R 值扫描中积分亮度的测量*

王至勇† 苑长征 黄光顺 程宝森 祁向荣 陈光培 陈江川 胡海明 胡 涛
李 金 毛泽普 薛生田 周 莉 赵政国

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 本文介绍在R值扫描中利用大角度Bhabha事例测量积分亮度,较之以往的同类过程积分亮度的测量, 在事例选择和探测效率的确定方面都作了较大的改进.用不同的测量方法对本文的结果进行了检查, 发现几种结果在误差范围内是一致的. 但本文的测量优化了事例选择条件, 所以在一定程度上改善了系统误差.

关键词 亮度, Bhabha事例,探测效率, 截面

1 引言

亮度(瞬时亮度)是表征对撞机在单位时间内产生物理反应事例多少的重要物理量,是衡量对撞机性能的重要参数之一. 对撞机的亮度随时间按指数规律衰减, 积分亮度是亮度在一段时间内的积分, 即:

$$\mathcal{L} = \int_{t1}^{t2} L(t)dt \quad . \tag{1}$$

其中, $L(t)$ 为亮度, $\mathcal{L}$为积分亮度. 后者与物理反应事例数密切相关, 是对撞机取数过程及离线数据分析中的一个重要物理量.

对某一物理过程而言, 产生的事例数N为该过程的反应截面σ与积分亮度的乘积, 即:

$$N = \sigma\mathcal{L} \quad . \tag{2}$$

上面的关系式反过来可以计算积分亮度. 即找出某一反应过程的事例数和计算出相应过程的反应截面. 从理论上讲, 任何一种QED 过程都可用来测量亮度. 然而, 考虑到反应截面的大小和被理论计算的精确程度, 末态事例拓扑等因素, 以下几个过程最适合作亮度测量:

*国家自然科学基金(19991480, 19825116, 19805009)、中国科学院重大项目(KJ95T-03)、百人计划基金资助
†E-mail: wangzy@pony2.ihep.ac.cn

$$e^+e^- \to e^+e^-(\gamma) \ ,$$
$$e^+e^- \to \mu^+\mu^-(\gamma) \ ,$$
$$e^+e^- \to \gamma\gamma(\gamma) \ .$$

其中第一个过程即Bhabha过程是首选过程. 因为该过程反应截面大,而且能用QED理论进行精确的计算, 事例拓扑特征突出, 容易与其它背景分开. 北京谱仪[1,2]在线亮度测量是利用安放在紧挨束流管外壁的小角度亮度监测器[3]. 由于Bhabha过程的微分截面在小角度时近似与角度的四次方成反比. 所以在小角度附近,事例率很高, 但受空间限制,小角度亮度监测器接收截面不能太大,即探测器覆盖的立体角非常小, 而且反应截面对角度极为敏感. 这就要求亮度监测器有极高精度的定位, 这是难以做到的. 而且小角度附近多次散射非常严重. 所以, BES上的小角度亮度监测器给出的值一般用于在线亮度参考, 离线物理分析的亮度计算用的是大角度Bhabha 事例[4]. 因为大角度Bhabha过程与其它物理过程的取数条件相比是一致的, 不必引入死时间校正.

2 R值测量中的积分亮度

R值定义为正负电子通过虚光子湮没到强子的零级截面与湮没到双μ的零级截面的比值.即:

$$R = \frac{\sigma^0(e^+e^- \to \gamma^* \to hadrons)}{\sigma^0(e^+e^- \to \gamma^* \to \mu\mu)} \ , \qquad (3)$$

由于实验中不能直接观测强子的零级截面, R值的实验测量是通过下式得到的:

$$R = \frac{N_{had}^{obs} - N_{bg} - \Sigma_l N_{ll} - N_{\gamma\gamma}}{\sigma_{\mu\mu}^0 \cdot \epsilon_{had} \cdot \epsilon_{trg} \cdot (1+\delta) \cdot \mathcal{L}} \ . \qquad (4)$$

其中, N_{had}^{obs}是观察到的强子事例数、N_{bg}是与束流气体有关的本底事例数、$\Sigma_l N_{ll}$是误判为强子的轻子对事例数($l = e, \mu, \tau$)、$N_{\gamma\gamma}$是误判为单光子湮没到强子的双光子过程事例数、$\sigma_{\mu\mu}^0$是双μ的零级截面、ϵ_{had}是强子的探测效率、ϵ_{trg}是触发效率、δ是辐射修正因子、$\mathcal{L}$为积分亮度,在以上各参量中, 积分亮度是对R值的测量及测量精度有重要影响的参量之一. 因此, 在R值扫描中对积分亮度的测量给予了特别的关注.

