

北京谱仪端盖簇射计数器的能量 分辨及其模拟研究

陈江川 朱永生 程宝森 刘怀民 张达华
王 平 李灿国 黄因智 张锦龙

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1996-11-20收稿

摘 要

利用北京谱仪 J/ψ、ψ′、D_s 能量下端盖簇射计数器(ESC)内的 e⁺e⁻ 末态事例,研究了电子簇射在 ESC 中单个计数管的脉冲幅度分布、击中单元总数分布和各读出层的击中单元数分布、沉积能量分布和总沉积能量的分布。得到能量分辨约为 22% / √E(GeV)。在 SOBER 程序框架的基础上采用双高斯分布描述单计数管脉冲幅度谱,EGS4 描述电磁簇射,考虑了三维磁场分布,完成了 ESC 蒙特卡罗模拟程序,模拟结果与实验数据符合很好。

关键词 北京谱仪,自猝灭流光,气体取样簇射计数器,蒙特卡罗模拟,能量分辨。

1 引 言

北京谱仪(BES)^[1]端盖簇射计数器(ESC)是一种采用自猝灭流光(SQS)^[2]工作方式的气体取样电磁量能器,它在铅辐射体夹层中排列铝计数管,每根计数管从阳极丝读出信号。这种探测器结构简单,有较大的信号幅度,通过电荷分配定位有较好的空间分辨精度。它的探测范围为 $\theta = 14^\circ - 33^\circ$, 覆盖了 $13\% \times 4\pi$ 立体角,是 BES 小角度区域最主要的探测器,尤其对该区域的 e、γ 的探测有重要作用。最近对北京谱仪中 ESC 采集的数据进行刻度的软件工作已经完成并对部分 ESC 数据作了刻度,这使得用实验数据研究 ESC 的工作性能成为可能。

2 端盖簇射计数器中 e⁺e⁻ 末态事例的判选

北京谱仪端盖簇射计数器的建造与检测已有专文描述^[3],这里仅简述与本研究有关的部分。端盖簇射计数器分为结构相同的两端,每端有 24 个取样层,每个取样层由 0.5 个辐射长度的铅板及沿垂直地面方向排列的约 188 根方形铝计数管(从第六层往前每

层依次减少两根管)组成. 为减少电子学读出电路的道数, 这 24 个取样层组合成 9 个读出单元层: 前六个取样层的每根计数管为一个电子学读出单元, 从管的阳极丝两端分别输出信号, 主要用于测量簇射沉积能量和用电荷分配法确定入射粒子的位置及方向; 后面 18 个取样层的计数管分别按 4, 4, 10 层组合成 3 个读出单元层, 每个电子学读出单元分别由 4, 4, 10 根计数管并联连接并单端输出. 第一层到第六层读出单元的电子学输出增益为 0.9, 七到九层电子学输出增益是 0.4.

为研究端盖簇射计数器对电子和光子的测量性能, 需要从北京谱仪采集的正负电子对撞数据中挑选出击中端盖簇射计数器的 e^+e^- 末态事例. 与桶部簇射计数器中 e^+e^- 末态事例选取条件不同, 在小角度事例中主漂移室被击中的信号丝层数较少, 径迹在主漂移室中能被重建成功的比例较低, 动量测量误差也较大. 端盖簇射计数器几乎是唯一比较有效的小角度事例探测器, 所以挑选小角度 e^+e^- 末态事例主要依赖于端盖簇射计数器中的测量信号, 通过模拟得到的小角度 e^+e^- 末态事例选择条件为:

(1) 在桶部簇射计数器中无击中信号.

(2) 在东西两边的端盖簇射计数器中各只探测到一个簇射, 这两个簇射沉积能量之差不超过总沉积能量的一半.

(3) 每个簇射在 ESC 中总击中单元数为 41 ± 30 , 配对击中单元数是 15 ± 10 .

