LABORATORIO III anno accademico 2000/2001

MISURA DI ALCUNE CARATTERISTICHE DEI FOTOMOLTIPLICATORI

autori
C. Bracco, C. Gallo, P. Attanasio

Indice

1 Introduzione

In numerosi esperimenti di fisica nucleare si rende necessario l'uso di dispositivi che rivelino la luce. A monte di tali dispositivi fotorivelatori sta appunto il fotomoltiplicatore (PMT). Esso e' un dispositivo "fotosensibile" che consiste essenzialmente di tre parti: **il fotocatodo,un moltiplicatore di elettroni,un anodo.**
Quando la luce incide sul fotocatodo,quest'ultimo emette fotoelettroni per effetto fotoelettrico. Questi fotoelettroni sono accelerati da una d.d.p. opportuna e raggiungono l'anodo non prima di essere moltiplicati da un opportuno dispositivo (dynode sistem) posto tra fotocatodo ed anodo.Dall'anodo si raccoglie una corrente proporzionale alla quantita' di luce che investe il fototubo. Esamineremo ora piu' in particolare alcuni dettagli dei fotomoltiplicatori.

2 Dettagli di un fotomoltiplicatore

2.1 fotocatodo

A carico del fotocatodo e' il processo di fotoemissione, ovvero l'energia della luce incidente e' convertita in fotoelettroni per effetto fotoelettrico. Il processo di fotoemissione puo' essere schematicamente descritto in tre fasi

- i fotoni incidenti eccitano gli elettroni del fotocatodo;
- gli elettroni eccitati diffondono attraverso il materiale fotoemissivo dissipando parte della loro energia;
- gli elettroni che raggiungono la superficie del fotocatodo con sufficiente energia vengono emessi nel vuoto come fotoelettroni.

Si definisce efficienza quantica $\varrho(\nu)$ il rapporto

$$\frac{numero\ di\ fotoelettroni}{numero\ di\ fotoni}$$

.

2.2 Guadagno

I fotoelettroni emessi dal fotocatodo sono accelerati da un campo elettrico e collidono sul primo dinodo che produce una emissione secondaria di elettroni. Gli elettroni prodotti nella seconda emissione sono essi stessi accelerati da un campo elettrico e urtano sul dinodo successivo che a sua volta rilascia altri elettroni, il processo di emissione-accelerazione-urto si ripete (in tempi brevissimi) per un numero di volte proporzionale al numero di dinodi di cui un PMT consiste. In fondo al fototubo gli elettroni vengono raccolti dall'anodo. Si capisce bene che questo processo di moltiplicazione consente di osservare una "grossa" corrente in uscita a fronte di una "piccola" corrente in ingresso.
Il guadagno e' semplicemente il rapporto:$\frac{I_a}{I_k}$ dove I_k e' la fotocorrente prodotta dal flusso di luce incidente ed I_a e' la corrente anodica.Per un PMT provvisto di n dinodi avremo

$$G = \delta \cdot g_1 \cdot g_2 \cdot \ldots \cdot g_n$$

dove δ e' la probabilita' che un fotoelettrone emesso dal fotocatodo raggiunga il primo dinodo ; g_i e' il coefficiente di emissione secondaria dell'i-esimo dinodo definito da

$$g_i = k \cdot V_i^{\alpha}$$

dove k e' una costante di proporzionalita'; α e' un coefficiente determinato dai materiali e dalla forma geometrica dei dinodi, tipicamente compreso tra 0,6 e 0,8 ; V_i e' invece la d.d.p. dell'i-esimo dinodo.
Fatta l'ipotesi che tutti i dinodi e tutti i voltaggi siano uguali avremo:

$$G = \delta \cdot g^n = \delta \cdot k^n \cdot \left(\frac{V_{h\nu}}{n+1}\right)^{n\alpha}$$

Dove $V_{h\nu}$ e' il voltaggio di alimentazione del fotomoltiplicatore. Il segnale d'uscita di un PMT e' estremamente sensibile alle fluttuazioni del voltaggio di alimentazione.
Un PMT convenzionale con 8-10 stadi di moltiplicazione ha un guadagno compreso tra 10^3 e 10^9 per tensioni di alimentazione tra i 600 e 1800 Volt.

2.3 Rumore

In un PMT accanto al processo di conversione della luce e la successiva amplificazione della carica, sono presenti alcuni processi di rumore che in assenza di luce incidente sul fotocatodo generano una carica . La corrente che un PMT rivela in assenza di luce o come si suol dire al buio e' nota come *dark current*
Una possibile sorgente del rumore e' l' emissione termoionica del fotocatodo e/o del dinode system . Segnali spuri di piccola ampiezza possono altresi' essere osservati all'uscita di un PMT la cui origine puo' essere imputata a fotoelettroni emessi dal primo dinodo, etc.

3 Apparato sperimentale

‘

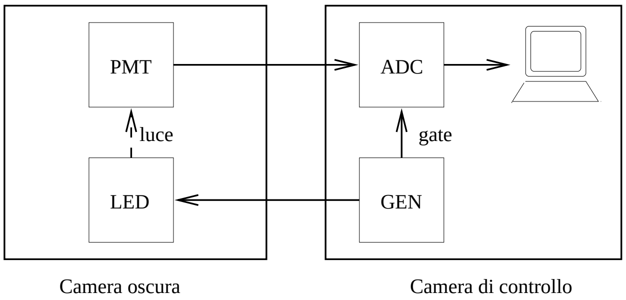

Figure 1: *schema del setup dell'esperimento*

L'apparato sperimentale consiste di:

- generatore di segnali;
- fototubo Hamamatsu 1635 P;
- LED (blu) Tektronix veloce;
- schede per l'alta tensione;
- oscilloscopio tektronix;
- oscilloscopio digitale;

- ADC a 1024 canali;
- terminale di un computer per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati;
- multimetro keitley.