3 事例选择

首先研究$\sqrt{s} = 2.5GeV$两叉事例末态的性质[5]以确定事例选择条件. 图1.显示的是两条带电径迹在簇射计数器的沉积能量之和对dE/dx脉冲高度之和的二维散点图. 从图上可以看出, 事例明显集中在两个部分, 其中右上方的部分的事例为明显的Bhabha事例. 分布在左下角的事例较为复杂, 可能是束流-气体本底、强子、双μ等等. 这两部分事例的重要区别是能量分界线非常明显, Bhabha事例的总沉积能量主要集中在质心系能量附近. 这表明仅仅用能量即子探测器簇射计数器的信息就可以把Bhabha事例挑选出来,不必再用其它子探测器信息. 从而避免涉及过多的事例选择条件加大系统误差. 这是我们在事例选择方面所作的改进,下面是事例初选条件.

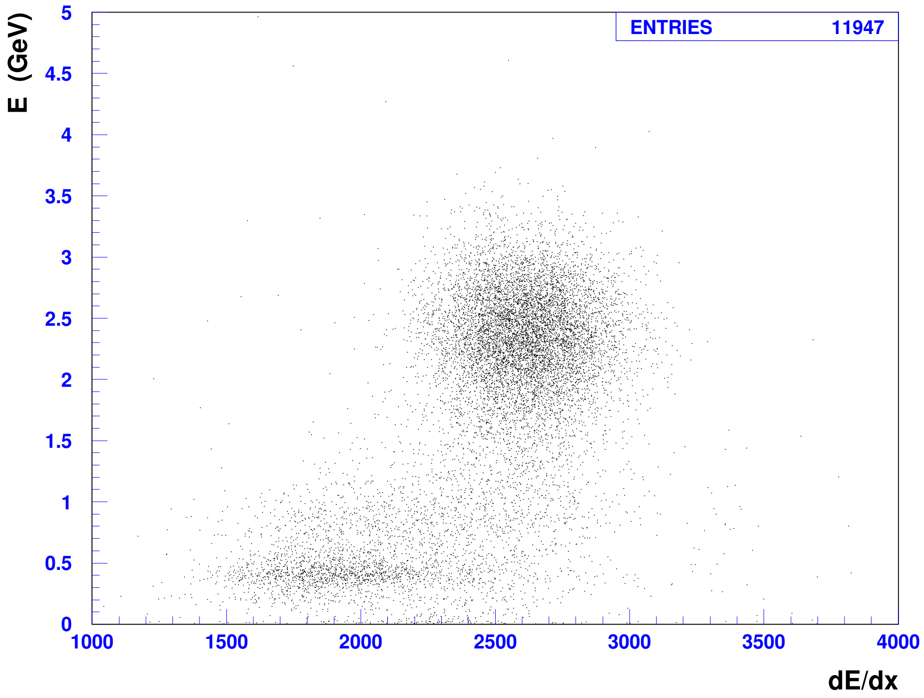

图 1：脉冲幅度对沉积能量的二维散点图

(1) 根据在簇射计数器沉积能量的大小，依次选出两根能量最大的径迹，能量下限不低于1.0GeV(说明：这里仅以$\sqrt{s} = 2.5GeV$为例．当$\sqrt{s}$有大的变化时，能量下限要相应的作一些变化)．

(2) 要求能量最大的两根径迹满足$|cos\theta_b| < 0.55$．

其中θ_b是由簇射计数器所确定的径迹相对于束流方向的极角． 图2.是上面所选两根径迹的方位角之差的分布图．图上显示出三个尖锐的峰，其中在$\delta\phi = 0$附近较小的峰是$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$事例．因为该过程是纯中性的，径迹不受磁场影响，所以几乎是严格的背对背．加上簇射计数器的ϕ方向分辨很好,故该峰的分布很窄．两边的峰是Bhabha 事例．因为带电径迹经过主漂移室时受轴向磁场的作用会发生偏转，所以Bhabha事例在ϕ方向并不是严格的背对背，双峰的峰位随质心系的能量变化也有所变动．根据图2.的分布将事例分以下几个区域:

A. $|\delta\phi| < 2^o$的区域是辐射双γ事例．

B. $16^o < |\delta\phi| < 30^o$的区域是纯本底事例(本底区)．

C. $2^o < |\delta\phi| < 16^o$是Bhabha事例和某些本底(信号区)．

根据图2.本底区的事例分布近似认为整个区间内的本底分布都是均匀的． 即认为包含在$2 < |\delta\phi| < 16^o$和$16^o < |\delta\phi| < 30^o$的本底事例数大致相同，用C部分的事例数减去B部分的事例数，就得到Bhabha事例总数． 这里并没有扣除加强筋的影响，落在Bhabha事例选择区域的加强筋有三根，加强筋本身只有2.8cm，但目前尚不能对粒子在加强筋区域的行为作出真实化程度很高的模拟，造成了加强筋的影响范围远大其本身的尺寸．研究表明，每根加强筋的探测死区再加上周围探测效率低下的区域在z方向的宽度可

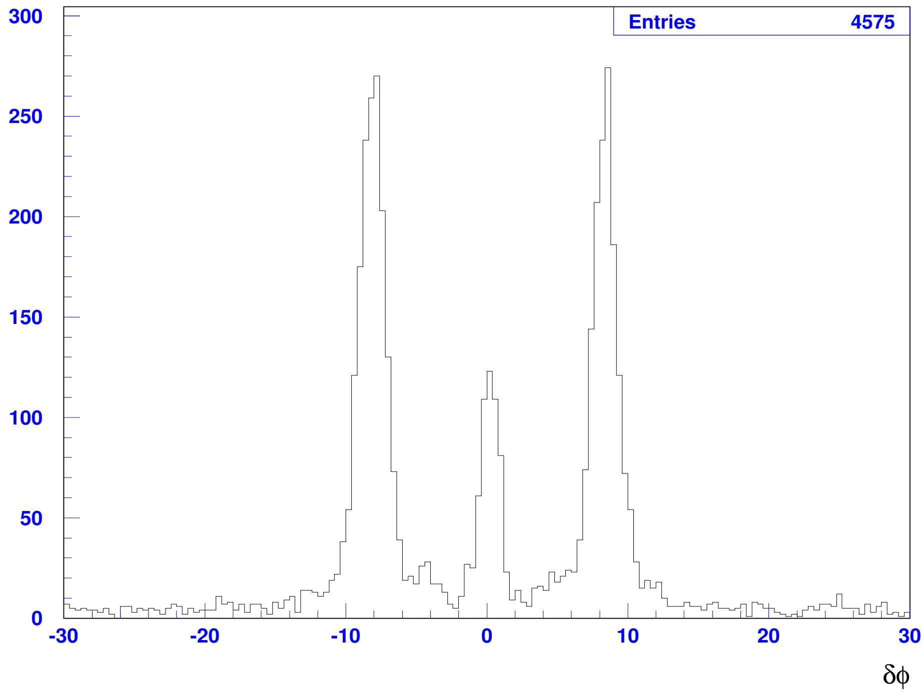

图 2：真实数据的两个最高能量的径迹的$\delta\phi$分布

达15-25cm 要想完全消除加强筋的影响，在事例选择时必须避开这部分区域．这在接受度方面将造成一定的损失，减少了事例统计量，从而加大了统计误差．这里没有扣除加强筋的影响范围是因为采取如下的方法补偿真实数据和Monte-Carlo数据之间的差异，从而避免了接受度的损失．这也是在亮度计算中的又一改进，下面将详细介绍．

4 选择效率

用完全不涉及簇射计数器的其它子探测器的信息选出纯的Bhabha样本，然后让此样本经过用簇射信息选Bahbha的方法再挑选一次．经过挑选后的末样本与初样本事例数之比就是选择效率．这种选择效率对真实数据和Monte-Carlo数据是不相同的．因为真实数据在重建过程中已作了一定程度的补偿，所以选择效率要高，而相应的Monte-Carlo数据的选择效率要低一些．它们之间的差异实际上反映了Monte-Carlo模拟的缺陷性．用这种选择效率差异补偿了加强筋所造成的接受度的失真．下面是用其它探测器选择Bhabha初样本的选择条件:

(1) 带电径迹数为2.

(2) 每条径迹的拟合优度mfit=2.

(3) 两径迹都满足$|z_{sc}/\sqrt{z_{sc}^2+1.283^2}| < 0.55$，$z_{sc}$是径迹从主漂移室外推桶部簇射计数器内层的Z坐标． 1.283(米)是BSC的内径． 该条件是要求这里所选出的Bhabha事例与前面用BSC信息所选的Bhabha事例有非常相近的极角.

(4) 两径迹的脉冲幅度之和大于2200.

(5) $\sqrt{p_+^2+p_-^2} > 0.35\times E_{cm}$，$p_+^2, p_-^2$分别为两径迹动量，$E_{cm}$为质心系能量.