(4) 两个簇射必须是背对背的, 它们需满足以下条件:

$$\theta_1 + \theta_2 = \pi \pm 0.07(\text{rad});$$

$$|\phi_1 - \phi_2| = \left(\pi \pm \frac{eBL}{p \cos \theta} \right) \pm 0.09(\text{rad}),$$

其中 θ 是簇射轴与 z 轴(沿束流管方向)之间的夹角, ϕ 是簇射轴的方位角, e 是电子电量, B

是磁场强度, L 为正负电子对撞中心到端盖簇射计数器前面板的距离, p 是电子动量. 其

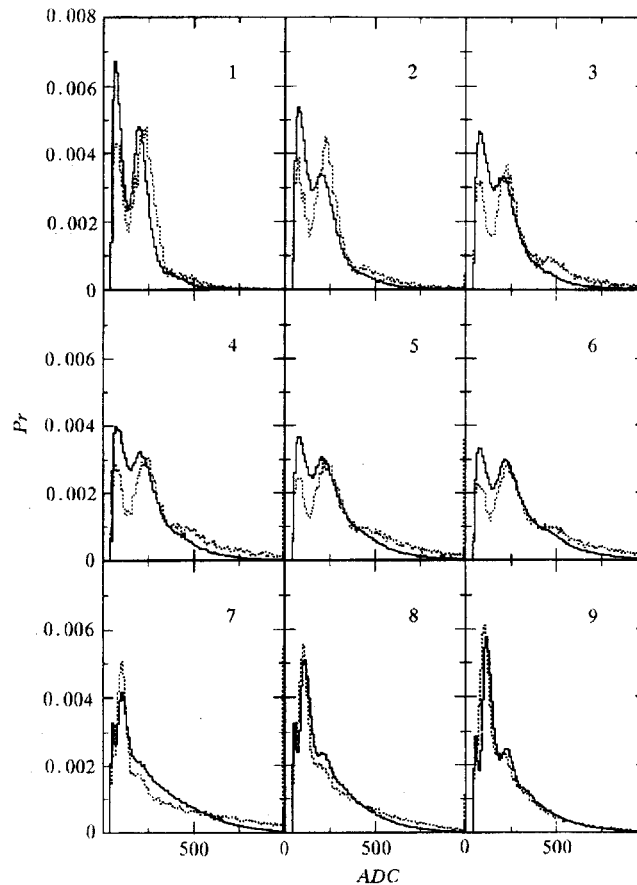


图 1 利用 ψ' 能量下的 e^+e^- 末态事例得到的端盖簇射计数器 1—9 层读出单元的输出脉冲幅度分布谱

图中实线为实验测量值; 虚线是蒙特卡罗模拟结果; 序号为电子学读出单元层号; Pr 代表几率密度; ADC 是电子学读出道数. J/ψ 和 D_s 能量下的相应分布是类似的.

中 $\frac{eBL}{pcos\theta}$ 一项是考虑正负电子在谱仪的磁场中作螺线运动引起的偏转. 将北京谱仪的参数代入后可得到:

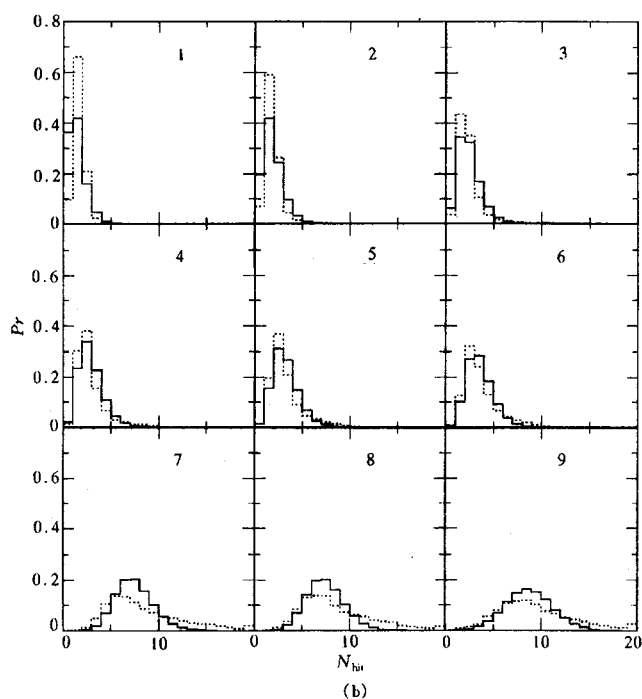
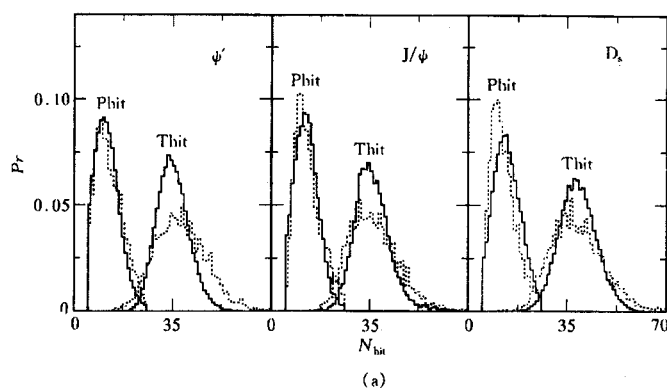