Il fototubo e' alimentato da una alta tensione che possiamo manipolare dalla camera chiara attraverso un terminale. Gli impulsi prodotti dal generatore di segnali raggiungono il LED nella camera oscura attraverso cavi coassiali. Come sorgente di luce abbiamo usato un LED veloce pilotato dal segnale proveniente dalla camera di controllo (tale segnale ha periodo 100 μs con impulsi larghi circa 20 ns).L'intensita' della luce che investe il fototubo puo' essere variata cambiando l'ampiezza del segnale che pilota il LED. Il segnale analogico viene raccolto dall'anodo del PMT e sempre attraverso cavi coassiali raggiunge l'ADC nella camera chiara. A questo punto e' possibile visualizzare il segnale sull'oscilloscopio digitale per assicurarsi che l'ampiezza del GATE sia sufficientemente larga da comprendere i picchi provenienti dal fototubo. Il GATE e' fornito dal generatore di segnali ed ha un'ampiezza di 150 ns, il gate fornisce all'ADC il tempo sul quale integrare la carica. Occorre che il gate sia stretto tanto quanto basta a centrare i picchi provenienti dal fototubo, questo per evitare di integrare oltremodo la carica dovuta al rumore. Si procede poi al conteggio degli eventi ed alla misura della carica rivelata dal fototubo sotto le diverse condizioni che noi imponiamo. Il numero di eventi e la carica (gli spettri) sono evidenziati su un oscilloscopio Tektronix. E' altresi' possibile misurare la corrente anodica con il multimetro keitley. Infine i dati vengono acquisiti ed elaborati da un computer.

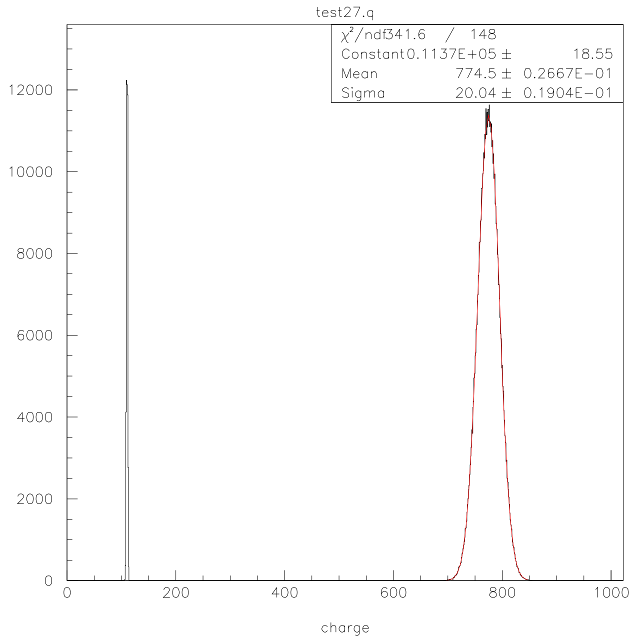

Figure 2: *spettro ad alta luce*

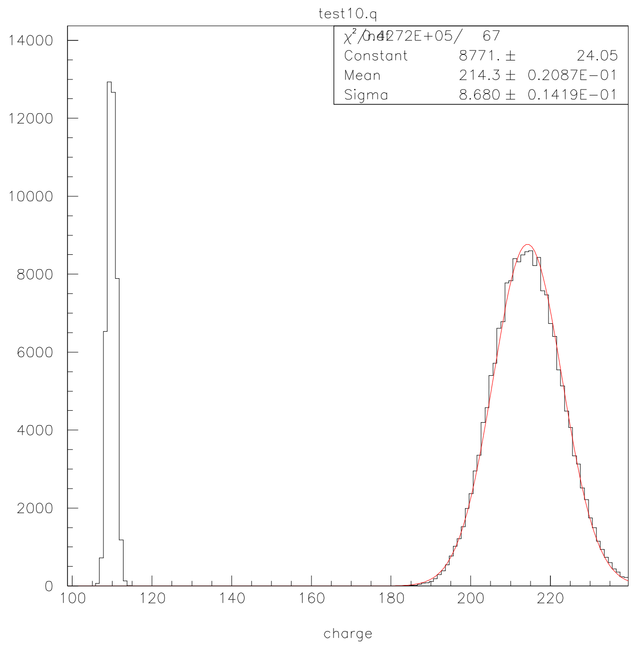

Figure 3: *spettro ad alta luce*

4 Acquisizione degli spettri

Con l'apparecchiatura descritta nella sezione precedente abbiamo effettuato misure utili ad acquisire informazioni sul fototubo.Un primo gruppo di misure sono state effettuate mantenendo fissa la tensione di alimentazione del fototubo (tale tensione e' 1000 volt) e facendo variare l'ampiezza del segnale che eccita il led. Questo e' stato fatto con lo scopo di verificare che la corrente anodica sia proporzionale alla luce che investe il fototubo, questa corrente e' stata misurata col multimetro keitley integrando su un periodo di 30 ms, tempo molto piu' lungo di un singolo impulso,e facendo poi la media su molti impulsi. Misurare la luce misurando questa corrente e' molto piu' semplice che fare spettri !
Altre misure sono state fatte tenendo fissa l'intensita' della luce e facendo variare la tensione di alimentazione del PMT. Questo e' stato fatto con lo scopo di costruire le curve del guadagno del PMT, capire qual e' il range di funzionamento del PMT, calcolare parametri come α e verificare che sia nel range tipico di questa costante.
Le figure della pagina precedente esibiscono esempi di quello che si osserva con il nostro apparato sperimentale.Gli spettri si riferiscono a misure in cui la tensione di alimentazione del PMT e' tenuta costante mentre si e' fatto variare l'intensita' della luce, nei due casi la tensione del LED e' rispettivamente 2.49 V e 2.29 V. Il primo picco a partire da sinistra (altrimenti noto come *pedestal*) e', a parte un fattore di ragguaglio , la carica dovuta al rumore, si puo' notare come non ci sia dipendenza dalla tensione del LED infatti e' pressoche' 110 in entrambi i casi.
Il secondo picco e' , a parte il solito fattore di ragguaglio, la carica dovuta alla luce incidente. Si nota che carica rivelata dal fototubo dipende dalla intensita' della luce incidente, infatti il picco e' piu' spostato a destra laddove la tensione del LED assume valori piu' alti.
Ancora dalle figure possiamo renderci conto di come la carica abbia una distribuzione gaussiana . In essa e' infatti sovrapposto il fit con una gaussiana che restituisce un valor medio della carica e la varianza della carica. Raccogliendo tali dati da ogni singolo spettro e' poi possibile realizzare curve per rendersi conto di come la carica rivelata vari con la tensione del LED.

