

闪烁光纤特性测试*

迟少鹏 夏小米 周莉 王曼 赖元芬 吕军光

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 介绍了一套进行单根塑料闪烁光纤测量的实验装置,给出由这套装置获得闪烁光纤的光产额、衰减长度、时间分辨和位置分辨的实验方法和测量结果,并对两种不同厂家的光纤进行了比较.

关键词 闪烁光纤 光产额 衰减长度 时间分辨 位置分辨

1 引言

闪烁光纤具有探测效率高、响应时间快的特点,此外它还具有探测单元粒度小、可塑性强、易于制成密闭性好的探测器的突出优点,在高能物理实验、核物理实验、核医学仪器等方面都有很强的应用潜力.近年来,闪烁光纤的种类和特性有了很大发展和提高.同时,由于对光电器件——气体光探测器、多阳极光电倍增管(PM)、微通道板型倍增管(MCP)、光二极管(PD)、雪崩光二极管(APD)、混合光探测器(HPD)等的研究和发展,光探测器在探测效率、单光子灵敏度、定位精度、信/噪比、时间响应、长期稳定性等方面都有很大提高^[1-3],价格也达到了可实用的水平.这些都使得闪烁光纤探测器在粒子物理实验中得到广泛应用.例如:带电粒子径迹测量、有源靶(active target)、量能器、飞行时间系统等^[4,5].

闪烁光纤由核心部分(芯层)和表面涂层(包层)两部分组成.根据不同用途,核心部分的材料有所不同.例如:芯层可以是闪烁体的闪烁光纤,也可以是透明的用作光导的透明光纤.包层通常由不具闪烁特性的折射率比芯层低的高效反射面构成.

闪烁光在光纤中的传播由图 1 来描述.

只有在芯层和包层界面上发生全反射的闪烁光才能在闪烁光纤中传播,这只占芯层所产生的闪烁光的很小的一部分.以塑料闪烁光纤为例^[6],芯层的折射率 $n_1 \sim 1.59$,包层的折射率 $n_2 \sim 1.49$,只有约 3.4% 的闪烁光能单方向沿光纤传播.当然,穿

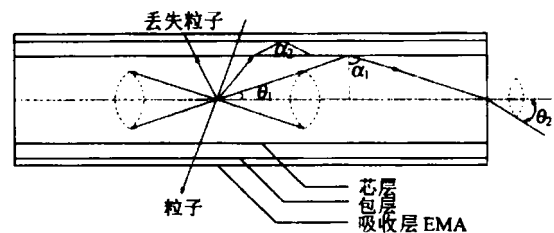


图 1 闪烁光纤光收集的原理示意图

过包层的光还有一部分能在包层和空气界面上因发生全反射而重新进入芯层沿光纤传播,但由于包层对闪烁光的吸收率很高,这部分光的比例极少,对整个光纤的传播效率几乎没有影响.光纤的包层可以是单层的、双层的和新近发展起来的多层的^[7],它们的折射率由内到外依次递减,这等效的扩大了闪烁光的全反射角,增加了闪烁光在光纤内可传播的立体角,提高了光纤的衰减长度,在一定程度上提高了光纤的传播效率.但是光纤的传播效率仍然很低,在考虑闪烁光纤的应用设计时要特别注意这一点.

在设计闪烁光纤探测器时,光纤的主要参数有:光的产额、衰减长度、光的发射和传输时间特性、抗辐照能力等.北京谱仪^[8]改进的候选方案之一拟采用闪烁光纤和铅组成的取样量能器作为电磁量能器,使能量分辨率达到 $\sim 6\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$ 的水平.作为电磁量能器升级的预制研究,对美国 Bicon-BCF10 和日本 Kuraray-SCSF81 两种闪烁光纤的性能进行了研究和测试.本文介绍闪烁光纤特性的测量方法以及测量结果.

