Fibre ottiche WLS

Barbara Valeriani   Pasquale Federico Zema

10 giugno 1997

1 Introduzione

In vari esperimenti di rivelazione di particelle si usano le fibre ottiche per trasportare la luce prodotta dallo scintillatore al fotomoltiplicatore. Quello che interessa è, naturalmente, cercare di rendere massimo il segnale in uscita dal PM. Per far ciò, bisogna tenere conto dell'andamento sia dell'efficienza quantica del fototubo sia dell'assorbimento da parte della fibra in funzione della lunghezza d'onda della luce trasportata da questa. Tipicamente uno scintillatore emette nel blu; la situazione più favorevole è però quella in cui nella fibra si propaga luce verde: il fatto che il PM abbia una migliore efficienza quantica per diverse lunghezze d'onda, per esempio nell' ultravioletto, è, infatti, bilanciato dal minore assorbimento della fibra nel verde. È per questo motivo che si usano le fibre ottiche "wave length shifting" (WLS).

Uno dei problemi connessi con le fibre ottiche è che queste, se attraversate da particelle cariche tendono a scintillare, influenzando così i risultati delle misure. Un altro problema, più ovvio, è che metà luce si perde nel momento stesso in cui questa entra nella fibra. Nel nostro lavoro abbiamo studiato gli effettivi vantaggi derivanti dalle soluzioni adottate per risolvere questi probemi.

2 Fibre con UVA

Le fibre WLS emettono per scintillazione nell'ultravioletto e hanno una curva di assorbimento piccata nel blu, ma con code che si estendono anche per lunghezze d'onda inferiori: esiste quindi la possibilità che al fotomoltiplicatore arrivino fotoni non prodotti dalla particella che vogliamo effettivamente rivelare. Per cercare di eliminare questo inconveniente si usano fibre drogate con particolari sostanze denominate "ultra violet absorber" (UVA), la cui funzione è quella di eliminare la componente ultravioletta della radiazione trasportata; nasce a questo punto il problema di stabilire se l'introduzione di queste sostanze faccia perdere anche luce buona, ossia emessa dallo scintillatore, e, in caso affermativo, se questa perdita annulli o meno i vantaggi derivanti dalla diminuzione della luce prodotta dalla fibra stessa.

2.1 Descrizione di una fibra

Una fibra ottica consiste di un nucleo centrale, "core", costituito prevalentemente da polistirene e con diametro di circa 1 mm, e da uno o due strati esterni denominati "clad", con spessore di circa 25 μm con indice di rifrazione minore di quello del core. Il trasporto della luce all'interno della fibra avviene per riflessione totale, mentre lo spostamento di lunghezza d'onda è dovuto ad un composto a base di fluoruri dissolto nel core. Non tutta la luce che colpisce l'interfaccia core-clad viene riflessa: quella trasmessa in parte continua a viaggiare nel clad per riflessione totale, in parte viene dispersa nell'aria. Il nostro primo passo è stato quello di determinare dei parametri che caratterizzino la fibra riguardo alla trasmissione della luce. Ipotizziamo che la luce che arriva alla fine della fibra sia la somma di due contributi: la luce che viaggia nel core e la luce di clad. Schematizziamo quindi l'andamento dell'intensità luminosa all'interno della fibra, al variare della distanza dalla sorgente, come la somma di due esponenziali.

$$I = A_{core} \exp\left(\frac{-x}{L_{core}}\right) + A_{clad} \exp\left(\frac{-x}{L_{clad}}\right).$$

Ci aspettiamo che la luce di clad venga attenuata molto più rapidamente della luce di core sia per il maggior numero di riflessioni nel clad dovuto al minore spessore, sia per le inevitabili irregolarità all'interfaccia clad-aria che determinano perdite di luce ad ogni riflessione.

