

粒子鉴别中 dE/dx 和 TOF 的权重*

秦虎^{1,2} 董燎原² 沈肖雁² 金山² 罗成林¹

1 (南京师范大学物理科学与技术学院 南京 210097)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 在北京谱仪数据分析中,粒子鉴别使用了 dE/dx 和 TOF 的信息. 在利用 dE/dx 和 TOF 联合鉴别粒子时,通常的做法是把两者的 χ^2 值等权重相加(χ^2 方法). 在不同的动量区间, dE/dx 和 TOF 对粒子的鉴别能力不同. 本文给出两者联合鉴别时不同动量区间的权重,并构造一个新的线性变量来进行粒子鉴别.

关键词 北京谱仪 dE/dx TOF 权重 粒子鉴别

1 引言

在 高能物理实验中,通常直接测量的对象是各种反应末态粒子,如 e, μ, π, k, p 以及 γ 光子等,这需要在物理分析中对它们作出鉴别. 北京谱仪(BES)^[1]中,对带电粒子鉴别采用了主漂移室(MDC)的 dE/dx 以及飞行时间计数器(TOF)的信息.

对于主漂移室(MDC):对带电粒子鉴别起重要作用的一个物理量是主漂移室(MDC)里的 dE/dx 测量,这里 dE/dx 指的是带电粒子在 MDC 工作气体中的单位距离内电离能量损失. 定义变量

$$\chi_{dE/dx}(i) = \frac{\frac{dE}{dx}_{\text{meas}} - \frac{dE}{dx}_{\text{exp}}(i)}{\sigma_{dE/dx}}, i = e, \mu, \pi, K, p, \quad (1)$$

式中 $\frac{dE}{dx}_{\text{meas}}$ 是带电粒子电离能量损失测量值, $\frac{dE}{dx}_{\text{exp}}(i)$ 是假定该径迹为种类 i 的粒子时的预期值. 如果假设的粒子种类 i 与实际径迹一致,则 $\chi_{dE/dx}(i)$ 大体服从正态分布, $\chi_{dE/dx}(i)$ 值合理的小;若 i 与实际径迹不一致,则 $\chi_{dE/dx}(i)$ 就比较大. 故可从 $\chi_{dE/dx}(i)$ 的值判定径迹的粒子种类.

对于飞行时间计数器(TOF): TOF 测量的是带电粒子的击中点位置和它从 e^+e^- 对撞点飞行到该击中点的时间 t . 定义变量^[2,3]

$$\chi_{\text{TOF}}(i) = \frac{t_{\text{meas}} - t_{\text{exp}}(i)}{\sigma_t}, i = e, \mu, \pi, K, p, \quad (2)$$

式中 t_{meas} 是 TOF 对某个粒子径迹从对撞点到击中 TOF 的飞行时间测量值, $t_{\text{exp}}(i)$ 是假定该径迹为种类 i 的粒子时的飞行时间预期值. 如果假设的粒子种类 i 与实际径迹一致,则 $\chi_{\text{TOF}}(i)$ 大体服从正态分布, $\chi_{\text{TOF}}(i)$ 值合理的小;若 i 与实际径迹不一致,则 $\chi_{\text{TOF}}(i)$ 就比较大. 故可从 $\chi_{\text{TOF}}(i)$ 的值判定径迹的粒子种类.

目前, BES 建立了将 dE/dx 和 TOF 的信息联合使用的 χ^2 方法,对某一粒子,计算它的 χ^2 值,即

$$\chi^2(i) = \chi_{\text{TOF}}^2(i) + \chi_{dE/dx}^2(i) = \left(\frac{t_{\text{meas}} - t_{\text{exp}}(i)}{\sigma_t} \right)^2 + \left(\frac{\frac{dE}{dx}_{\text{meas}} - \frac{dE}{dx}_{\text{exp}}(i)}{\sigma_{dE/dx}} \right)^2, \quad (3)$$

$i = e, \mu, \pi, K, p,$

同样,可以根据 χ^2 值的大小来判定径迹的粒子种类. 但这种方法认为 dE/dx 和 TOF 鉴别粒子的能

2003-09-28 收稿, 2004-03-01 收修改稿

* 国家自然科学基金(19991480)科学院知识创新工程项目(U-602)资助

力是相同的,因此两项系数都置为了 1,也就是认为 dE/dx 和 TOF 的权重是相同的.