2002-07-25 收稿

* 国家自然科学基金重大项目(19991480),中国科学院重大及特别支持项目(KJ95T-03)资助

2 实验装置

闪烁光纤-铅量能器的信号从光纤两端读出,入射粒子的能量和位置信息分别由读出信号的幅度(电荷)和时间信息给出.为了模拟量能器的真实情况,并且尽可能的减少本底噪声,我们采用了如图 2 的实验装置.待测光纤直径为 1mm,长度为 4m.为提高光子的接收效率,光纤两端进行了仔细的切削和抛磨,分别与两个光电倍增管进行光学耦合,光纤信号由两端读出.用两层直径 1mm 的光纤组成一个闪烁探测器,放在所测光纤下方(与待测光纤垂直)作为触发计数器.用两个光电倍增管的符合信号作为一个触发信号以降低本底噪音.放射源⁹⁰Sr(β 源)用一个沿光纤方向放置的 1mm 宽 3mm 长的狭缝准直.这样,只有沿狭缝穿过待测光纤并被触发计数器所探测到的 β 粒子才能判为好事例.

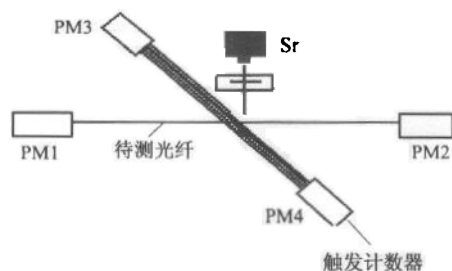


图 2 实验装置示意图

图 2 中待测光纤两端的光电倍增管 PM1 和 PM2 选用 Philips XP-2020. 它们的输出信号分别为 Fib1 和 Fib2. 触发计数器 PM3 和 PM4 输出信号为 Trig1 和 Trig2. 图 3 为触发和读出系统电子学框图.

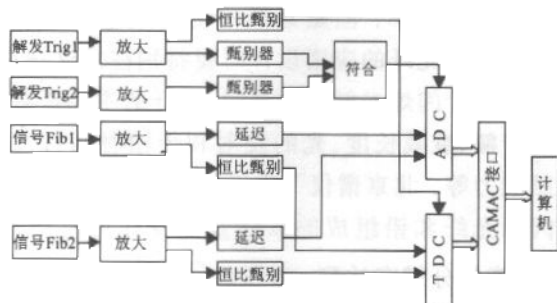


图 3 读出系统电子学框图

与通常分别测量幅度(电荷量)或时间特性不同,这套系统立足于记录每个好事例的全部信息,在本实验中为光纤两端输出信号的幅度信息(q_1, q_2)和时间信息(t_1, t_2),共 4 个物理量.最后用 PAW-

Ntuple^[9]对每个事例的数据进行分析和统计.这个系统包括电荷测量和时间测量两个数据通道.电荷测量通道:闪烁光纤两端的输出信号 Fib1, Fib2 经放大、延迟,分别送入 ADC 进行测量.触发计数器的两个信号 Trig1, Trig2 经过放大、甄别,进行二重符合后作为好事例判选信号——ADC 的开门信号.时间测量通道:两个触发信号中的一个如 Trig1 经过放大再经过恒比定时甄别作为 TDC 的公共起始信号(Start).闪烁光纤两端的输出信号 Fib1 和 Fib2 经放大后再经过恒比定时甄别器(CFD),分别送入 TDC 作为停止信号(Stop).ADC 和 TDC 的信息经过 CAMAC 接口连接到微机进行分析.这样,这套测量装置可同时获取每个事例的时间信息(T)和幅度信息(Q).

3 测量方法和结果分析

3.1 实验方法

本实验的任务之一是测量闪烁光纤的发光产额.预期的产额只是约 10 个光子的量级,测量如此微弱的光,要求测量的仪器和方法必须是具有单光子灵敏和能区分单个光子信号.为达到此要求,需对测量的设备、部件进行仔细的设计和挑选.

首先是光电倍增管,选用直线聚焦型的光电倍增管 XP2020,此管除有聚焦极外还有双加速极,挑选放大倍数大、噪声小的管子,调整工作电压,使得光放大倍数可达约 5×10^7 .精心设计分压器线路,在光阴极和第一打拿极之间采用较高的电压,使光阴极发射的光电子得到较强的聚焦和加速,在第一打拿极上可产生更多的次级电子,以达到光阴极发射的光电子产生的信号比光直接进入第一打拿极产生的或是热激发本底信号有较大的比例,可以观察到明显的单光电子峰.