2.2 Apparato sperimentale

Descriveremo adesso il metodo che abbiamo usato per ricavare i quattro parametri per una fibra. La fibra viene tesa tramite appositi sostegni sopra un banco ottico; una sua estremità è annerita con inchiostro per evitare riflessioni (che porterebbero un ulteriore contributo ad I), l'altra viene accoppiata al fototubo. Eventuali perdite di luce a questa estremità vengono ridotte spargendo del grasso ottico sulla superficie del PM, il che consente di allargare la zona di contatto. La fibra viene inoltre accoppiata ad una barretta di scintillatore in maniera che questa possa scorrerci sopra senza danneggiarla; sullo scintillatore viene appoggiata una sorgente radioattiva β^- (^{90}Sr) e il tutto viene sistemato su un motore passo-passo. Gli impulsi di corrente provenienti dal PM vengono fatti passare attraverso una resistenza di precisione e un voltmetro digitale ne legge la ddp ai capi. Il motore e l'acquisizione dati sono gestiti in maniera automatica dall'elettronica.

Per evitare instabilità nella risposta il fotomoltiplicatore viene sempre acceso qualche minuto prima di iniziare le misure e la temperatura dell'ambiente viene mantenuta costante. Ciò comunque non è sufficiente per assicurarci che il PM amplifichi sempre dello stesso fattore: rimandiamo al par. 4 per la descrizione dei controlli da noi effettuati sulla variazione nel tempo dell'efficienza del fototubo.

2.3 Fit delle curve di attenuazione

Un tipico grafico della corrente in uscita dal PM in funzione della distanza della sorgente è riportato in fig. 1, in cui alla scansione è stato sovrapposto il fit ottenuto con la funzione:

$$I = A_{clad} \exp\left(\frac{-(x - X_{zero})}{L_{clad}}\right) + A_{core} \exp\left(\frac{-(x - X_{zero})}{L_{core}}\right)$$

con $X_{zero} = 6$ cm. Ora e nel seguito le lunghezze d'attenuazione saranno espresse in centimetri, e le intensità in numero di fotoelettroni prodotti al catodo del PM (il metodo usato per convertire i valori delle intensità da Volt in fotoelettroni è descritto nel par. 5). I valori dei quattro parametri sono i seguenti:

$$\begin{array}{lcl lcl} A_{core} & = & 1.09 \pm 0.04 & \quad L_{core} & = & 345 \pm 24 \\ A_{clad} & = & 0.58 \pm 0.03 & \quad L_{clad} & = & 27 \pm 4. \end{array}$$

L'andamento del grafico che tende a diventare lineare per x grandi e il raffronto tra le due lunghezze d'attenuazione confermano l'ipotesi fatta che la luce di clad a grandi distanze porti un contributo trascurabile rispetto alla luce di core. In genere negli esperimenti si usano gli ultimi cm delle fibre, perciò nella nostra analisi possiamo tenere conto solo della luce di core. Proviamo allora a fittare l'ultimo tratto del grafico precedente ($x > 100$) con la funzione

$$I = A \exp\left(\frac{-(x - X_{zero})}{L'_{core}}\right) \qquad \text{con } X_{zero} = 100\text{cm}.$$

Il risultato è riportato in fig. 2, in cui la funzione di fit è stata estrapolata fino all'origine. I valori dei parametri sono i seguenti:

$$A = 0.840 \pm 0.009 \qquad L'_{core} = 333 \pm 24.$$

Per fare un paragone tra i due fit L'_{core} va confrontato con L_{core}, e $A \cdot \exp(94/L'_{core})$ va confrontato con A_{core}: il fattore $\exp(94/L'_{core})$ è dovuto alla diversità del valore di X_{zero} nei due casi.

$$\begin{array}{rclcrcl} L_{core} & = & 345 \pm 24 & \qquad & L'_{core} & = & 333 \pm 24 \\ A \exp\left(\frac{94}{L'_{core}}\right) & = & 1.11 \pm 0.03 & \qquad & A_{core} & = & 1.09 \pm 0.04. \end{array}$$

Il buon accordo tra le due coppie di parametri conferma l'ipotesi che il fit a singolo esponenziale dell'ultimo tratto della fibra fornisca i giusti parametri per la componente di core.