5 Caratteristiche del PMT al variare della luce

5.1 Teoria

Nell'ipotesi che un PMT sia eccitato da una sorgente di luce impulsata di distribuzione poissoniana $\left(P(n,m) = \frac{e^{-m}m^n}{n!}\right)$ in prima approssimazione possiamo supporre che la distribuzione della carica "amplificata" sia una gaussiana, di media $\overline{s}$ e varianza σ_s^2.
Il rumore , inevitabilmente presente , ha una distribuzione gaussiana di media $\overline{p}$ e varianza σ_p^2.
Fissata l'intensita' della luce avremo pertanto che la carica effettivamente dovuta alla luce incidente e':

$$i) \qquad \mu = \overline{s} - \overline{p}$$

la cui varianza e':

$$ii) \qquad \sigma^2 = \sigma_s^2 - \sigma_p^2$$

Si ha inoltre che μ e' proporzionale a n_{ph}·G e σ e' proporzionale a $\sqrt{n_{ph}}$·G, dove G e' il guadagno del PMT, n_{ph} e' il numero di fotoelettroni, i pedici p ed s si riferiscono rispettivamente al piedistallo ed al segnale.
Ci apettiamo un andamento crescente della carica e del numero di fotoelettroni al crescere della intensita' della luce incidente, ed un valore costante della carica del piedistallo (tale e' il nome che si da' al picco dovuto al rumore).
Usando le relazioni i) e ii) deduciamo la seguente formula valida per il numero di fotoelettroni:

$$n_{ph} = \frac{\mu^2}{\sigma^2}$$

Per quanto riguarda invece il guadagno abbiamo:

$$G = \frac{\sigma^2}{\mu}$$

5.2 Dati e risultati

SV LED(Volt)	*current* μA	*Pedestal **	σ *pedestal **	*Spectrum **	σ *Spectrum **
2.2	0.31	111.32	1.21	121.06	3.13
2.21	0.42	110.58	1.18	125.55	3.70
2.22	0.88	110.76	1.17	130.05	4.16
2.23	1.10	110.26	1.14	152.48	5.58
2.24	1.37	110.01	1.13	163.34	6.11
2.25	1.69	109.97	1.12	175.19	6.80
2.26	1.9	109.82	1.11	183.49	7.22
2.27	2.3	110.02	1.10	199.42	7.99
2.28	2.77	109.97	1.11	214.35	8.71
2.29	3.16	110.10	1.09	232.6	9.51
2.3	4.17	110.09	1.11	262.58	10.30
2.31	4.86	109.88	1.05	298.73	11.07
2.32	5.51	109.75	1.03	326.79	11.94
2.33	6.18	109.87	1.05	353.43	12.92
2.34	6.9	109.77	1.05	384.94	13.59
2.35	7.63	109.7	1.07	415.04	14.47
2.36	7.99	109.9	1.04	432.13	14.90
2.37	8.83	109.93	1.04	462.82	15.72
2.38	9.67	110.04	1.05	497.46	16.66
2.39	10.57	110.05	1.08	534.12	17.54
2.4	11.48	110.1	1.05	572.24	18.33
2.41	12.49	110.16	1.06	612.26	18.74
2.42	13.41	110.16	1.06	651.83	19.33
2.43	14.41	110.03	0.91	691.02	19.47
2.44	15.46	110.31	1.12	734.56	19.78
2.45	16.42	110.32	1.15	775.29	20.06
2.46	17.45	110.4	1.09	817.15	20.01
2.47	17.98	110.21	1.04	838.29	20.06
2.48	19.04	110.44	1.06	882.09	20.09
2.49	19.93	110.4	1.04	919.55	20.05
2.5	20.82	110.33	1.06	958.16	20.05
2.51	21.74	110.31	1.03	993.89	20.14

* 0.25pC/channel

Nella tabella **precedente** sono riportati i dati ottenuti dall'analisi precedentemente descritta.
Nella prima colonna e' riportata la tensione di alimentazione del LED espressa in Volt.
Nella seconda colonna e' riportata la corrente anodica espressa in mA.
Nella terza colonna e' riportato il valor medio del piedistallo ottenuto dal fit con una gaussiana (ricordo che l'analisi dei dati e' stata effettuata con il programma PAW) espressa in unita' di canali di ADC.
Nella quarta colonna e' riportata la sigma del piedistallo ottenuta con il solito fit espressa in unita' di canali di ADC.
Nella quinta e nella sesta colonna sono riportate rispettivamente valor medio e sigma della carica del segnale espressa in unita' di canali di ADC.

Nella tabella che si trova alla **fine** di questa sezione abbiamo invece raccolto il risultato della analisi dei dati.
Nella prima colonna e' riportato il numero dei fotoelettroni, la disposizione non e' casuale ma andando dall'alto verso il basso sta aumentando l'intensita' della luce. In accordo con le nostre aspettative il numero di fotoelettroni e' proporzionale alla quantita' di luce. Questo andamento e' chiaramente visibile nella figura 6.
Nella seconda colonna e' stato riportato il valore di σ calcolato a partire dai dati della precedente tabella (per le formule si rimanda alla sezione 5.1).
Nella terza colonna e' stato riportato il valore di μ. Si osserva un andamento crescente con l'aumentare dell'intensita' della luce del LED.
Nella quarta colonna e' stato riportato il guadagno del PMT. Quello che si osserva e' un andamento oscillatorio intorno ad un punto di equilibrio $1049 \cdot 10^3$, dopodiche' esso decresce pressoche' in modo costante. Un tale comportamento e' dovuto ad effetti di saturazione della carica, l'anodo non e' in grado di raccogliere oltre un certo limite la carica prodotta.