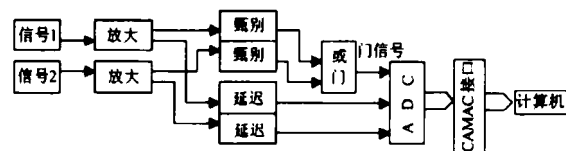


图 4 筛选倍增管所用的电子学系统的示意图

采用图 4 的线路安排光电倍增管的挑选工作,经仔细调整后,在光电倍增管完全蔽光的条件下,测到光电倍增管的噪声谱(图 5(a)).此噪声可以认为主要是光阴极和第一打拿极的热噪声谱.在噪声谱

中有一个峰,即是光阴极的热激发电子在测量一次信号的极短时间内(10ns),从几率上是以单电子发射的.以观察单电子峰的清晰程度挑选光电倍增管,在几十支光电倍增管中,选择单电子峰最为明显的两支光电倍增管,并且调试不同的工作电压使得两支光电倍增管的单电子峰位相近.

为了证实光电倍增管噪声的分布确实是单电子的信号,采用图 3 布局的装置在相同的工作高压下将两只管子耦合到一根长 4cm、直径 1mm 的闪烁光纤上,一端用硅油耦合,另一端用空气耦合,光电倍增管窗口距光纤端面 1.5cm,将 β 放射源置于离空气耦合端 3m 的地方照射闪烁光纤,此时认为空气耦合的光电管接收到的光子数已弱到单光子的水平.观察测量到的空气耦合端的光电倍增管信号,其分布(图 5(b))与之前测量到的屏蔽光的噪声谱很相似,只是峰前端连续分布的噪声减少,峰位计数比例增大.单光电子峰位与单电子噪声峰基本重合,因而证实了此峰为单电子峰.

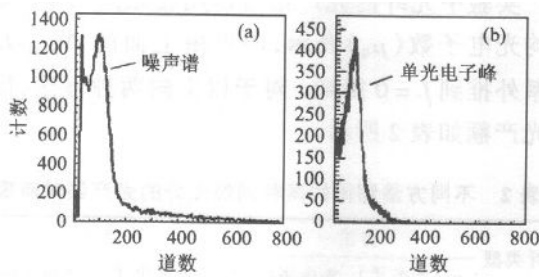


图 5

(a) 光电倍增管的噪声谱; (b) XP-2020 光电倍增管的单光电子谱.

在此工作高压条件下,两端的光电倍增管都用硅油耦合,移动 β 源和触发装置的位置,测量到输出不同大小的脉冲分布谱(图 6),可以明显看到第一、第二、第三峰位的突起,分别对应着单、双、叁个电子的脉冲分布.

对每根光纤在离倍增管光阴极不同距离的 14—21 个实验点进行了电荷谱测量.

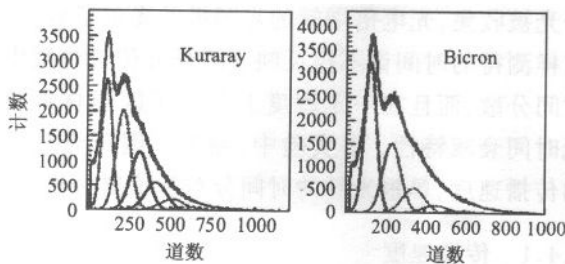


图 6 两种光纤的拟合过的能谱曲线

3.2 衰减长度测量

对于闪烁光纤,测到的平均光电子数 N_{mean} 与光子的传输距离的关系是两种成分指数衰减的叠加^[10,11].

$$N_{mean} = A_1 \exp(-L/\lambda_1) + A_2 \exp(-L/\lambda_2) + N_0.$$

其中 L 为放射源到光电倍增管光阴极的距离, λ_1, λ_2 分别是光纤“芯层”和“包层”中光的衰减长度^[12], A_1, A_2 为这两种光的幅度, N_0 为噪音本底.将 $N_{mean}-L$ 的实验曲线与上述指数衰减关系式拟合,即可得到衰减长度 λ_1, λ_2 的值.