2.4 Influenza dell'UVA

Abbiamo studiato sei fibre ottiche uguali a due a due in tutto tranne che per la presenza o meno di UVA. Il nostro lavoro è consistito nel fare due scansioni per ognuna di queste fibre, una volta con lo scintillatore, ossia nel modo già descritto, e una volta irraggiando direttamente la fibra con la sorgente di ^{90}Sr, in modo da studiare la propagazione della luce di scintillazione. Dopodiché, per ogni coppia, abbiamo confrontato le due fibre considerando il rapporto tra le scansioni con scintillatore (R_{sc}) e quello tra le scansioni con irraggiamento diretto (R_{dir}), per capire quanta luce "buona" e quanta "indesiderata" venga persa con l'aggiunta dell'UVA. L'aver fittato questi rapporti (per $x > 100$) con una costante ha portato ai seguenti risultati:

Prima Coppia

Fibra senza UVA		
con scintillatore	$A = 0.747 \pm 0.011$	$L = 241 \pm 17$
irraggiamento diretto	$A = 0.194 \pm 0.003$	$L = 276 \pm 23$

Fibra con UVA		
con scintillatore	$A = 0.554 \pm 0.006$	$L = 244 \pm 13$
irraggiamento diretto	$A = 0.154 \pm 0.002$	$L = 233 \pm 12$

Rapporto tra fibra con UVA e fibra senza UVA	
con scintillatore	$R_{sc} = 0.744 \pm 0.008$
irraggiamento diretto	$R_{dir} = 0.697 \pm 0.007$

Seconda Coppia

Fibra senza UVA		
con scintillatore	$A = 0.747 \pm 0.011$	$L = 219 \pm 14$
irraggiamento diretto	$A = 0.199 \pm 0.003$	$L = 220 \pm 15$

Fibra con UVA		
con scintillatore	$A = 0.607 \pm 0.009$	$L = 219 \pm 14$
irraggiamento diretto	$A = 0.139 \pm 0.003$	$L = 253 \pm 19$

Rapporto tra fibra con UVA e fibra senza UVA	
con scintillatore	$R_{sc} = 0.815 \pm 0.009$
irraggiamento diretto	$R_{dir} = 0.728 \pm 0.005$

Terza Coppia		
Fibra senza UVA		
con scintillatore	$A = 0.791 \pm 0.008$	$L = 286 \pm 18$
irraggiamento diretto	$A = 0.109 \pm 0.001$	$L = 303 \pm 20$
Fibra con UVA		
con scintillatore	$A = 0.672 \pm 0.008$	$L = 221 \pm 11$
irraggiamento diretto	$A = 0.0348 \pm 0.0003$	$L = 220 \pm 10$
Rapporto tra fibra con UVA e fibra senza UVA		
con scintillatore	$R_{sc} = 0.811 \pm 0.006$	
irraggiamento diretto	$R_{dir} = 0.304 \pm 0.002$	

N.B. In queste tabelle le ampiezze sono riportate in unità arbitrarie.

Riportiamo in fig. 3 un esempio di rapporto di due scansioni fittato con una costante.

2.5 Considerazioni

Teoricamente, la luce proveniente dallo scintillatore e quella prodotta con irraggiamento diretto dovrebbero avere lunghezze d'attenuazione diverse a causa delle diverse lunghezze d'onda. Questa differenza è però minima: non ci aspettiamo quindi di rivelarla col nostro apparato sperimentale. Come si vede dalla tabella, le due lunghezze d'attenuazione sono sicuramente non uguali solo in due casi (fibra senza UVA della prima coppia e fibra con UVA della seconda coppia); in entrambi i casi la lunghezza d'attenuazione maggiore corrisponde alla scansione con irraggiamento diretto: ciò è da imputare, evidentemente, a problemi della fibra, in quanto, mentre la luce dovuta all' irraggiamento diretto viene prodotta direttamente nel core, quella proveniente dallo scintillatore deve attraversare due strati di clad prima di essere trasmessa. Questi strati possono non essere uguali per tutta la lunghezza della fibra, o per problemi di costruzione (filatura non omogenea) o per traumi subiti durante precedenti manipolazioni (gli esperimenti coinvolgono in genere le parti più lontane delle fibre) e quindi il coefficiente di trasmissione può cambiare da un punto all'altro della fibra.