图 2 一个电磁簇射在端盖簇射计数器中总击中读出单元数分布

(a) 在 J/ψ 、 ψ' 、 D_s 能量下的 e^+e^- 末态事例的总击中数分布 (Thit) 和前 6 层配对击中数分布 (Phit);

(b) ψ' 能量下的 e^+e^- 末态事例在各读出单元层的击中数分布. J/ψ 和 D_s 能量下的相应分布是类似的.

图中实线为实验测量值; 虚线是蒙特卡罗模拟结果; 序号为电子学读出单元层号; Pr 代表几率密度;

N_{hit} 是击中数.

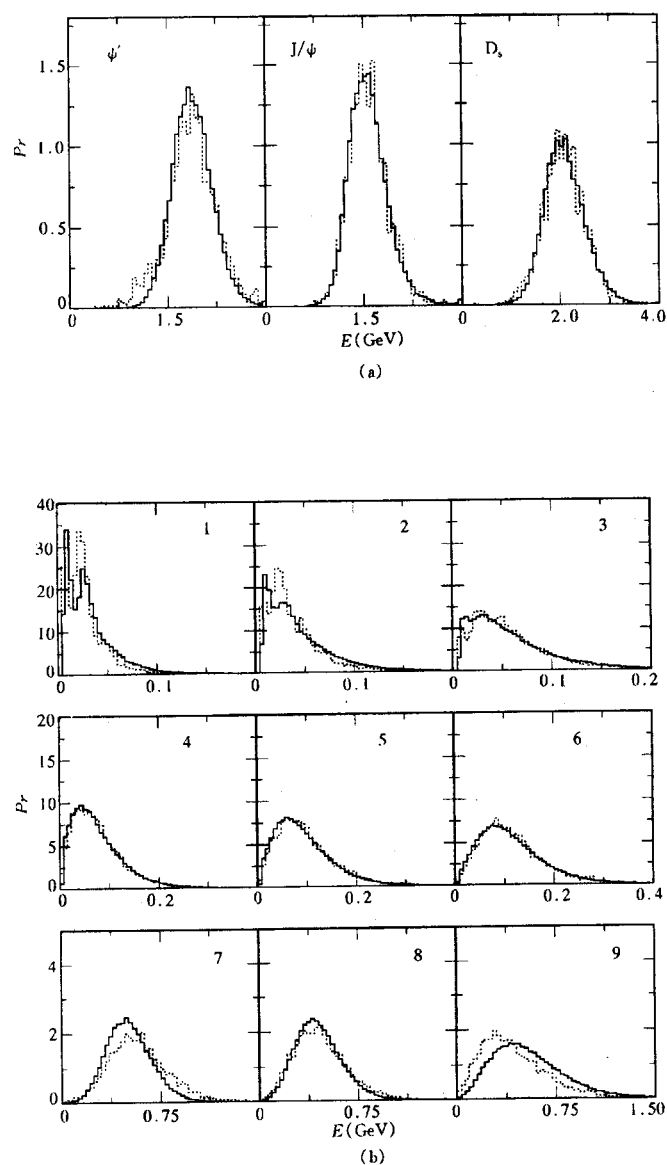


图 3 一个电磁簇射在端盖簇射计数器中的沉积能量分布

(a) 在 J/ψ 、 ψ' 、 D_s 能量下的 e^+e^- 末态事例的总沉积能量分布；(b) ψ' 能量下的 e^+e^- 末态事例在各读出单元层的沉积能量分布。 J/ψ 和 D_s 能量下的相应分布是类似的。图中实线为实验测量值；虚线是蒙特卡罗模拟结果；序号为电子学读出单元层号； Pr 代表几率密度。

