

用小角度 Bhabha 事例谱形分析方法 确定北京谱仪亮度

朱启明 周化十 姜春华 倪蕙苓

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要

介绍了在 τ 轻子质量测量中用小角度 Bhabha 事例谱形分析确定亮度的方法, 并给出部分分析结果.

一、引 言

亮度是对撞机的一个重要指标, 也是高能物理实验中的一个基本参数. 北京谱仪 (BES) 小角度亮度监测器不仅用于亮度在线监测, 经过离线分析得出的亮度值还用于物理分析. 在 BES 的 τ 轻子质量测量中, 用谱形分析法对小角度 Bhabha 事例数据作了离线分析, 给出的亮度值与从大角度 Bhabha 事例得到的亮度值在小于 10% 范围内一致^[1]. 两种方法相比, 小角度谱形分析方法的突出优点是, 分析过程简单易行, 能及时给出具有一定精确度的亮度值, 保证某些实验得以进行, 如 τ 质量精密测量. 谱形分析方法是根据 Bhabha 事例末态粒子的能量、时间信号的分布特征对亮度监测器探测到的事例逐一作仔细分析, 以区别出好事例与本底, 从而得到亮度值.

二、亮度监测器原理和接受截面

北京谱仪亮度监测器原理如图 1 所示, 由四组探测器构成^[2], 每组包括三个探测器, 分别用 P、C、S 表示, 其中 P、C 分别是定义计数器和辅助计数器, S 是量能器.

亮度监测器的读出线路有两种触发方式, 即正常触发和延时触发. 正常触发选择 Bhabha 事例, 延时触发测量随机本底. 延时触发是指本次对撞的二重符合信号被延时一个对撞周期后与下一次对撞的另一组信号符合, 北京正负电子对撞机的对撞周期约为 802 ns. 每种触发逻辑对应一个状态数. 表 1 给出以上逻辑关系及状态数.

Bhabha 事例击中两组以对撞中心为对称点的探测器, 若信号满足一定逻辑关系, 被选中记录.

亮度计算公式如下:

$$L = \frac{N}{4\sigma_{bb}}, \quad (1)$$

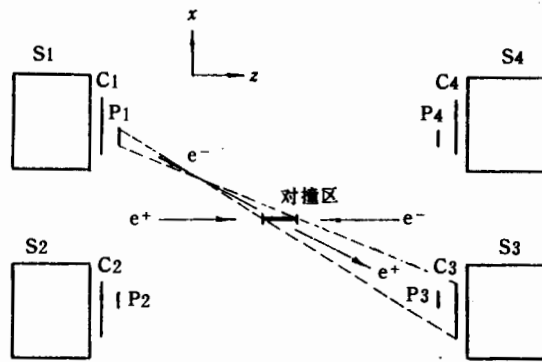


图1 亮度监测器原理图

式中 L 表示亮度; N 表示四路探测器测量到的全部 Bhabha 事例数, 若 N_{trg} 表示亮度监测器正常触发的总次数, N_{bg} 表示延时触发的总次数, 则

$$N = N_{\text{trg}} - N_{\text{bg}}, \quad (2)$$

N_{bg} 也可以用谱形分析法得到; σ_{bb} 表示一个 P 计数器接受的 Bhabha 散射积分截面即亮度监测器的接受截面. $4\sigma_{\text{bb}}$ 表示亮度监测器的总接受截面, 这里假定四个 P 计数器的接受截面相等.

表1 亮度监测器触发逻辑及状态数

正常触发	状态数	延时触发	状态数
$(P_1 \cdot S_1) \cdot (C_3 \cdot S_3)$	1	$(P_1 \cdot S_1) \cdot (C_3 \cdot S_3)_d$	16
$(P_2 \cdot S_2) \cdot (C_4 \cdot S_4)$	2	$(P_2 \cdot S_2) \cdot (C_4 \cdot S_4)_d$	32
$(P_3 \cdot S_3) \cdot (C_1 \cdot S_1)$	4	$(P_3 \cdot S_3) \cdot (C_1 \cdot S_1)_d$	64
$(P_4 \cdot S_4) \cdot (C_2 \cdot S_2)$	8	$(P_4 \cdot S_4) \cdot (C_2 \cdot S_2)_d$	128

Bhabha 散射的积分截面采用以下公式,

$$\sigma = \int \frac{\alpha^2}{8E^2} \frac{(2 - \sin^2\theta)(4 - \sin^2\theta)^2}{\sin^4\theta} d\Omega, \quad (3)$$