Per quanto riguarda le prime due coppie, dalla scarsa differenza tra R_{sc} ed R_{dir} emerge come l'aggiunta di UVA abbia portato solamente ad una riduzione (circa del 25%) dell'intensità totale, senza grosse discriminazioni tra luce ultravioletta e luce visibile. Nella terza coppia, invece, l'intensità totale cambia del 20%, mentre la componente ultravioletta viene ridotta di un fattore maggiore di tre. Possiamo quindi dire che solo in quest'ultimo caso si è rivelata vantaggiosa l'aggiunta di UVA.

3 Alluminizzazione delle fibre

La seconda parte del nostro lavoro è consistita nello studiare fibre che, a differenza di quelle considerate finora, hanno un'estremità alluminizzata, in modo da far arrivare al fotomoltiplicatore la maggior quantità di luce possibile. Per caratterizzare queste fibre non basta allora specificare le ampiezze e le lunghezze di attenuazione della luce di clad e della luce di core, ma bisogna anche determinare il coefficiente di riflessione R all'alluminizzazione. Si potrebbe tentare di risolvere questo problema per via analitica, schematizzando l'intensità di luce che arriva al PM come la somma di quattro contributi: luce di core e di clad arrivate direttamente e luce di core e clad che hanno subito la riflessione, ossia provando a imporre

$$I = A_{core}\left[\exp\left(\frac{-x}{L_{core}}\right) + R\cdot\exp\left(\frac{x-2L}{L_{core}}\right)\right] +$$
$$+A_{clad}\left[\exp\left(\frac{-x}{L_{clad}}\right) + R\cdot\exp\left(\frac{x-2L}{L_{clad}}\right)\right]$$

dove L è la lunghezza della fibra. A priori non è detto che la luce di core riflessa rimanga nel core, e lo stesso vale per la luce di clad: nel nostro schema gli effetti dovuti a questo "mescolamento" vengono trascurati, e ciò non ci sembra un'ipotesi molto forte. Pur con questa semplificazione, però, il fit resta problematico per la presenza dei fattori ($A_{core}\cdot$R) e ($A_{clad}\cdot$R) che rende alta la correlazione fra i parametri. Abbiamo allora provato a cercare un metodo sperimentale per trovare R in maniera indipendente, per poi ricavare i rimanenti parametri sfruttando la stessa funzione con R fissato.

3.1 Metodo sperimentale per la determinazione di R

Supponiamo di accoppiare una sorgente di luce alla fibra in un punto molto vicino all'estremità alluminizzata e di misurare la corrente in uscita dal PM, e di ripetere la misura dopo aver tolto l'alluminizzazione e aver sporcato con inchiostro nero la fine della fibra: nell'ipotesi che la distanza della sorgente dall'estremità sia molto più piccola della lunghezza di attenuazione del clad (o, al limite, che sia nulla) le due correnti sono legate fra loro dalla relazione

$$I_{all} = I_{ink}(1 + R)$$

e quindi

$$R = \frac{(I_{all} - I_{ink})}{I_{ink}}$$

In realtà per calcolare R abbiamo usato le curve di attenuazione, estrapolandole ad una distanza pari alla lunghezza della fibra: la scansione della fibra annerita è stata estrapolata sfruttando il fit a 4 parametri discusso nei paragrafi precedenti, quella della fibra alluminizzata è stata fittata con un doppio esponenziale, che non ha significato fisico ma si adatta bene ai risultati delle nostre misure.