实际上 dE/dx 和 TOF 对粒子的鉴别能力都是动量依赖的,而且在不同的动量区间两者相对鉴别的能力也不同,因此,将两变量平权相加可能不是最优的.事实上,对于多个变量的联合鉴别,可以用多种方法将变量进行组合,例如:最大似然法(Likelihood)、线性甄别分析法(Linear Discriminant

Analysis)^[4]、神经网络法(Neural Network)^[5].由于线性甄别法和神经网络法都要用到专门的软件进行优化,其物理意义不是很直观,所以在本文中尝试了一种采用不同于以上 χ^2 的简单方法,构造一个线性变量在不同动量区间对 dE/dx 和 TOF 加以不同的权重.本文将找出同一动量下 dE/dx 和 TOF 粒子鉴别的权重系数,并考察该变量是否能更好地鉴别粒子.

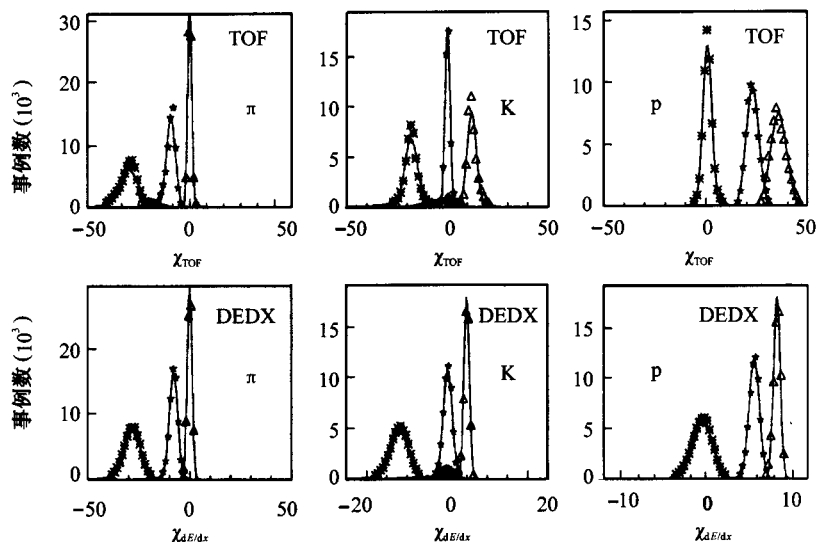


图 1 动量为 400MeV 的 χ 分布

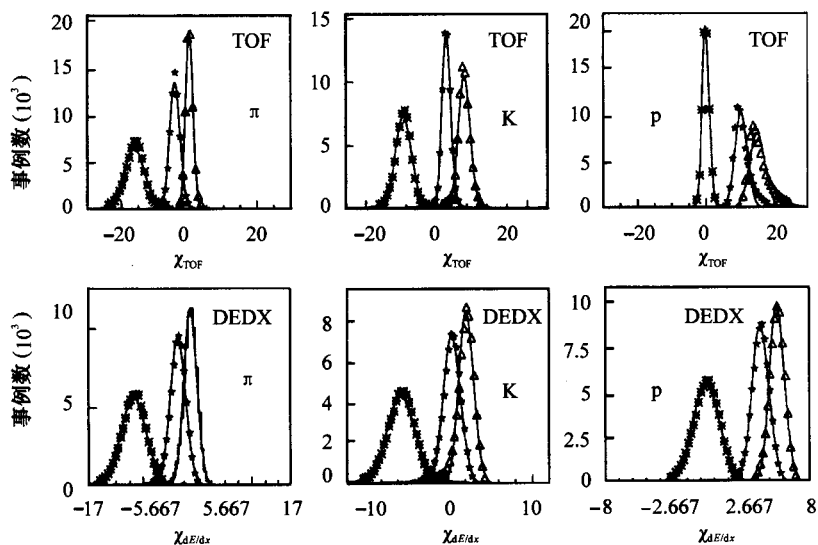
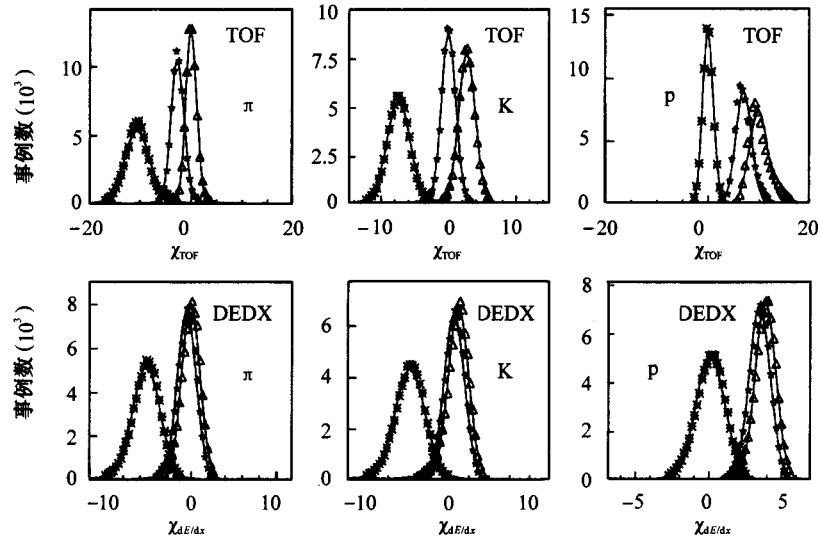
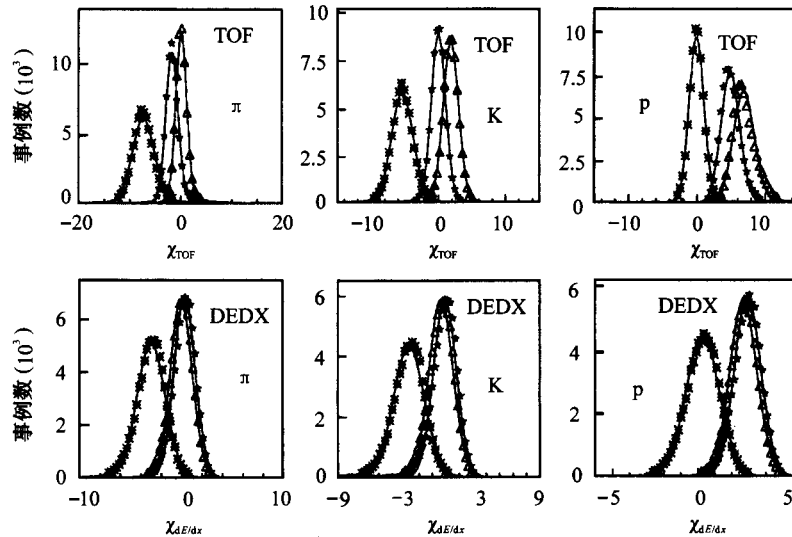


图 2 动量为 700MeV 的 χ 分布

图 3 动量为 900MeV 的 χ 分布图 4 动量为 1100MeV 的 χ 分布

2 Monte Carlo 事例的产生

用单径迹 Monte-Carlo 产生子 tester, 从 200—1200 MeV 每隔 100MeV 产生一个单动量 π , K, p 的 Monte Carlo 样本.