确定 N_{mean} 的值采用了两种方法:

第一种方法:对每个实验点测得的电荷谱,用下式求出它的平均电荷量所对应的 ADC 道数.

$$\overline{ADC} = \frac{\sum_i C_i N_i}{\sum_i C_i} - N_{ped}.$$

式中 C_i 是在第 N_i 道 ADC 的计数, N_{ped} 是 ADC 台阶的道数.

平均光电子数 N_{mean} 就可以表示为

$$N_{mean} = \overline{ADC} / \Delta.$$

其中 Δ 为单个光电子的峰的道数,约为 98 道.对于两种光纤取了 14 个测量点的 Q 所对应的 ADC 道数,作出拟合图 7,并求出衰减长度 λ_1 和 λ_2 .

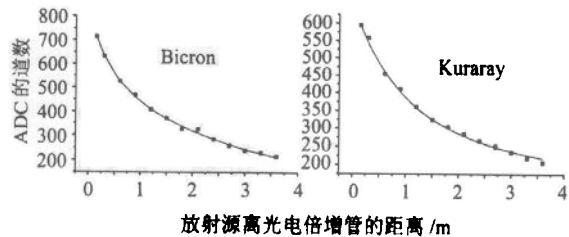


图 7 两种光纤的 ADC 道数与距离的拟合曲线

第二种方法:对电荷谱进行分析,通过拟合的方法得到平均光电子数.在实际测量中,光电倍增管收集到的光电子数满足泊松分布^[13],

$$P(n; \mu) = \mu^n e^{-\mu} / n!.$$

式中 μ 为平均光电子数, $P(n; \mu)$ 为平均光电子数为 μ 时收集到 n 个光电子的几率.考虑到光电倍增管的打拿极系统接受 n 个光电子的放大系数 G_n 为高斯分布^[13],即有

$$G_n(x) = 1/(\sigma_1 \sqrt{2\pi n}) \exp(-(x - nQ_1)^2 / 2n\sigma_1^2).$$

x 为电荷变量, Q_1 为当一个电子被打拿极系统收集时倍增管所产生的平均电荷, σ_1 为相应的电荷分布

的标准偏差. 再考虑到实际的光电倍增管的本底噪声影响, 这包括台阶(主要由漏电流贡献)的影响和主要是由热发射和测量过程中的离散噪声的影响. 台阶影响可以表示为一个高斯分布, 离散噪声的影响可表示为指数分布. 总的本底噪声表示为^[13]

$$B(x) = (1-w)/(\sigma_0 \sqrt{2\pi}) \exp(-x^2/2\sigma_0^2) + w\theta(x)\alpha \exp(-\alpha x).$$

σ_0 为台阶分布的标准偏差, w 为第二种本底占总本底的比例, α 为指数衰减系数, $\theta(x)$ 为阶跃函数. 综合考虑以上因素的影响, 实际倍增管输出电荷谱应为理想电荷谱与本底电荷分布的卷积. 由此可以得到光电子数分布的总的拟合公式^[13] 为

$$S_{\text{real}}(x) = \int S_{\text{ideal}}(x') B(x-x') dx' = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!} \times [(1-w) G_n(x-Q_0) + w I_{C_n \otimes \varepsilon}(x-Q_0)]$$

$$I_{C_n \otimes \varepsilon}(x-Q_0) = \int_{Q_0}^x G_n(x'-Q_0) \alpha \exp[-\alpha(x-x')] dx' = \frac{\alpha}{2} \exp[-\alpha(x-Q_n-\sigma_n^2)] \times \left[\operatorname{erf}\left(\frac{|Q_0-Q_n-\sigma_n^2\alpha|}{\sigma_n\sqrt{2}}\right) + \operatorname{sign}(x-Q_n-\sigma_n^2\alpha) \times \operatorname{erf}\left(\frac{|x-Q_n-\sigma_n^2\alpha|}{\sigma_n\sqrt{2}}\right) \right]$$

$$Q_n = Q_0 + nQ_1,$$

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_0^2 + n\sigma_1^2} \approx \begin{cases} \sigma_0 & n=0 \\ \sqrt{n}\sigma_1 & n>0 \end{cases}$$