3.2 Caratterizzazione di due campioni di fibre

Abbiamo esaminato due gruppi di fibre costruite espressamente per essere usate in un particolare esperimento: per tal motivo non abbiamo potuto misurare R per ogni fibra, dato che non potevamo lasciare le fibre non alluminizzate, né era possibile rialluminizzarle tutte: abbiamo quindi operato solo su due fibre, una per gruppo, e abbiamo supposto che R non cambi da una fibra all'altra (dipendendo solo dal processo di alluminizzazione) e che sia uguale alla media delle nostre due misure (R= 0.75 ± 0.05). Di tali gruppi abbiamo studiato l'omogeneità delle caratteristiche ottiche. Nella tabella che segue riportiamo la resa luminosa (ampiezza della luce di core estrapolata a zero) e la lunghezza di attenuazione del core per ognuna delle fibre. Nell'ultima riga compaiono i valori medi e le deviazioni standard dei parametri. La lunghezza riportata tra parentesi nell'intestazione della tabella è quella relativa ad ogni fibra all'interno di ciascuno dei due gruppi. In fig. 4 è riportata una curva di attenuazione con sovrapposta la funzione di fit.

Primo gruppo (140 cm)		
ebm0.0	$A = 1.20 \pm 0.15$	$L = 163 \pm 28$
ebm0.1	$A = 1.15 \pm 0.11$	$L = 175 \pm 23$
ebm0.2	$A = 1.23 \pm 0.12$	$L = 162 \pm 23$
ebm0.3	$A = 1.20 \pm 0.11$	$L = 172 \pm 23$
ebm0.4	$A = 1.16 \pm 0.11$	$L = 182 \pm 25$
ebm0.5	$A = 1.17 \pm 0.17$	$L = 167 \pm 33$
ebm0.6	$A = 1.18 \pm 0.11$	$L = 167 \pm 21$
ebm0.7	$A = 1.19 \pm 0.11$	$L = 176 \pm 23$
ebm0.8	$A = 1.18 \pm 0.11$	$L = 174 \pm 23$
	$A = 1.18 \pm 0.02$	$L = 171 \pm 6$

Secondo gruppo (165 cm)		
ebm0.09	$A = 1.13 \pm 0.10$	$L = 187 \pm 23$
ebm0.10	$A = 1.04 \pm 0.09$	$L = 204 \pm 24$
ebm0.11	$A = 1.16 \pm 0.10$	$L = 184 \pm 21$
ebm0.12	$A = 1.07 \pm 0.09$	$L = 196 \pm 22$
ebm0.13	$A = 1.13 \pm 0.11$	$L = 185 \pm 24$
ebm0.14	$A = 1.14 \pm 0.13$	$L = 186 \pm 28$
ebm0.15	$A = 1.13 \pm 0.10$	$L = 187 \pm 20$
ebm0.16	$A = 1.18 \pm 0.10$	$L = 183 \pm 21$
ebm0.17	$A = 1.19 \pm 0.09$	$L = 176 \pm 17$
ebm0.18	$A = 1.14 \pm 0.17$	$L = 191 \pm 38$
	$A = 1.13 \pm 0.04$	$L = 188 \pm 7$

In conclusione possiamo dire che il comportamento delle fibre è omogeneo all'interno di entrambi i gruppi entro il 4%.

4 Controlli di stabilità

La resa di un fotomoltiplicatore può cambiare nel tempo; bisogna tener conto di ciò per poter fare un raffronto sensato tra due misure fatte in momenti diversi. Per questo motivo, subito prima o dopo la scansione di ogni fibra, abbiamo irraggiato la stessa con un led impulsato con una frequenza di 20 KHz e abbiamo misurato la carica media depositata sull'anodo del fototubo. Il led viene accoppiato alla fibra a 2 cm dal PM, ossia ad una distanza sufficientemente piccola per non avere un risultato dipendente dalle caratteristiche della singola fibra; il generatore di impulsi, oltre a comandare il led, fornisce anche un secondo impulso che, opportunamente ritardato e prolungato, funziona da gate per l'integratore. Un tipico plot della carica misurata è in fig. 5.