σ 是用数值积分进行计算的. 部分计算结果见表 2. 表 2 中与 P 对应的截面值表示 P 计数器所在的那个亮度通道的 Bhabha 散射接受截面, 如 P_1 对应着 $(P_1 \cdot S_1) \cdot (C_3 \cdot S_3)$ 通道. 从表 2 中可见, 与 P_1 、 P_2 对应的两截面差异较大, 约为 4%, 这是由于 P_1 、 P_2 计数器相对对撞区中心点的实际几何位置差异造成的. 由于亮度监测器的布局 and 结构的特点^[2], 当对撞区参数即中心位置、轮廓分布有变化时, 每条亮度通道的截面会有变化, 但四条通道截面的平均值的改变是很小的. 在实际计算中, 每通道的亮度用各自的截面数值计算和用平均截面数值计算引起的差异是 0.05%. 在 τ 质量测量中, 用蒙特卡洛方法考虑了辐射修正等因素进行了截面计算^[3]. 在 $E=1.77$ GeV, 不考虑辐射修正时, 用蒙特卡洛计算的 $E^2 \cdot \sigma_{\text{bb}}$ 值为 0.3291×10^{-29} , 与数值积分计算的 $E^2 \cdot \sigma_{\text{bb}}$ 值 0.3284×10^{-29} 相差 $\sim 0.2\%$.

表2 BES 亮度监测器中定义计数器 P 的接受截面

能量(GeV) 截面 (μb) 定义计数器	1.5485	1.75	1.8425	2.0
P_1	1.3971	1.0938	0.9867	0.8375
P_2	1.3434	1.0518	0.9489	0.8053
P_3	1.3672	1.0704	0.9657	0.8196
P_4	1.3734	1.0755	0.9703	0.8235
平均	1.3704	1.0729	0.9679	0.8217

三、事例筛选

读出线路记录了 P、C、S 计数器的能量信息(ADC 计数)和 P、S 计数器的时间信息(TDC 计数). P、C 计数器的 ADC 谱是符合朗道分布的 dE/dx 谱, S 计数器的 ADC、TDC 谱都是高斯分布, 拟合后容易找到合适的截断位置, 谱形分析全部选用量能器 S 的信息.

为了扣除束团在经过探测器时产生的随机本底, 定义 DT_i 表示一组对应量能器的 TDC 计数之差, 即

$$DT_i = TDC(S_i) - TDC(S_{i+2}), \quad (4)$$

$$i = 1, 2.$$

在不同的触发逻辑关系中, 由于参与符合的探测器不同, 同一探测器的 ADC 信号分布因此有一定差异. 以量能器 S_i 为例, 在 $(P_1 \cdot S_1) \cdot (C_3 \cdot S_3)$ 逻辑中, S_1 与 P_1 符合, 而在 $(P_3 \cdot S_3) \cdot (C_1 \cdot S_1)$ 逻辑中, S_1 与 C_1 符合, P_1 和 C_1 的几何尺寸和位置不同, S_1 被击中的位置分布在两种逻辑中有所不同, 从而引起幅度分布的差异^[4]. 所以在选取截断条件时, 不仅要考虑不同的探测器, 而且要区分不同触发类型的事例. 表 3 给出一组用于 τ 质量测量中谱形分析法计算亮度的截断条件值. 表 3 中的 $Cutl$ 、 $Cuth$ 分别表示谱的低端和高端截断值, 其单位是 ADC 或 TDC 的道数. 它们的选取原则是: 对 ADC、TDC 谱, 截断值选在 ± 3.5 倍标准偏差处, 对 DT 谱, 截断值选在 ± 4.5 倍标准偏差处.

表 3 τ 质量测量中(RUN2678—2931)谱形分析计算亮度的截断值

状态数	谱	$Cutl$	$Cuth$	状态数	谱	$Cutl$	$Cuth$
1	DT_1	-57	40	2	DT_2	84	185
	S_1TDC	650	706		S_2TDC	602	663
	S_3TDC	660	712		S_4TDC	741	791
	S_1ADC	357	1116		S_2ADC	188	762
	S_3ADC	385	1123		S_4ADC	341	1150
4	DT_1	-57	40	8	DT_2	84	185
	S_1TDC	651	705		S_2TDC	601	666
	S_3TDC	659	713		S_4TDC	741	792
	S_1ADC	364	1194		S_2ADC	176	813
	S_3ADC	417	1082		S_4ADC	389	1118