表 1：亮度计算中各参量的大小. n^{samp}是不用BSC信息选出的Bhabha样本, n^{sgn}_{samp}是在前面的样本上再加上BSC信息选出的Bhabha事例数.

$\sqrt{s}$	3.55 GeV	
	DATA	MC
n^{sgn}	7193	8529
n^{bg}	245	157
$n^{pure}_{e^+e^-}$	6948	8372
N^{tot}_{MC}	-	50000
σ	-	193.92
n^{samp}	4607	8438
n^{sgn}_{samp}	4138	7073
$\epsilon(\%)$	89.8 ± 0.8	83.8 ± 0.7
$L(nb^{-1})$	$200.3 \pm 2.4 \pm 5.3$	

(6) 两径迹都有好的TOF击中. ($T_{qual} = 1$).

(7) 两径迹的飞行时间差小于1.0ns

(8) $|V_r^+ + V_r^-| < 0.01m$, 这里V_r^+, V_r^-分别为两径迹在$R-\phi$平面离对撞点的最小距离.

(9) $|V_z^+ + V_z^-| < 0.20m$, 这里V_z^+, V_z^-分别两径迹在Z方向离对撞点的最小距离.

真实数据和Monte-Carlo数据的选择效率被列在表1.里. 表中第一列各物理量的意义将在下一节作具体说明.

5 亮度计算与误差分析

通过上面的分析, 积分亮度的最终表达式可推导如下:

$$\mathcal{L} = \frac{n_{Bhabha}}{\epsilon_{trg} \cdot A \cdot \sigma} \cdot C_\epsilon = \frac{(n^{sgn} - n^{bg})_{data}}{\epsilon_{trg} \cdot (n^{sgn} - n^{bg})_{mc}/N^{tot}_{mc} \cdot \sigma} \cdot \frac{\epsilon_{mc}}{\epsilon_{data}} \quad . \tag{5}$$

这里,n^{sgn}, n^{bg}分别是落在$2^o < |\delta\phi| < 16^o$(信号区)和$16^o < |\delta\phi| < 30^o$(本底区)的事例数, $n_{Bhabha} = (n^{sgn} - n^{bg})$ 就是第三节所提到的纯的Bhabha事例数. ϵ_{trg}是触发效率, Bhabha事例的Monte-Carlo模拟程序是由Berends等人完成的[6]. 本分析中事例产生的范围是$|\cos\theta| < 0.85$, σ是相应的积分Bhabha散射截面, 由Monte-Carlo产生子直接给出, N^{tot}_{mc}是产生的总的Monte-Carlo事例数. $A = (n^{sgn} - n^{bg})_{mc}/N^{tot}_{mc}$是用本文第三部分所提及的事例选择条件(其中包括$|\cos\theta_b| < 0.55$)从相应的Monte-Carlo样本选择Bhabha事例的接受度. $C_\epsilon = \epsilon_{mc}/\epsilon_{data}$是接受度的补偿系数. $\epsilon_{data}, \epsilon_{mc}$分别指的是表1.中真实数据和Monte-Carlo数据的选择效率.

根据统计学原理, Bhabha事例的统计涨落$\Delta N \approx \sqrt{N}$, 统计误差可由此算出. 这里着重介绍系统误差, 系统误差的来源主要有以下几个方面, Bhabha事例的选择条件, 选择

表 2：几种方法所得亮度结果的比较(单位: nb^{-1})

$\sqrt{s}/GeV$	方法一	方法二	本文方法
3.55	$204.7 \pm 3.2 \pm 5.1$	$189.2 \pm 2.8 \pm 5.68$	$200.3 \pm 2.4 \pm 5.3$
3.2	$108.5 \pm 1.8 \pm 2.7$	$109 \pm 1.8 \pm 3.30$	$109.3 \pm 1.6 \pm 3.1$
3.0	$137.6 \pm 2.3 \pm 3.5$	$132.4 \pm 1.9 \pm 3.97$	$138.1 \pm 1.7 \pm 3.72$