$$|\phi_1 - \phi_2| = \left(\pi \pm \frac{0.1506}{\frac{E_{cm}}{2} \cos\theta} \right) \pm 0.09 \text{ (rad)},$$

式中 E_{cm} 是质心系能量。

(5) 对于能在主漂移室中重建的径迹还要求：

①在主漂移室中的击中数为 14 ± 9 ;

②横动量 = $(0.190 \pm 0.136) \times E_{\text{cm}}$.

按照上述事例判选条件从 J/ψ 数据的 RUN3621—3701、 ψ' 数据的 RUN8010—8048 和 D_s 数据 RUN5211—5562 中挑选出小角度 e^+e^- 末态事例. 利用这些数据研究了北京谱仪端盖簇射计数器的主要工作性能参数的分布谱, 包括输出脉冲幅度分布 (见图 1)、击中读出单元数分布 (见图 2) 及沉积能量分布 (见图 3), 下一节中将对这些性能及其模拟作详细的讨论.

3 端盖簇射计数器工作特性及模拟

3.1 对端盖簇射计数器模拟的原理

电子或光子进入簇射计数器后将发生电磁级联簇射, 用蒙特卡罗模拟的方法详细研究了端盖簇射计数器中所发生的这种复杂过程, 这个过程在北京谱仪的蒙特卡罗模拟软件 SOBER^[1] 中用 EGS4 软件包^[4] 来描述. 当簇射中产生的电子击中一个计数管时, 它将产生一个脉冲; 几个电子击中一个读出单元中的计数管时, 所产生的脉冲幅度是这些电子分别击中该单元中各计数管所产生的脉冲幅度之和. 对于每个簇射来说, 它沉积在端盖簇射计数器中的能量正比于在计数器中所有单元产生的脉冲幅度之和:

$$E_{\text{shower}} = A \sum_i P^i = A \sum_i \left(\sum_j P_j^i \right),$$

式中 P^i 是端盖簇射计数器第 i 个电子学读出单元的输出脉冲幅度, P_j^i 是第 i 个单元中某个计数管被第 j 个电子击中所产生的脉冲幅度, A 是脉冲幅度与沉积能量的转换系数 (约为 $0.095 \text{ MeV} / \text{道}$). 故端盖簇射计数器中簇射沉积能量与读出单元击中数和脉冲幅度分布谱有关.

3.2 单计数管脉冲幅度分布谱

由于自猝灭流光是一种饱和性的放电现象, 它的信号大小随初始电离的大小变化很小, 所以单计数管脉冲幅度与入射粒子能量的关联很小^[2]. 通过用 BES 采集的实验数据对 J/ψ 、 ψ' 、 D_s 能量下不同入射方向的电子击中各种长度的计数管所产生的脉冲幅度的研究, 看到脉冲幅度分布与计数管的长度和电子入射方向的关联随机涨落较大. 在模拟中作为一种近似, 忽略它们所引起的差别, 这时端盖簇射计数器的一个计数管被单个电子击中产生的脉冲幅度谱可以用一个双高斯分布来描述, 这个分布的参数是:

$$\mu_1 = 78, \quad \sigma_1 = 33,$$

$$\mu_2 = 235.5 - 5.188 E_{\text{rk}} + 3.048 (E_{\text{rk}})^2, \quad \sigma_2 = 58,$$

$$\frac{f_1}{f_1 + f_2} = \begin{cases} 0.4 \leq 6 \text{ 层} \\ 0.35 \geq 7 \text{ 层} \end{cases},$$

$$\text{电子线路增益} = \begin{cases} 0.9 \leq 6 \text{ 层} \\ 0.4 \geq 7 \text{ 层} \end{cases},$$