每一个 Bhabha 事例必须同时满足全部相应截断条件, 否则就判为本底. 对于不满足 DT 量截断条件的本底, 扣除时需乘一个数值大于 1 的修正系数. 以状态数为“1”的事例为例说明如下: 图 2(a), (b) 分别给出量能器 S_1 、 S_3 的 TDC 分布图, 零点表示对撞时刻, 负值表示对撞前, 正值表示对撞后. a、c 和 b、d 分别表示对撞前、后探测到的事例. a、c 为本底, b、d 主要是 Bhabha 事例, 但也含有本底, 即 b' 、 d' 虚线部分, 这两部分本底实际上无法与 Bhabha 事例区分开. 当 DT 量来自 a、d(或 d') 和 b(或 b')、c 时, 绝对值较大, 本底容易扣除, 而来自 a、c 和 b、d(包括 b' 、 d') 时, 绝对值较小, 本底与事例仍然混在一起, 无法区分. 经 TDC 截断后, a、c 本底全部消失, 但 b' 、 d' 则基本未动. ADC 截断条件也只能把 b' 、

d'本底中能谱分布在所使用的ADC截断值(即 ± 3.5 倍标准偏差)以外部份扣除,而在主峰里边的本底则满足了全部截断条件.

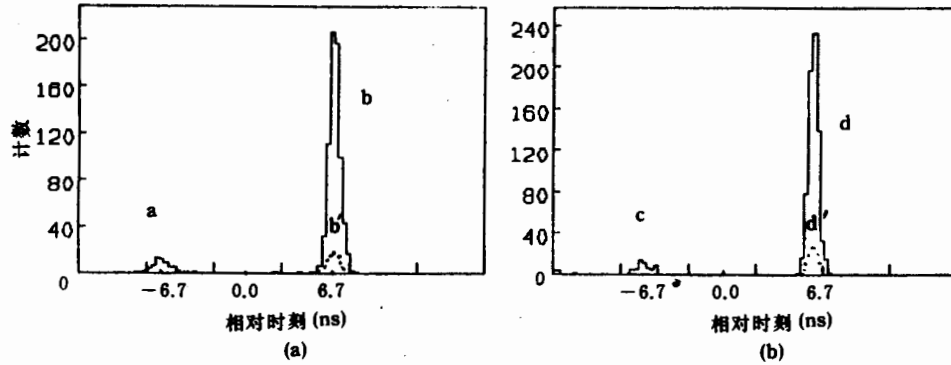


图2 量能器的TDC分布

(a)来自 S_1 , (b)来自 S_3

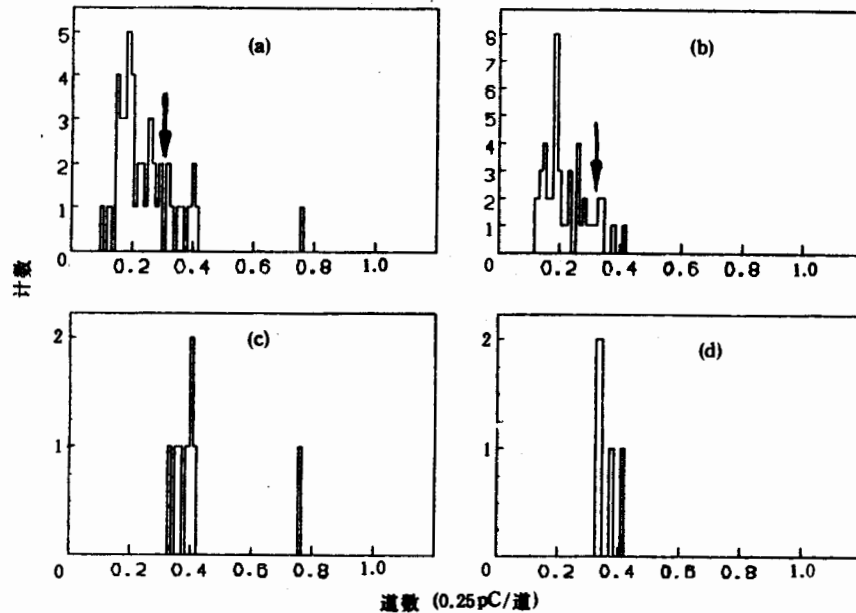


图3 通过了DT cut条件的对撞前本底事例的ADC分布

a、c本底和b'、d'本底都是由于粒子在非对撞时刻击中探测器造成的,这种粒子主要来源于束团与气体分子碰撞以及同步辐射等因素引起束团粒子的运行轨道发生偏离.不同的是a、c部分产生于对撞之前,b'、d'部分产生于对撞之后.如果假设a、c、b'、d'四部份本底事例的ADC、TDC分布相似,通过研究a、c本底行为,了解b'、d'本底,就可以将其剩余部分扣除.图3(a)、(b)是不能被DT截断条件扣除(即表3中 DT_1 值在-57和40之内)的对撞前产生的a、c本底事例的ADC分布图,图中箭头指出ADC的截断位置.图3(c)、(d)是不能被DT和ADC截断条件扣除的对撞前本底a、c的ADC分布图,这部份本底约占由DT截断条件扣除本底的7%.因为它是对撞前产生的本底,可以用TDC截断