Il piedistallo, ottenuto spegnendo il led per pochi istanti durante l'acquisizione dei dati, dà una stima del rumore di fondo. Inoltre, prima e dopo ogni serie di misure, viene eseguita la scansione e l'irraggiamento con il led su una fibra scelta come nostro campione per avere un riferimento nel caso in cui si renda necessario il confronto tra misure effettuate in giorni diversi.

Prima di analizzare ogni set di misure, abbiamo confrontato i risultati degli irraggiamenti con led, e nel caso questi si discostassero dal valor medio di piú del 10%, abbiamo rinormalizzato i nostri dati.

5 Spettro di carica e fattore di conversione

Per ottenere il rapporto di conversione tra Volt e fotoelettroni per il segnale in uscita dal fototubo abbiamo studiato lo spettro di carica di ogni fibra. Subito dopo ogni scansione con scintillatore, si blocca la sorgente ad una distanza fissa dal PM (100 cm) e si misura la carica depositata dai fotoni prodotti nello scintillatore. Il sistema di trigger è costituito da due scintillatori sovrapposti, collocati al di sotto della sorgente radioattiva e accoppiati a due fototubi; l'AND dei due segnali in uscita da questi viene inviato ad una time unit che fornisce il gate all'integratore. Un tipico spettro di carica è riportato in fig. 6.

Il piedistallo in parte comprende eventi in cui non c'è stata produzione di fotoelettroni, in parte è dovuto ad inefficienze del trigger. Da uno studio approfondito ci aspettiamo che ogni spettro di carica, a parte il piedistallo, sia la sovrapposizione di varie gaussiane G_n, dove l'area di G_n è proporzionale alla probabilità che al catodo vengano prodotti n fotoelettroni e la stessa G_n è centrata in $(A \cdot n)$, dove A è il guadagno del PM. Sfruttando programmi già esistenti adatti a fittare simili curve, abbiamo trovato il numero medio di fotoelettroni prodotti: il rapporto tra questo numero e la tensione misurata dal voltmetro durante l'acquisizione dà il fattore di conversione cercato.