式中, μ 和 σ 分别是高斯分布的平均值和标准偏差, f 为高斯曲线下的面积, E_{uk} 为射入 ESC 的电子或光子能量, 在背对背的 e^+e^- 末态事例中, E_{uk} 接近于加速器束流能量 E_b . 在研究中注意到单计数管脉冲幅度分布中长尾部分 (见图 1) 是由于多个电子同时击中产生的, 但是还应当考虑死空间效应的影响. 在一次自猝灭流光放电所形成的死空间中, 其它粒子射入该区域将不再产生脉冲信号, 即当簇射产生的次级粒子过于密集, 使两个以上的粒子处在同一自猝灭流光放电空间内, 这时只能产生一个粒子的脉冲信号, 这就是死空间效应^[5]. 在模拟中, 取自猝灭流光放电死空间为 2.7mm. 图 1 中的虚线就是用蒙特卡罗模拟方法产生的九层电子学读出单元脉冲幅度分布谱, 其中前六层为单计数管输出, 它与 J/ψ 、 ψ' 、 D_s 能区的实验数据符合较好.

3.3 簇射的击中单元数分布

一个簇射在端盖簇射计数器中击中单元的数目与该簇射内产生的粒子总数及簇射的横向展开相关联, 所以击中单元数分布与簇射产生次级粒子的截断能量及北京谱仪的磁场强度有关. 在模拟计算中取 EGS 软件包中产生电磁级联簇射次级粒子的截断能量为 3.6MeV, 按照实验测量结果, 在北京谱仪端盖簇射计数器区域沿 z 轴方向的磁场强度是 0.4T, 在径向的磁场分量约为 10^{-2} T. 按照这些参数, 在 J/ψ 、 ψ' 、 D_s 能量下模拟得到了与实验数据基本符合的击中单元数分布 (见图 2).

3.4 用输入参数调整模拟数据能量响应

由于端盖簇射计数器的实际工作状态不是完全不变的, 实验中需要用刻度方法确定每批数据的能量响应与簇射脉冲幅度的关系. 在模拟程序中端盖簇射计数器的能量响应参数是按它的理想工作状态 (无死道和冒道) 确定的, 当将模拟数据与不同时期的实验数据进行比较时, 模拟数据中的能量响应参数需要在小范围内加以调整, 北京谱仪蒙特卡罗模拟软件 SOBER 中增加了两个新参数来实现这种功能:

$$\begin{aligned} \text{SHOWERSYS} \quad C_EESCPH \quad A \quad & \text{(对东端盖);} \\ \text{SHOWERSYS} \quad C_WESCPH \quad B \quad & \text{(对西端盖),} \end{aligned}$$

其中 A 、 B 是取值在 $[0.8, 1.2]$ 区间的实数, 它们的缺省值为 1.0. 例如对第四批 ψ' 数据, 经过刻度的端盖簇射计数器沉积能量峰值为 1.84GeV, 而考虑了死道影响的模拟数据峰值是 1.77GeV, 这时可以利用上面提供的两个 SOBER 输入参数对模拟数据的峰位进行调整, 以使它更接近实验数据:

$$\begin{aligned} \text{SHOWERSYS} \quad C_EESCPH \quad 1.04; \\ \text{SHOWERSYS} \quad C_WESCPH \quad 1.04, \end{aligned}$$

其中 $1.04 = 1 + (1.84 - 1.77) / 1.84$, 调整后的模拟数据峰值是 1.85GeV.

3.5 能量响应和能量分辨

在考虑了端盖簇射计数器中死道(失效的计数管)修正后,用 J/ψ 、 ψ' 、 D_s 能区的小角度 e^+e^- 末态事例作了簇射在端盖簇射计数器中的沉积能量分布,从图 3 可以看到,实验数据与蒙特卡罗模拟结果无论是总沉积能量分布还是在各分层沉积能量的分布都符合较好. 通过这些分布可以计算出端盖簇射计数器在不同能量下对电子的能量分辨(见表 1).