式中 Q_0 是台阶的峰位, σ_0 为台阶分布的标准偏差; $G_n(x)$ 是理想光电倍增管对 n 个光电子的电荷分布, σ_n 是 $G_n(x)$ 分布的标准偏差; $\operatorname{erf}(x)$ 是误差函数. 采用 CERN 库中的 Minuit 程序包^[14] 进行拟合, 取 $Q_0, \sigma_0, Q_1, \sigma_1, \alpha, w, \mu$ 和总计数 tot 8 个参数作为待定参数进行拟合. 由于台阶计数率太高, 影响了拟合质量, 把台阶去掉进行拟合. 图 6 给出两种光纤的拟合过的能谱曲线. 每个能谱中的下面的峰(虚线)从左往右分别是 1 个、2 个、3 个、4 个……光电子的测量几率谱.

通过拟合, 得到光纤的平均光电子数 N_{mean} , 再拟合 $N_{\text{mean}}-L$ 的曲线得到衰减长度. 拟合图如图 8.

表 1 给出两种方法的衰减长度的结果和厂家给的衰减长度参数. 我们的实验结果基本与厂家的参

数相符.

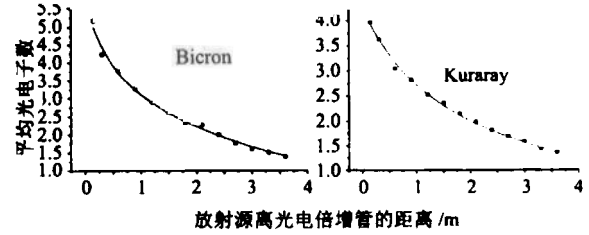


图 8 两种光纤的平均光电子数与距离的拟合曲线

表 1 不同方法测得的两种闪烁光纤的衰减长度与厂家参数对照表

| 光纤类型 | 方法一 | | 方法二 | | 厂家参数 |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| | λ_1/m | λ_2/m | λ_1/m | λ_2/m | |
| Kuraray | 0.79 | 4.13 | 0.71 | 3.74 | > 3.5 |
| Bicon | 0.35 | 2.42 | 0.38 | 3.09 | > 2.2 |

3.3 光产额

实验中光纤的光产额可以用在距离 $L=0$ 处的平均光电子数 (μ_0) 表示, 即可由上面的 $N_{\text{mean}}-L$ 的关系外推到 $L=0$ 得到. 对于以上的两种方法, 得到的光产额如表 2 所示.

表 2 不同方法测得的两种闪烁光纤的光产额对照表

| 光纤类型 | 方法一 | | 方法二 | |
|---------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|
| | μ_0 (光电子) | 光电子/mm ² | μ_0 (光电子) | 光电子/mm ² |
| Kuraray | 5.1 | 6.5 | 4.5 | 5.7 |
| Bicon | 6.1 | 7.8 | 5.7 | 7.3 |

为了便于比较, 通常把光产额折合成最小电离粒子穿过 1mm 光纤物质所产生的平均光电子数. 本实验中, 光纤与放射源之间有 1mm 的准直狭缝, β 粒子均匀穿透直径 1mm 光纤的平均穿越距离为 0.7854mm, 所以每毫米的光纤的光产额要用实验数据除以这一系数.

3.4 时间特性

闪烁光纤光收集角很小, 光程短且涨落少, 因此具有很小的传播时间涨落. 同时, 由于只有一小部分光被收集, 光电倍增管的光阴极的光电子数较少, 这样测得的时间谱不仅反映了闪烁光传输过程中的时间分散, 而且在一定程度上包含了闪烁材料的荧光时间衰减特性. 本实验中, 测量了闪烁光纤中光的传播速度, 单根光纤的时间分辨和位置分辨.