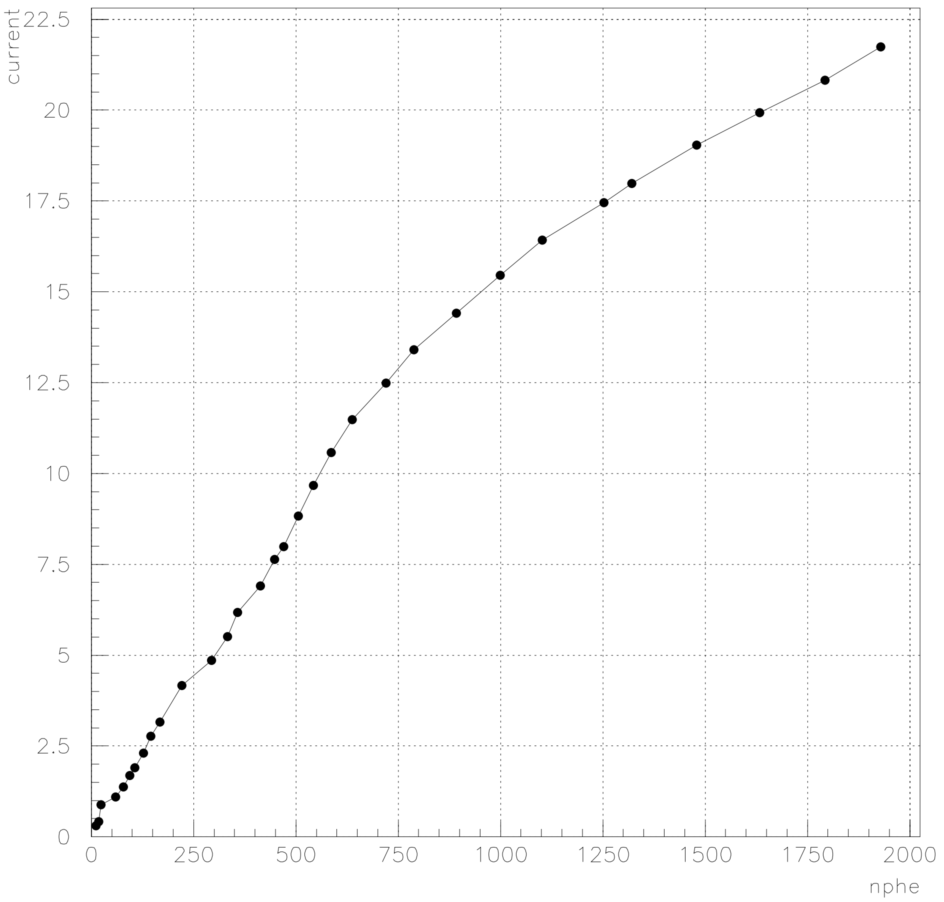

Figure 4: *andamento della corrente anodica , misurata con il multimetro keiltley espressa in μA, in funzione del numero di fotoelettroni.Si puo' notare che esiste una buona correlazione tra queste quantita' , il legame tra le due e' lineare sino a nphe circa uguale a 700 fotoelettroni dove probabilmente iniziano a farsi sentire effetti di saturazione. L'anodo non riesce piu' a raccogliere la carica prodotta dal dynode sistem.*

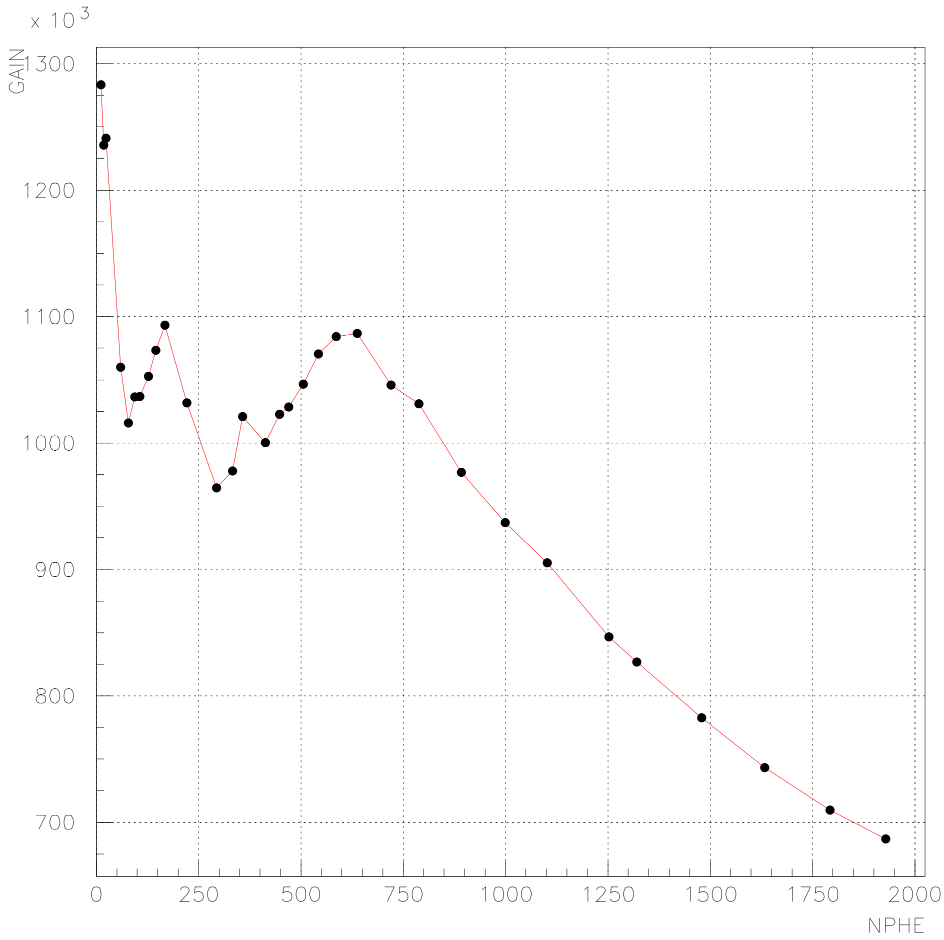

Figure 5: *Andamento del guadagno del fototubo , ottenuto dalle relazioni descritte in questa sezione, in funzione del numero dei fotoelettroni. Si osserva un andamento che oscilla intorno ad un punto di equilibrio (circa* $1050 \cdot 10^3$ *) al variare di nphe tra 100 e 750 , dopodiche' il guadagno decresce pressoche' in modo costante. Tale fenomeno e' imputabile ad effetti di saturazione.*

