dimuon and two-gamma production processes. With these methods, the integrated luminosities of the 6 energy points at 2.6, 3.2, 3.4, 3.55, 4.6 and 5.0 GeV scanned for the measurement of R are determined. The measured integrated luminosities are consistent with that determined using large angle Bhabha events.

Key words integrated luminosity, dimuon production events, two-gamma production events

Received 12 May 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19991480), The Chinese Academy of Sciences Foundation (KJ95T-03) and the National Outstanding Young Scientist Foundation (19825116)

1) E-mail: huanggs@ponyl.ihep.ac.cn