条件扣除,但在对撞后的本底 b' 、 d' 中,这一类本底就无法用 TDC 截断条件扣除. 如果 a 、 c 、 b' 、 d' 本底相类似,则 b' 、 d' 本底经过全部截断条件后,仍有大约为 DT 扣除本底的 7% 不能被扣除,所以说在 DT 扣除的本底上需乘一个修正系数,其值应为 1.07.

四、几项修正

亮度计算中考虑了死时间、光子辐射、谱仪磁场及粒子多次散射等几方面的修正.

死时间修正包括亮度监测和北京谱仪两个系统. 死时间修正因子用下式计算:

$$F = \frac{T}{\Delta T}, \quad (5)$$

T 表示某一时间间隔内可以获取数据的时间, ΔT 表示这个时间间隔. 若死时间修正前、后亮度分别为 L_0 、 L_{cor} , 则

$$L_{cor} = L_0 \cdot \frac{F_{trg}}{F_{lum}}, \quad (6)$$

F_{trg} 、 F_{lum} 分别表示主触发系统和亮度系统的死时间修正因子. τ 轻子质量测量中 F_{trg} 平均值大于 0.85, F_{lum} 平均值大于 0.88.

由于 Bhabha 散射积分截面 σ_{bb} 计算中仅考虑包括 α^2 项的零级近似,所以在计算亮度时需作辐射修正. 谱仪磁场、粒子多次散射对亮度监测器的实际接受截面有影响,也需作修正. 在 τ 轻子质量能区,用蒙特卡罗模拟方法,对光子辐射、谱仪磁场及粒子多次散射等因素的影响作了综合计算,用 F_{tot} 表示总的修正系数, F_{tot} 约等于 1.038. 令 L_{int} 表示一个 RUN 的积分亮度,则

$$L_{int} = F_{tot} \cdot \sum_{i=1}^n L_{cor}, \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1, n,$$

n 表示一个 RUN 中总读出次数.