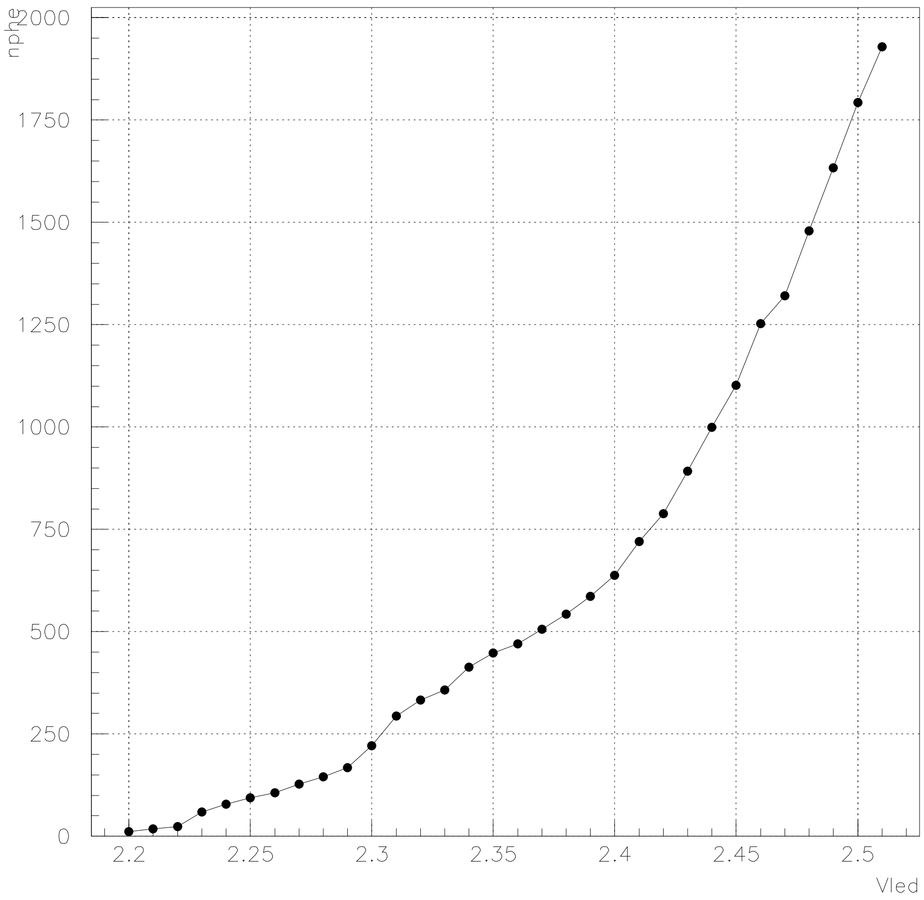

Figure 6: *calibrazione del LED E' ben visibile l'andamento crescente del numero di fotoelettroni con l'aumentare dell'intensita' della luce incidente.*

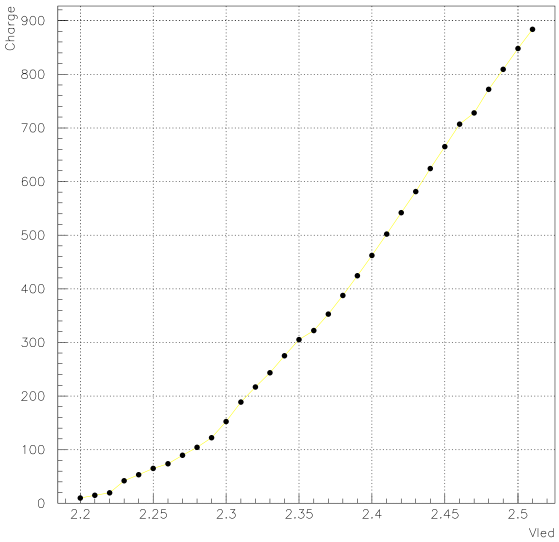

Figure 7: *andamento della carica in funzione del voltaggio del LED*

SV LED (volt)	$\frac{\mu^2}{\sigma^2}$	σ	μ	$Gain * 10^5$
2.2	11.38	2.89	9.74	13
2.21	18.17	3.51	14.97	12
2.22	23.31	3.99	19.29	12
2.23	59.75	5.46	42.22	11
2.24	78.75	6.01	53.33	10
2.25	94.38	6.71	65.22	10
2.26	106.59	7.14	73.66	10
2.27	127.38	7.92	89.40	10
2.28	145.86	8.64	104.38	10
2.29	168.07	9.45	122.50	10
2.30	221.70	10.24	152.49	10
2.31	293.67	11.02	188.85	10
2.32	332.96	11.89	217.04	10
2.33	357.86	12.87	243.56	10
2.34	412.70	13.54	275.17	10
2.35	447.90	14.43	305.34	10
2.36	469.97	14.86	322.23	10
2.37	505.85	15.69	352.89	10

SV LED (volt)	$\frac{\mu^2}{\sigma^2}$	σ	μ	$Gain *10^5$
2.38	542.85	16.63	387.42	10
2.39	586.70	17.51	424.07	10
2.40	637.84	18.30	462.14	10
2.41	720.09	18.71	502.10	10
2.42	787.94	19.30	541.67	10
2.43	892.03	19.45	580.99	9
2.44	999.24	19.75	624.25	9
2.45	1102.12	19.97	664.97	9
2.46	1252.33	20.03	706.75	8
2.47	1320.92	20.03	728.08	8
2.48	1478.80	20.07	771.65	8
2.49	1633.05	20.02	809.15	7
2.50	1792.54	20.02	847.83	7
2.51	1929.42	20.12	883.58	7

6 Curva di guadagno del PMT

6.1 Teoria

Come gia' detto nel paragrafo 2.2 il guadagno del PMT varia con la tensione di alimentazione come una potenza di n$\cdot\alpha$
Partendo dalle formule della gia' citata sezione, possiamo approssimativamente ricavare il valore di α. Attraverso semplici passaggi arriviamo a

$$log(G) = log(const) + n \cdot \alpha \cdot log(\frac{V}{n+1})$$

Riportando in ascisse il log($\frac{V}{n+1}$) ed in ordinate il log(G) otteniamo una retta la cui pendenza e n volte alfa. (n nel nostro caso specifico e' 8 in quanto tanti sono i dinodi del fototubo).