对于同一动量点, 同一样本, 可以假定它为 π , K, p 3 种情况, 得到 $\chi_{\text{TOF}}(\pi)$, $\chi_{\text{TOF}}(K)$, $\chi_{\text{TOF}}(p)$, 以及 $\chi_{dE/dx}(\pi)$, $\chi_{dE/dx}(K)$, $\chi_{dE/dx}(p)$, 分布(这里仅给出了 400MeV, 700MeV, 900MeV, 1100MeV 的情况). 图 1 到图 4 中, 左边一列为 π 样本的 χ 分布; 中间一列为 K 样本的 χ 分布; 右边一列为 p 样本的 χ 分布. 图中用 \triangle 表示 π , 用 \star 表示 K, 用 $*$ 表示 p.

曲线为高斯拟合结果.

由图 1 到图 4 可以看出, 随着动量的增加 dE/dx 和 TOF 粒子鉴别的能力逐渐减小. 特别是对于 dE/dx , 当动量达到 1000MeV 时, π 和 K 的 χ 分布几乎完全重合, 此时利用 dE/dx 信息无法区分这两种粒子; 大于 1000MeV 后, π 和 K 的 χ 分布位置交换.

3 权重的计算

对 χ 分布做高斯拟合, 得到 χ 分布的中心值, 计算 TOF 和 dE/dx 的 χ 分布中心值之间的距离, 结果如表 1, 2 所示.

对于同一动量, $\chi(\pi)$ 与 $\chi(K)$ 中心值之间的距离 $\overline{\chi(\pi) - \chi(K)} \equiv \overline{\pi K}$, 从 π 样本和从 K 样本得到的

值是有区别的. $\overline{\pi p}$ 和 \overline{Kp} 情况类似. 因此, 对不同样本的中心值距离做了平均, 如表 3 所示.

表 1 TOF χ 分布中心值间的距离

动量/MeV	$\chi_{TOF}(\pi) - \chi_{TOF}(K)$		$\chi_{TOF}(\pi) - \chi_{TOF}(p)$		$\chi_{TOF}(K) - \chi_{TOF}(p)$	
	π 样本	K 样本	π 样本	p 样本	K 样本	p 样本
400	11.0654	12.0258	36.0154	34.7099	18.1142	22.0099
500	7.69248	8.2611	26.7945	25.4324	15.6069	16.6024
600	5.61013	5.95491	20.5751	19.1593	12.9111	12.8393
700	4.27249	4.41797	16.1735	15.0411	10.678	10.3211
800	3.34945	3.40362	12.9985	12.1013	8.87038	8.42934
900	2.69196	2.71509	10.654	9.87372	7.43791	6.97272
1000	2.2031	2.2086	8.8491	8.20588	6.2884	5.83388
1100	1.8381	1.83976	7.4711	6.91578	5.37524	4.94678
1200	1.5565	1.56078	6.4115	5.89926	4.64622	4.23926

表 2 dE/dx χ 分布中心值间的距离

动量/MeV	$\chi_{dE/dx}(\pi) - \chi_{dE/dx}(K)$		$\chi_{dE/dx}(\pi) - \chi_{dE/dx}(p)$		$\chi_{dE/dx}(K) - \chi_{dE/dx}(p)$	
	π 样本	K 样本	π 样本	p 样本	K 样本	p 样本
400	7.90277	4.77456	28.2788	8.8112	12.0564	7.1602
500	4.90397	3.4435	18.838	7.7529	9.7725	5.6989
600	3.21734	2.5131	13.0903	6.6112	7.7309	4.9572
700	2.08692	1.7197	9.47992	5.5496	6.0693	4.2526
800	1.16422	0.9984	7.04222	4.62438	5.1406	3.78938
900	0.48747	0.4245	5.15507	3.7765	4.3791	3.3755
1000	0.00159	-0.00940001	3.94681	3.0373	3.7439	2.9983
1100	-0.35328	-0.3496	2.94882	2.3985	3.2152	2.6555
1200	-0.61993	-0.61372	2.16427	1.8318	2.7638	2.3368