表1 北京谱仪端盖簇射计数器能量响应和能量分辨

入射能量 (GeV)		实验数据		蒙特卡罗模拟数据				
				考虑死道修正			无死道	
		沉积能量 (GeV)	能量分辨 (%/√E(GeV))	模拟能量 (GeV)	调整参数 (A=B)	能量分辨 (%/√E(GeV))	模拟能量 (GeV)	能量分辨 (%/√E(GeV))
J/ψ	1.548	1.53±0.27	21.8	1.54±0.27	1.0	21.8	1.54±0.27	21.8
ψ'	1.843	1.84±0.30	22.1	1.85±0.32	1.04	23.5	1.85±0.30	22.0
D_s	2.015	2.05±0.40	27.9	2.04±0.41	1.11	28.7	2.01±0.33	23.2

从表 1 中实验数据与模拟结果的比较可以看出,考虑了端盖簇射计数器的死道修正后,沉积能量和能量分辨的测量值与模拟值符合很好; 如果不考虑死道,则模拟的沉积能量值与入射电子能量一致,这表明沉积能量的测量值与入射电子能量值的偏差主要是由死道引起的. 从表 1 还可以看到,端盖簇射计数器中的死道对它的能量分辨有明显影响. 如果能进一步加强端盖簇射计数器的维护工作,尽量减少死道,对改善其能量分辨及能量响应都是有利的.

4 结 论

利用北京谱仪在 J/ψ 、 ψ' 、 D_s 能区采集的正负电子对撞产生的小角度 e^+e^- 末态事例数据和蒙特卡罗模拟方法研究了端盖簇射计数器的工作性能. 结果表明端盖簇射计数器的单计数管簇射脉冲幅度分布谱可以用一个双高斯分布来描述. 利用北京谱仪的蒙特卡罗程序 SOBER 模拟 e^+e^- 末态事例得到了与实验测量值相符合的结果,包括脉冲幅度分布、击中单元数分布和沉积能量分布. 在考虑了死道和冒道的影响后它的能量分辨约为 $22\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$. 本工作表明进一步减少端盖簇射计数器中的死道对提高它的能量分辨及能量响应的性能具有明显效果.

本工作得到了张长春研究员的支持,王曼,夏小米等提供了北京谱仪端盖簇射计数器的技术资料,赵萌提供了北京谱仪磁场测量资料,BES 刻度组和王萌对北京谱仪端盖簇射计数器采集的数据作了刻度工作,BES 数据组为本工作中实验数据的挑选给予了帮助,在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- [1] 丁慧良等,高能物理与核物理, 16(1992)769.

- [2] M. Atac *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth.*, **200**(1982)345.
[3] 李金等, 高能物理与核物理, **15**(1991)1.
[4] W. R. Nelson, H. Hirayama, D. W. O. Rogers; The EGS4 Code System, SLAC-265(1985)
[5] F. Bergsma *et al.*, *IEEE NS-30*, **1**(1983)122; M. Atac *et al.*, *IEEE NS-30*, **1**(1983)103; 马金源等, 高能物理与核物理, **8**(1984)142.

Energy Resolution and Its Simulation for the ESC of BES

Chen Jiangchuan Zhu Yongsheng Cheng Baosen Liu Huaimin
Zhang Dahua Wang Ping Li Canguo Huang Yinzhi Zhang Jinlong

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

Received 20 November 1996

Abstract

With data collected by the Beijing Spectrometer (BES) in the J/ψ , ψ' and D_s energy region, a lot of e^+e^- final state events are selected in the solid angle region covered by the endcap shower counters (ESC). Some characteristics of the ESC are analysed, such as the spectrum of pulse height for a single counter cell, the hit numbers in the ESC and in every reading layer of the ESC, the shower energies deposited in the ESC and in every layer of the ESC. The energy resolution of the ESC is obtained to be about $22\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$. Based on the original frame of SOBER, a Monte Carlo simulation program for the ESC is developed with a dual Gaussian pulse height spectrum of the single counter cell. The electromagnetic cascades are calculated by the EGS4 package and a three-dimension magnetic field in the BES is included. The simulation results agree with experimental data well.

Key words Beijing Spectrometer, self-quenching streamers, gas sampling shower counter, Monte-Carlo simulation, energy resolution.