3.4.1 传播速度

光纤两端读出信号的时间差 ΔT 与放射源距两

端 PM 光阴极的距离差 ΔL 存在线性关系, 即有

$$\Delta T = \Delta L / V \quad (2)$$

对于本实验来说, 因为用的是 4m 长的光纤, 所以 $\Delta L = 4 - 2Z$, Z 为放射源位置距一端的距离, 拟合 ΔT 和 Z 的关系即可得到光子的传播速度 V , 拟合图如图 9. 测得的光的传播速度 Bicon 为 0.161m/ns, Kuraray 为 0.160m/ns.

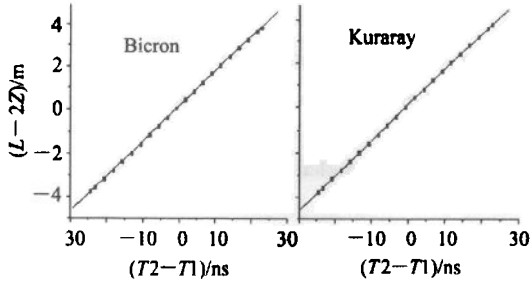


图 9 两种光纤的距离差和时间的拟合直线

3.4.2 时间分辨

由于实验采用双端读出, 由两端的时间 $T1, T2$ 可以得到时间差 $\Delta T = T1 - T2$, 两端的时间分辨 $\sigma_T = \sigma_{\Delta T} / 2$, 通过拟合不同位置的 ΔT 谱, 可得到 $\sigma_{\Delta T}$, 进而得到相应的时间分辨 σ_T . 图 10 为分别对两种光纤在距一端(南端)40cm 处和 120cm 处的拟合过的 ΔT 谱.

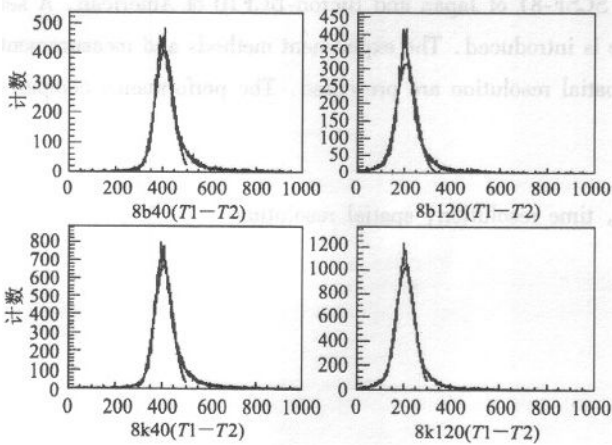


图 10 两种光纤的拟合过的 ΔT 谱

(8b 为 Bicon 的光纤, 8k 为 Kuraray 的光纤)

图 11 给出距光纤中点不同距离处(设南端为正)的时间分辨, 由于时间分辨与光电倍增管收集的光电子数的平方根成反比 ($\propto 1/\sqrt{\mu}$), 而收集到的光电子数随着放射源离光电倍增管的距离增大而减少, 所以光纤的时间分辨率基本上随着放射源离光电倍增管的距离的增大而增大, 在图中就表现为离

中点越远, 分辨越小

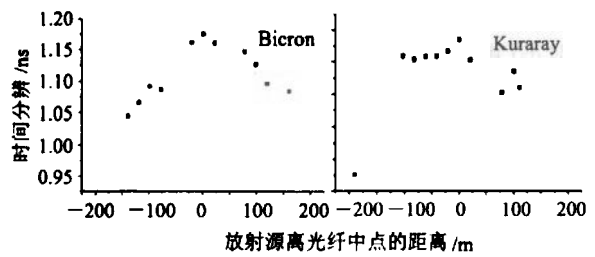


图 11 两种光纤的时间分辨随距离变化的曲线

3.4.3 位置分辨

由(2)式 $\Delta T = (4 - 2Z) / V$, 作一下变换, 把 Z 换成放射源距中点的距离 S , 则 $\Delta T = 2S / V$ 通过测量时间可以达到位置(Z)测量的目的. 与此同时还可得到光纤的位置分辨,

$$\sigma_s = \sigma_T \cdot \left(\frac{V}{2} \right)$$

表 3 给出实验测量到的不同位置处(南端为正)两种光纤的时间分辨(σ_T)和位置分辨(σ_s). 这里得到的是单根光纤双端读出的时间分辨和位置分辨. 对于 N 根光纤, 其相应的时间分辨和位置分辨要除以 \sqrt{N} , 一般闪烁光纤量能器每个读出单元有上百根光纤, 所以相应的分辨率会比单根光纤的好约一个数量级.