表 3 χ 分布中心值间距离的平均值

动量/MeV	TOF			dE/dx		
	$\overline{\pi K}$	$\overline{\pi p}$	\overline{Kp}	$\overline{\pi K}$	$\overline{\pi p}$	\overline{Kp}
400	11.5456	20.062	35.3626	6.33867	9.6083	18.545
500	7.97679	16.1047	26.1134	4.17373	7.7357	13.2955
600	5.78252	12.8752	19.8672	2.86522	6.34405	9.85075
700	4.34523	10.4995	15.6073	2.29445	5.16095	7.51476
800	3.37644	8.64986	12.5499	1.08131	4.46499	5.8333
900	2.70353	7.20532	10.2639	0.455985	3.8773	4.51579
1000	2.20585	6.06114	8.5249	-0.00390501	3.3711	3.49205
1100	1.83893	5.16101	7.19344	-0.35144	2.93535	2.67366
1200	1.55864	4.44274	6.15538	-0.616825	2.5503	1.99803

由此得到联合鉴别时 dE/dx 和 TOF 的权重因子, 见表 4.

表 4 权重因子 (coefficient), 其中 a 为 TOF 的中心值距离, b 为 dE/dx 的中心值距离

动量/MeV	π/K		K/p		π/p	
	$\omega_1 = \frac{a}{a+b}$	$1 - \omega_1$	$\omega_2 = \frac{a}{a+b}$	$1 - \omega_2$	$\omega_3 = \frac{a}{a+b}$	$1 - \omega_3$
400	0.645572	0.354428	0.676164	0.323836	0.655985	0.344015
500	0.656499	0.343501	0.675521	0.324479	0.662627	0.337373
600	0.668674	0.331326	0.669913	0.330087	0.668524	0.331476
700	0.654434	0.345566	0.670449	0.329551	0.674995	0.325005
800	0.757442	0.242558	0.659545	0.340455	0.682683	0.317317
900	0.854633	0.145367	0.650147	0.349853	0.694459	0.305541
1000	1.00178	-0.00178003	0.642598	0.357402	0.709471	0.290529
1100	1.23626	-0.23626	0.637448	0.362552	0.729033	0.270967
1200	0.65493	-0.65493	0.635309	0.364691	0.754945	0.245055

由上面表格中的权重因子, 可以定义一个新的变量 V , 得到 3 套公式:

$$(V_i)_{\pi/K} = \omega_1 \chi_{\text{TOF}}^2(i) + (1 - \omega_1) \chi_{dE/dx}^2(i), i = \pi, K, \quad (4)$$

$$(V_i)_{K/p} = \omega_2 \chi_{\text{TOF}}^2(i) + (1 - \omega_2) \chi_{dE/dx}^2(i), i = K, p \quad (5)$$

$$(V_i)_{\pi/p} = \omega_3 \chi_{\text{TOF}}^2(i) + (1 - \omega_3) \chi_{dE/dx}^2(i), i = \pi, p, \quad (6)$$

当鉴别一个粒子为 π 时, 要求: $(V_\pi)_{\pi/p} < (V_p)_{\pi/p}$, 且 $(V_\pi)_{\pi/K} < (V_K)_{\pi/K}$; 当鉴别一个粒子为 K 时, 要求: $(V_K)_{K/p} < (V_p)_{K/p}$, 且 $(V_K)_{\pi/K} < (V_\pi)_{\pi/K}$; 当鉴别一个粒子为 p 时, 要求: $(V_p)_{\pi/p} < (V_\pi)_{\pi/p}$, 且 $(V_p)_{K/p} < (V_K)_{K/p}$.

4 鉴别效率的比较

利用构造的新变量 V 对 MC 样本进行挑选, 对于 π, K, p 样本, 粒子鉴别的效率及误判如图 5. 图中, ※表示采用新方法作粒子鉴别的效率; ○表示采用 1.3 的方法作粒子鉴别的效率; ★表示采用新方法作粒子鉴别的误判率; □表示采用 1.3 的方法作粒子鉴别的误判率.