6.2 Dati e risultati

HV (Volt)	*current* μA	μ *pedestal* *	σ *pedestal* *	μ *signal* *	σ *signal* *
1250	12.75	110	1.0	642.3	33.1
1200	10.55	110.4	1.1	531.9	26.6
1150	8.40	110.6	1.0	452.3	21.4
1100	6.75	110.7	0.9	381.5	16.9
1050	5.2	110.9	1.0	315.8	13.0
1000	4.05	111	1.0	273.2	10.2
950	3.14	111	1.0	232	7.7
900	2.34	111	1.0	203.3	5.9
850	1.71	111.1	1.0	177.5	4.4
800	1.23	111.2	1.0	158.3	3.3
750	.85	111.4	1.0	142.8	2.4
700	.57	111.3	1.0	132.1	1.8
650	.38	111.4	1.0	125.1	1.
600	.24	111.5	1.0	120.0	1.2
550	.15	111.6	1.1	116.3	1.2

* 0,25 pC/channel

Nella **precedente** tabella sono riportati dati raccolti per valutare la curva di guadagno ed alcuni parametri importanti del PMT come ad esempio α. Queste misure sono state fatte mantenendo fissa la luce alla tensione di 2.3 volt e variando il voltaggio di alimentazione del PMT.
Nella prima colonna e' riportato il voltaggio di alimentazione del fototubo.
Nella seconda colonna e' riportata la corrente anodica espressa in mA. Si evince un andamento decrescente questo perche' la capacita' di amplificare del fototubo e' strettamente legata alla tensione di alimentazione.
Nella terza colonna e' stato riportato il "picco" del piedistallo espresso in unita' di canali di ADC . Anche in questo caso si osserva che il suo valore e' pressoche' indipendente dalle variazioni di tensione che applichiamo agli estremi del PMT.
Nella quarta colonna e' riportato il σ del piedistallo espresso in unita' di canali di ADC.
Nella quinta colonna e' riportato il picco del segnale espresso in unita' di canali di ADC,come per la corrente anodica anche in questo caso si registra una diminuzione della carica al diminuire della tensione di alimentazione del PMT.
Nella sesta colonna e' riportato il σ del segnale espresso in unita' di canali di ADC.

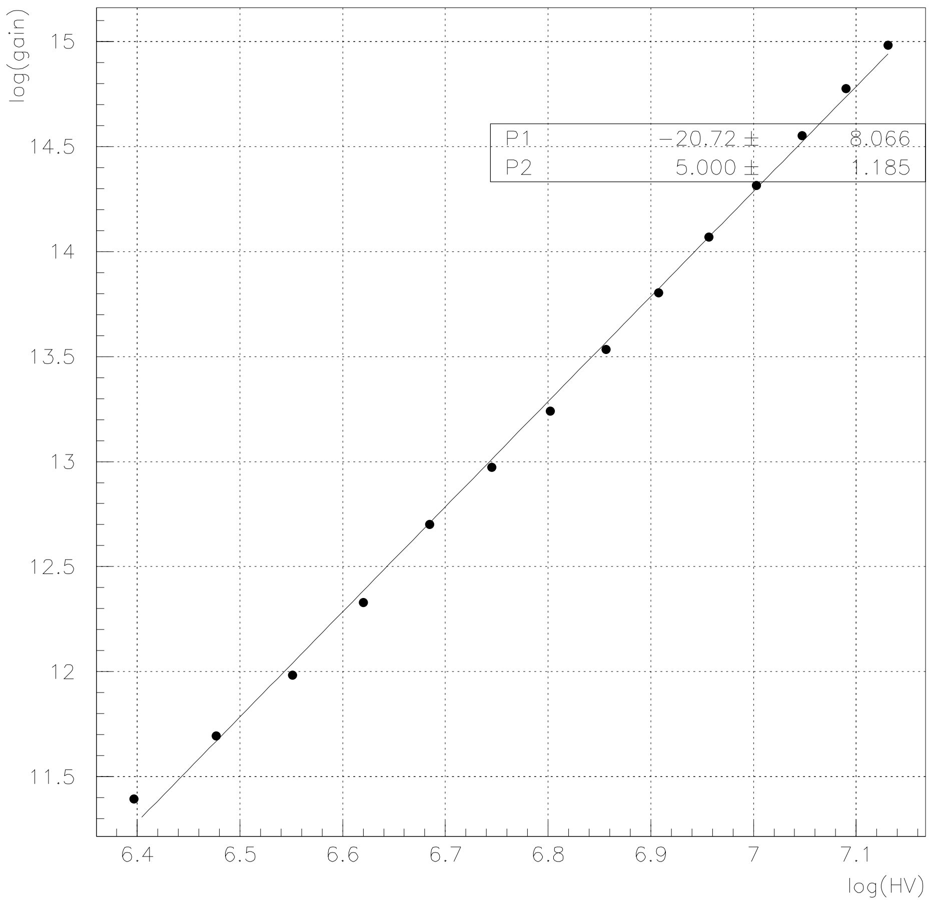

Figure 8: *Fit per valutare alfa.Dividendo il parametro P2 per 8 si ottiene il valore di alfa. Il risultato e' 0.625 un valore contenuto nel range dei valori tipici di questo parametro , si confronti con la sezione 2.2, il parametro P1 e' invece l'intercetta della retta con le ordinate ma non ha molto interesse nell'economia di questo fascicolo.*