效率的不确定性，其它的本底贡献以及理论截面计算的某些不完善．其中主要的是事例选择条件的变化．极角和径迹最小能量的变化引起亮度的误差分别约为0.5%和2%．选择效率的计算虽然复杂，但对真实数据和Monte-Carlo数据而言，它们之间的相对差异并不是特别大($\sim 8\%$)．对接受度的补偿正是由它们的比值决定，故不应很大．因此由接受度的补偿而引入的系统误差当然也不大，经计算不到1%．辐射双γ的污染也很小,虽然在选择Bhabha事例过程中没有区分径迹是否带电，仅从$\delta\phi$的分布来区分Bhabha和辐射双γ．但是从图2.可以看出双γ事例分布的宽度很窄,在剔除该部分事例时$\delta\phi$的设定范围已在其3σ之外，故其污染不超过0.3%．总之，本底的话扣除所带来的误差约为1%，理论截面的误差少于0.3%，由Monte-Carlo产生子直接给出．触发效率[7]接近100%，引起的亮度误差小于0.5%．通过分析可以发现系统误差的主要来源与两径迹的能量之和的选取有关，这是由于SC的能量分辨较差的原因．考虑上面所有的误差，最后的总系统误差约为3.0%．

6 比较与讨论

我们采用了几种不同选择Bhabha事例的方法对本文的方法进行了检验，方法1：直接扣除加强筋所影响的区域．方法二:加强筋所影响的区域用dE/dx信息，其它区域仍用簇射信息[8]．表2.列出不同方法所得的结果．从表中可以看出它们在误差范围内都是符合的，第一种方法统计误差较大，原因在本文第三部分已作介绍．第二种方法在有些能量点与另两种方法有较大的出入．原因是在第二轮R值扫描中未能对数据作很好的dE/dx脉冲幅度修正.由此而造成了探测效率在一定程度上的不确定性，这也是本实验中未采纳dE/dx信息计算亮度的原因．此外,我们还利用$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma), e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$两过程对某些点的亮度进行了计算．结果发现在误差范围内它们大致和上面所介绍的几种方法所得的结果是一致的[9]．但这两种过程的末态事例较少，统计误差较大，在R值的亮度计算中仅用于辅助检查．

在98-99两轮R值扫描中，总的能量点达到88个,能量范围覆盖了2-5GeV.本文所介绍的方法适用于BES全能区的亮度测量(强共振区$J/\psi, \psi'$除外)．是一种较为普适的方法[10]．

感谢朱永生研究员和莫晓虎博士提出了很多好的建议,感谢美国Hawaii大学的Derrick博士与我们进行了有益的讨论,感谢王平副研究员在理论和Monte-Carlo方面给予的帮助，在R值扫描期间作出巨大努力的加速器中心和计算中心以及其他职员，在此一并致谢．

参考资料

[1] Bai JingZhi *et al.*, The BES Detector. Nucl. Instr, meth, 1994, A344:319

[2] BES Collaboration, HEP&NP(in Chinese),1992, 16:769
(BES合作组, 高能物理与核物理, 1992, 16:769)

[3] Ni Huiling. *et al*, HEP&NP(in Chinese), 1990,14:491
(倪惠玲等, 高能物理与核物理, 1990,14:491.)

[4] BES Collaboration, HEP&NP(in Chinese), 1997,21:97.
(BES合作组, 高能物理与核物理,1997,21:97.)

[5] Yuan Changzhen, Luminosity Determination for R Project. Internal Report. Beijing, 1998.

[6] Huang Guangshun, Study of Trigger Efficiency, 8rd BES Annual Meeting, Beijing, Jun. 1999

[7] F.A.Berends, R. Kleiss, Nucl. Phys., 1983,B228:537

[8] Derrick, Luminosity Determinoation for 99 R scan, 8rd BES Annual Meeting, Beijng, Jun. 1999

[9] Huang Guangshun *et al*, HEP&NP(in Chinese), 2000,24.
黄光顺等,高能物理与核物理. 2000,24.

[10] Bai JingZhi, et. al. PRL. Jan. 2000, Vol. 84, $P594-597$

Measurement of Integrated Lumninosity in R Scan*[1]

Wang Zhiyong[1)2] Yuan Changzhen Huang Guangshun Cheng Baosen
Qixiangrong Chen Guangpei Chen Jiangchuan Hu Haiming Hu Tao Li Jin
Mao Zepu Xue Shengtian Zhou Li Zhao Zhengguo

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 10039,China)

Abstract A method is introduced for the measurement of integrated luminosity in R scan by large-angle Bhabha events. Compared with the previous method. some improvement have been made in both events selection and determination of detection efficiency. Several methods are employed to check our results. It is found that our results are compatible with other results within error. But this method gives a smaller systematic error.

Key word luminosity, Bhabha event,detection efficiency, cross-section

[1] * Supporteded by National Natural Science Foundation of China (19991480, 19825116, 19805009), The Chinese Academy of Science Foundatio(KJ95T-03) and 100-Talented Scientist Fundation

[2] 1) E-maill: Wangzy@pony2.ihep.ac.cn