五、分析结果

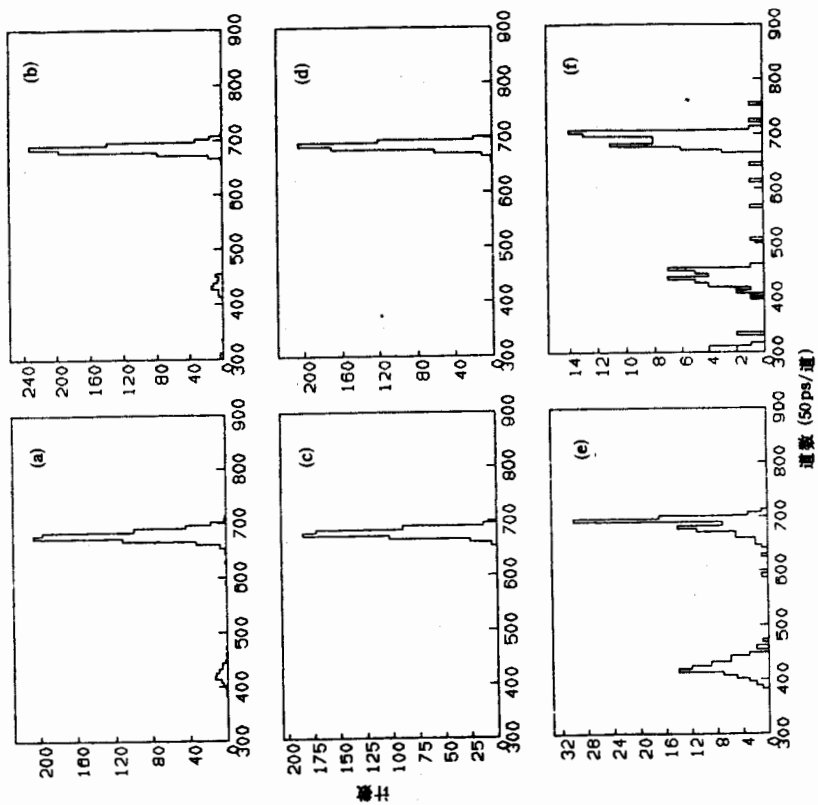
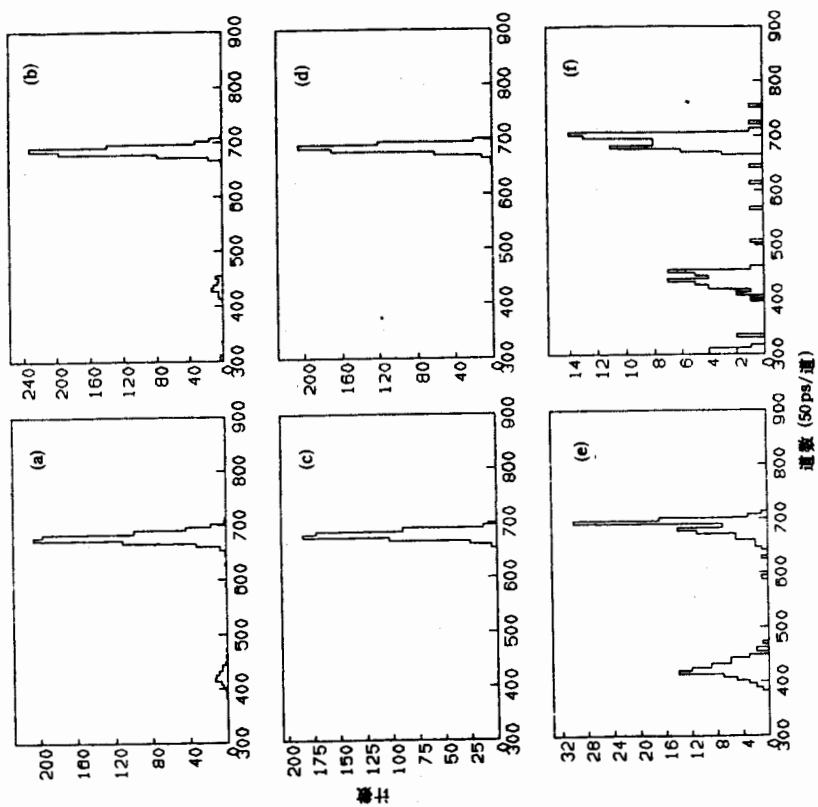
1. 截断前后 ADC、TDC 谱形的变化

图 4(a)、(b) 是量能器 S_1 和 S_3 截断前的 ADC 谱; (c)、(d) 是利用 DT 、 TDC 、 ADC 、截断条件扣除本底之后, S_1 和 S_3 的 ADC 谱; (e)、(f) 是利用 DT 、 TDC 、 ADC 截断条件所扣除的本底事例在量能器 S_1 和 S_3 中的 ADC 谱. 从几组分布图看出, 事例能谱得到改善, 低能端的小峰消失了. 在 ADC 主峰下, 也有事例被扣除, 这是因为它们不满足 TDC 截断条件.

图 5(a)、(b) 是 S_1 、 S_3 截断前的 TDC 谱; (c)、(d) 是截断后的 TDC 谱; (e)、(f) 是截断后被扣除的本底的 TDC 谱. TDC 谱也得到改善.

2. L_{adc} 与 L_{scl} 的比较

在亮度数据的离线分析中, 还利用亮度监测系统中定标器记录的正常触发和延时触发计数率计算了亮度, 记作 L_{scl} . L_{scl} 受束流突然变化影响有时起伏很大. L_{adc} 是通过 ADC 、

图4 cut前后量能器 S_1 和 S_3 的ADC分布图5 cut前后量能器 S_1 和 S_3 的TDC分布

TDC 谱形分析得到亮度,分析中选用的截断条件不恰当会造成 L_{adc} 的较大误差.因此 L_{adc} 与 L_{sc1} 的相对比值能够指示出亮度数据的获取质量以及亮度的离线分析情况,在一定程度上反映了束流的运行情况 and 状态.图 6 给出了 RUN2530—2630 近 100 个 RUN 的 L_{adc} 与 L_{sc1} 的相对比值.由图可见, L_{adc} 比 L_{sc1} 约低 5%,这是两种计算亮度方法中本底扣除量不等所造成.如果图中某一点偏离平均值较多,则说明与这一点对应的 RUN 中亮度数据有问题,亮度值需要重新分析计算.