表 3 实验测得的两种闪烁光纤不同位置处的时间分辨和位置分辨

| 放射源位置/cm | -160 | -60 | 0 | 80 | 180 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bicon σ_T /ns | 1.00 | 1.14 | 1.18 | 1.14 | 1.01 |
| Kuraray σ_T /ns | 1.07 | 1.16 | 1.19 | 1.11 | 1.01 |
| Bicon σ_Z /m | 0.081 | 0.092 | 0.095 | 0.092 | 0.081 |
| Kuraray σ_Z /m | 0.086 | 0.093 | 0.095 | 0.089 | 0.081 |

4 结论

该工作建立了一套测量闪烁光纤特性的装置. 测量了 Kuraray-SCSF81 和 Bicon-BCF10 两种光纤的单光电子谱、衰减长度、光产额及其时间特性等. 它们有相近的光产额(约 6—7 个光电子/mm), 单根光纤的时间分辨(双端)为 1ns 左右, 位置分辨(双端)为 0.09m 左右, 衰减长度的所测值也与厂家的参数

相一致. 量能器对闪烁光纤特性的要求除了光产额高、衰减长度大、时间分辨好之外, 各光纤之间性能差别小(即均匀性好)也很重要, 这可以使相同能量

的入射粒子在量能器不同位置所产生的信号尽可能一致.

参考文献 (References)

- 1 Breskin A. Nuclear Instrument and Methods, 1997, **A389**:1
- 2 Okusawa T et al. Nuclear Instrument and Methods, 2000, **A440**:348
- 3 DeSalvo R et al. Nuclear Instrument and Methods, 1992, **A315**:375
- 4 Kirkby J. CERN-EP/87-60
- 5 Ambrosio C D et al. CERN-PPF/96-65
- 6 WANG Xiao-Lian et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1997, **21**(9):787(in Chinese)
(汪晓莲等. 高能物理与核物理, 1997, **21**(9):787)
- 7 Ruchti R C. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1996, **46**:281—319
- 8 BAI J I et al. Nuclear Instruments and Methods, 1994, **A344**:319
- 9 CERN Program Library Writeup Q121, PAW (Physics Analysis Workstation)
- 10 Dossi R et al. Nuclear Instruments and Methods, 2000, **A451**:623—637
- 11 Anelli M et al. KLOE MEMOS No.25/95
- 12 Hawkes C M et al. Nuclear Instruments and Methods, 1990, **A192**:329—336
- 13 Bellamy E H et al. Nuclear Instruments and Methods, 1994, **A339**:468—476
- 14 CERN Program Library Writeup D506, MINUIT (Function Minimization and Error Analysis Reference Manual)

Test of Characteristics of Scintillating Fibers

CHI Shao-Peng XIA Xiao-Mi ZHOU Li WANG Man LAI Yuan-Fen LÜ Jun-Guang

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

Abstract Scintillating fiber has the performance of high detecting efficiency and short response time. Scintillating fiber tracking combines the speed and efficiency of a scintillation detector with the flexibility and hermeticity. We study and test the performance of two kinds of scintillating fiber, Kuraray SCSF-81 of Japan and Bicron-BCF10 of American. A set of experiment device testing single scintillating fiber performance is introduced. The experiment methods and measurement results of light yield, attenuation length, time resolution and spatial resolution are presented. The performance comparison for the two kinds of scintillating fiber is also given.

Key words scintillating fiber, light yield, attenuation length, time resolution, spatial resolution

Received 25 July 2002

* Supported by Major Program of National Natural Science Foundation of China (19991480) and The Chinese Academy of Sciences under Contract (KJ95T-03)