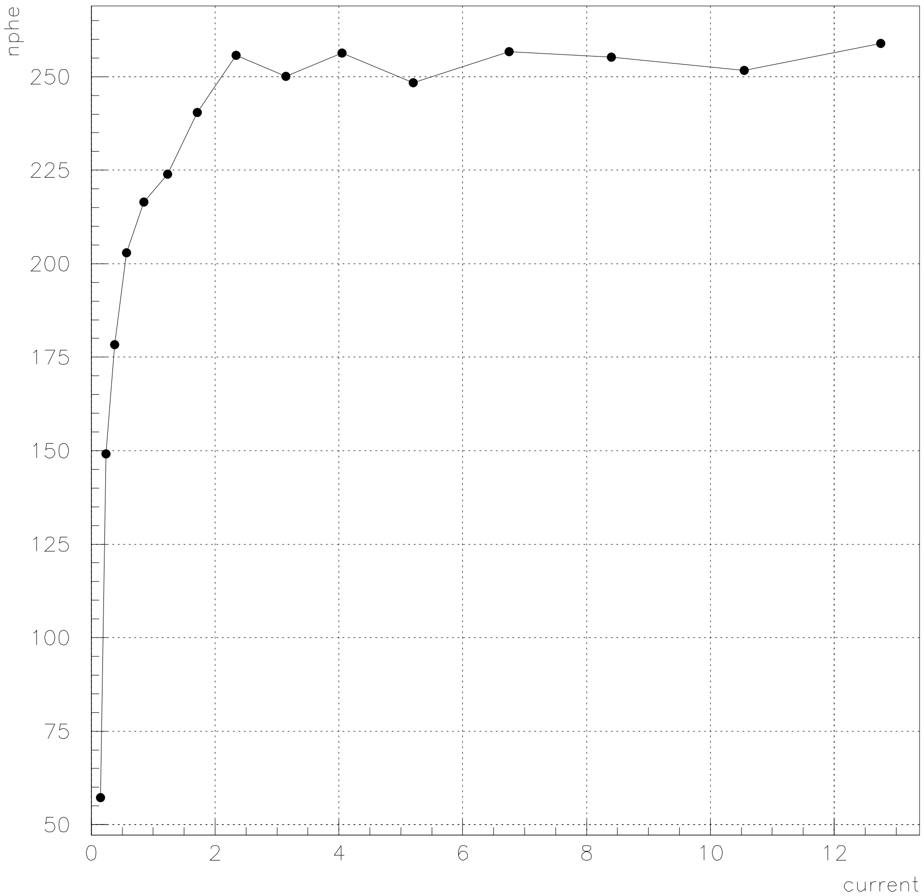

Figure 9: *andamento del numero di fotoelettroni in funzione della corrente. Ci saremmo aspettati un andamento costante del numero di fotoelettroni giacche' la sorgente di luce ha intensita' fissa, questo non accade perche' il fototubo ha una tensione di soglia al di sotto della quale cessa di funzionare in modo ottimale.*

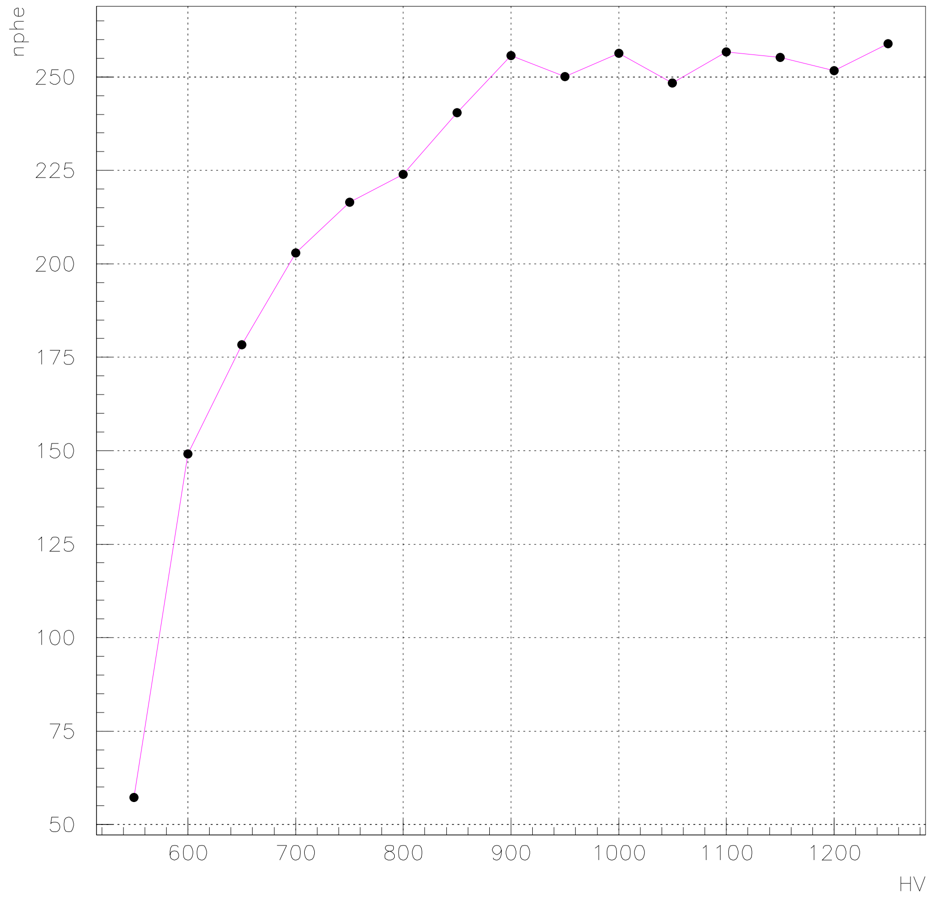

Figure 10: *Andamento del numero di fotoelettroni in funzione della tensione di alimentazione del PMT.E' ben visibile la tensione di soglia del fototubo. Essa e' circa 900 Volt.Per tensioni di alimentazione al di sotto di essa si osserva che il nphe non e' costante ma per tensioni superiori il numero di fotoelettroni torna ad essere costante come c'e' da aspettarsi dato che il PMT e' eccitato da una luce costante.*