3. τ 轻子质量测量中的积分亮度

τ 轻子质量精密测量实验中 12 个能量点的亮度值全部采用小角度 Bhabha 事例谱形分析法求得.共计 374 个 RUN,总积分亮度约为 5pb^{-1} .表 4 给出与各个能量点相对应的积分亮度值.图 7 给出了表 4 中第 4、5、6 三个能量点上各个 RUN 的积分亮度.与这些 RUN 的持续时间的比值,由图可见每次注入后对撞亮度由大到小的周期性变化.

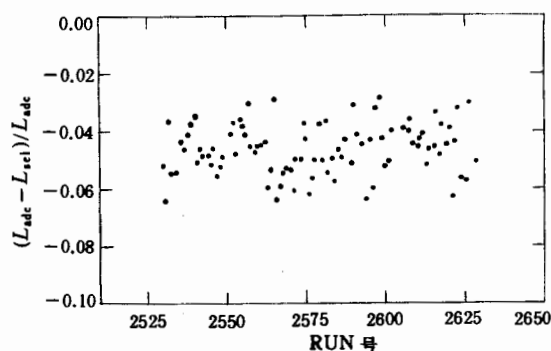


图 6 RUN2530—2630 中 L_{adc} 与 L_{sc1} 的比较

表 4 τ 质量测量中各个能量点的总积分亮度

序 号	能量*(MeV)	亮度(nb^{-1})
1	1784.19	245.8
2	1780.99	248.8
3	1772.09	232.8
4	1776.57	322.9
5	1778.49	322.6
6	1775.95	296.7
7	1776.75	383.9
8	1776.98	360.8
9	1776.45	793.9
10	1776.62	1109.1
11	1779.51	497.7
12	1789.58	249.8

* 单束能量

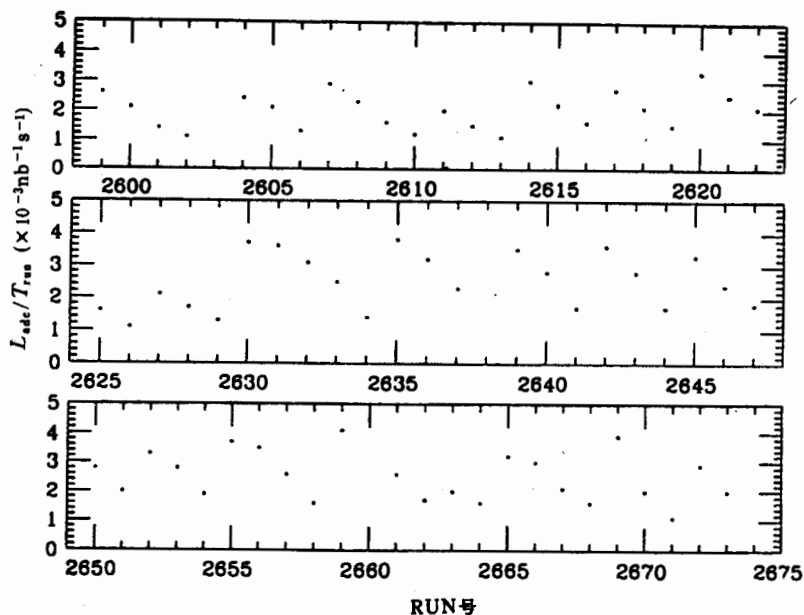


图7 平均积分亮度的变化图

亮度离线分析工作得到高能物理所一室领导的热心关注与指导以及在线组、数据生成组的大力协助与支持,亮度计算中综合修正因子是物理组王平同志提供的,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 张家文,“The luminosity obtained from wide angle Bhabha events in Tau mass experiment”,第一届 BES 合作(全体)年会,承德,1992(内部资料).
- [2] 倪蕙苓等,高能物理与核物理,14(1990),490.
- [3] 王平,“Monte Carlo Simulation of Luminosity Monitor in Tau Mass Measurement”,第一届 BES 合作(全体)年会,承德,1992(内部资料).
- [4] 倪蕙苓等,高能物理与核物理,13(1989),870.

Determining the Luminosity for BES by Spectrum Analysis of Bhabha Events in Small Angle

ZHU QIMING ZHOU HUASHI JIANG CHUNHUA NI HUILING
(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

ABSTRACT

This paper presented a method of determining the luminosity of BES by spectrum analysis of Bhabha events in small angle during the measurement of the mass of Tau lepton at BEPC.