由图 5 可以看出: 随着动量的增加, π, K 的鉴别效率逐渐降低. 对于 K 粒子, 在低动量区域, 两种方法得到的效率相同; 但在高动量区域, 本文的方法对 K 粒子鉴别效率得到了改善, 误判率降低. 因为 p 与 π, K 的 χ 分布区别比较大, 所以 p 误判为 π, K 的可能性很小.

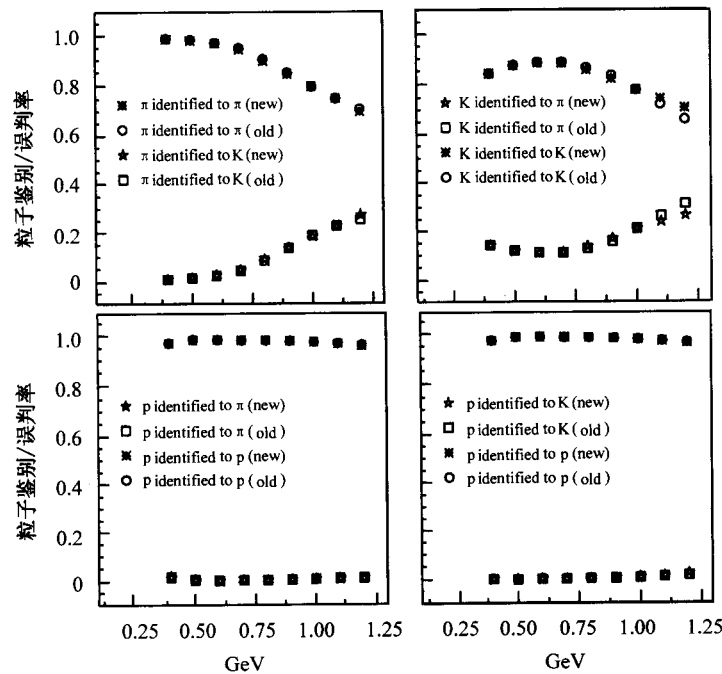


图 5 两种方法粒子鉴别效率的比较

5 结论

本文利用粒子的 χ 分布中心值的距离作为 dE/dx 和 TOF 的相对权重构造一个简单线性变量来做粒子鉴别. 在低动量区域, 本文的方法与通常

的 χ^2 方法得到的效率相同; 而在高动量区域, 该方法对 K 的鉴别效率得到了改善, 误判率也有所降低. 研究表明 χ^2 方法不是惟一的方法, 也不是最优的方法. 为了得到更好的粒子鉴别结果, 我们以后可以尝试使用神经网络方法以求得到更好的结果.

参考文献 (References)

- 1 BAI J Z et al (BES Collaboration). Nucl. Instrum. Methods, 2001 **A 458**:627
- 2 PENG Hai-Ping et al. HEP & NP, 2002, **26**:1078—1086 (in Chinese)
- 3 PENG Hai-Ping et al. HEP & NP, 2002, **26**:861—869 (in Chinese)
- 4 Barate R et al (ALEPH Collaboratory). Phys. Lett., 2000, **B 487**:253
- 5 Barate R et al (ACEPH Collaboratory). Phys. Lett., 2001, **B 499**:53

Weight of dE/dx and TOF in Particle Identification *

QIN Hu^{1,2} DONG Liao-Yuan² SHEN Xiao-Yan² JIN Shan² LUO Cheng-Lin¹

1 (School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

2 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract In the analysis of Beijing Spectrometer (BES) data, the dE/dx and TOF information have been used in the particle identification. When combining the dE/dx and TOF information to do the particle identification, the χ^2 of dE/dx and TOF are usually added with equal weight. But the particle identification capability of dE/dx and TOF is different in different momentum region. In this paper, we give the weights of dE/dx and TOF in different momentum region and form a new variable which uses different weights for dE/dx and TOF informations to do the particle identification.

Key words Beijing spectrometer (BES), dE/dx , TOF, particle identification