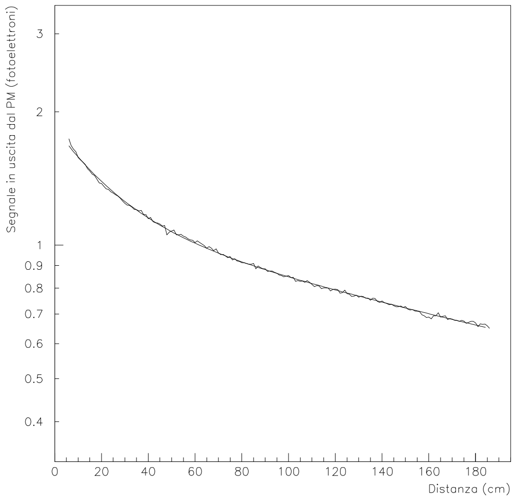

Figura 1: Curva di attenuazione con fit a quattro parametri

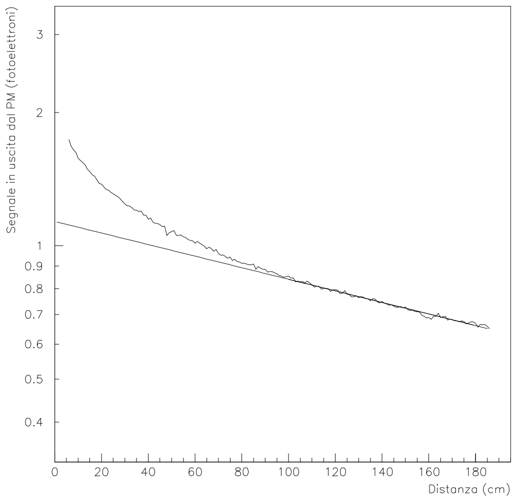

Figura 2: Curva di attenuazione con fit a due parametri

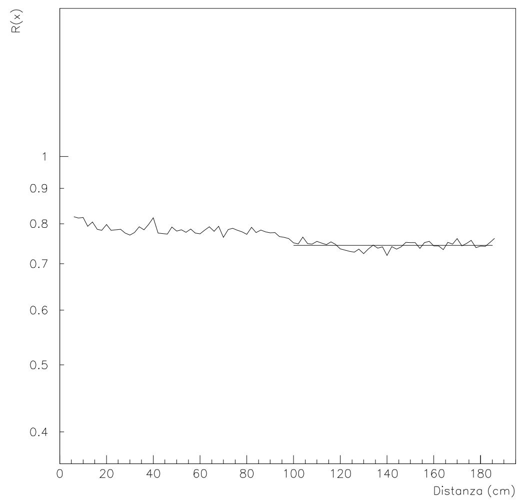

Figura 3: Fit del rapporto R tra due scansioni.

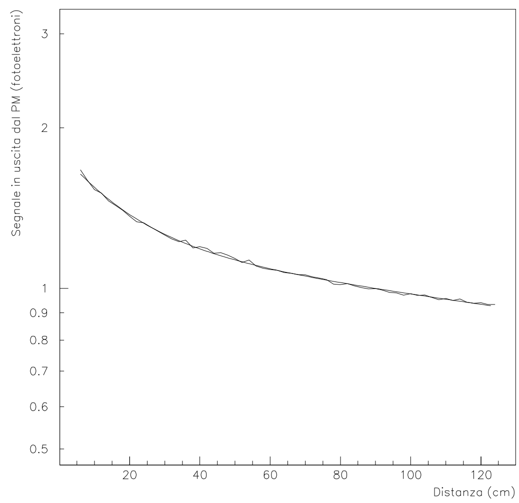

Figura 4: Fit della scansione di una fibra alluminizzata.

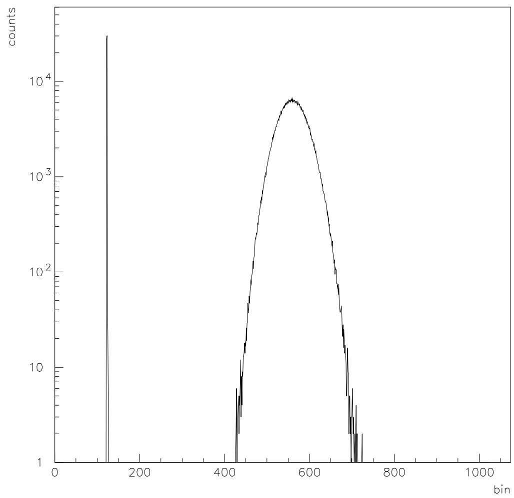

Figura 5: Plot della carica depositata da una fibra irraggiata con il led.

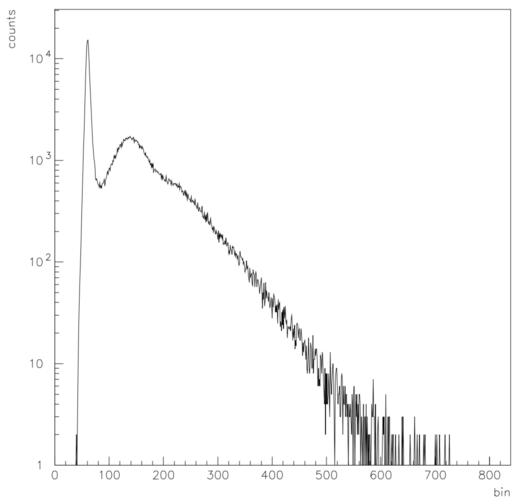

Figura 6: Spettro di carica.