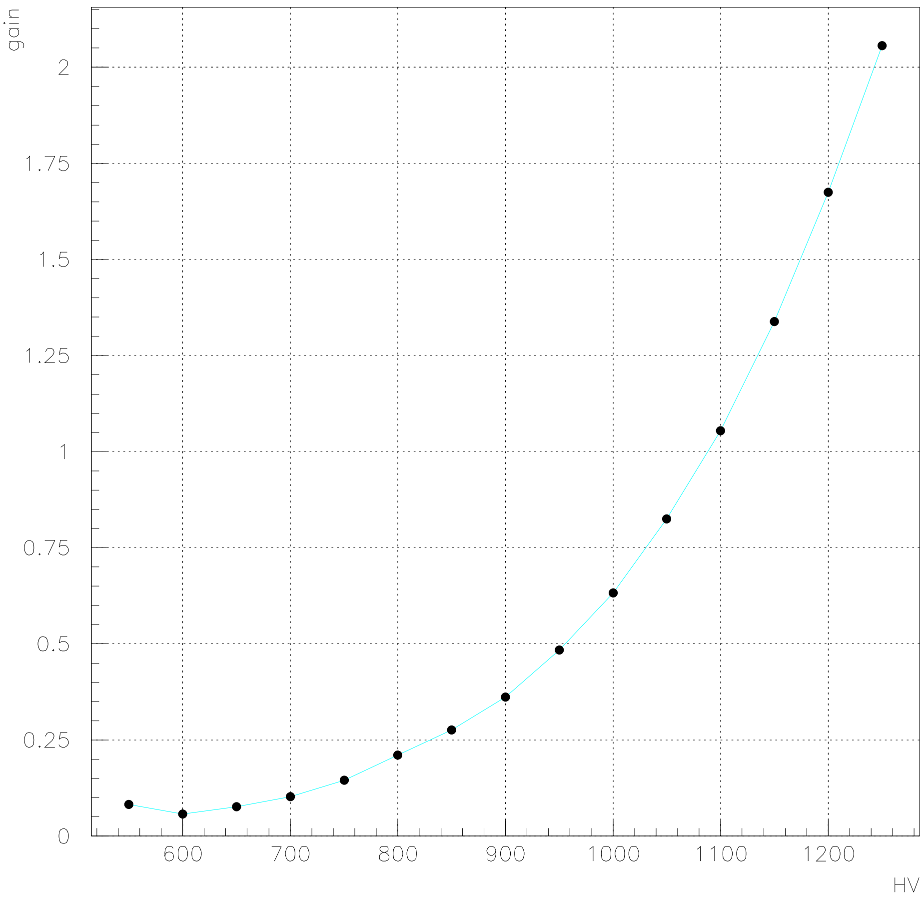

Figure 11: *Andamento del guadagno in funzione del voltaggio di alimentazione del PMT. Si riconosce l'andamento del guadagno come una potenza di* $n \cdot \alpha$ *in funzione della tensione di alimentazione del fototubo. Osservo che i valori riportati in ordinate vanno moltiplicati per un fattore* $1.5 \cdot 10^7$ *.*

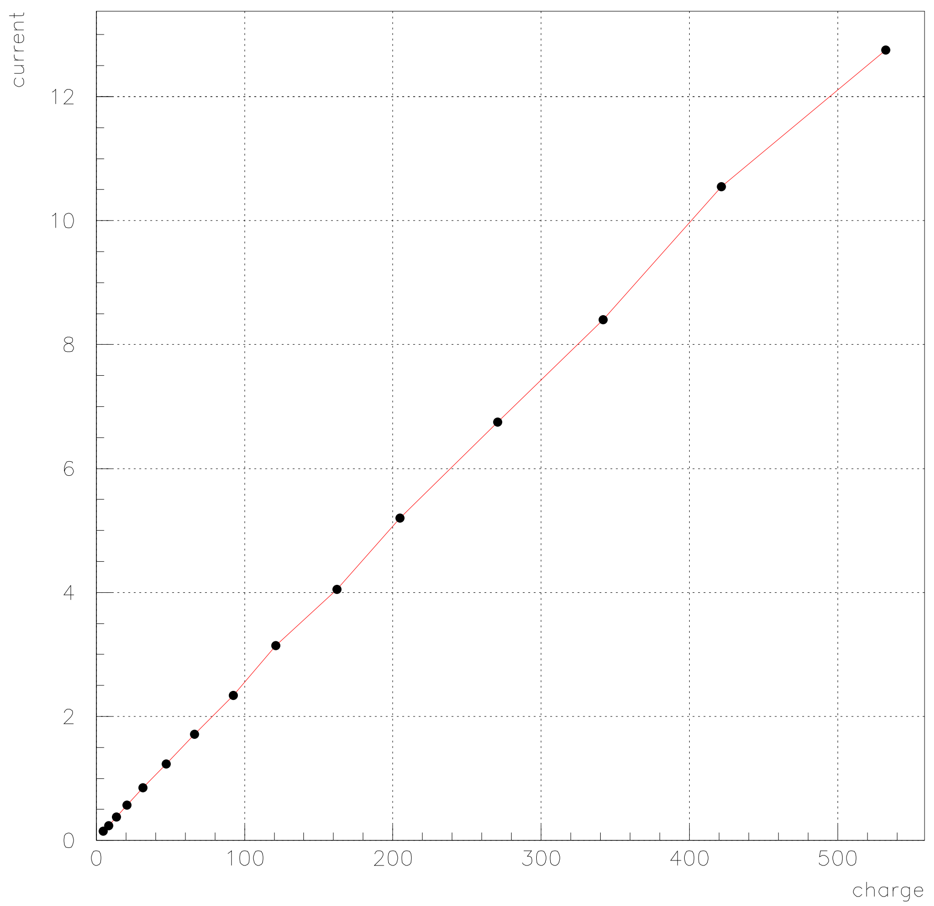

Figure 12: *Andamento della corrente anodica in funzione della carica . C'e' buona correlazione tra le due grandezze.*

7 references

- [1] Nuclear instruments and methods in phisics research A 399 (1994) 468-476
- [2] Catalogo HAMAMATSU