

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Genova

INFN/TC-89/13

7 Novembre 1989

C. Bernini, M. Castoldi, G. Gervino, G. Giuliano, A. Rottura, F. Terzi, A. Zucchiatti:

Prove di Fotomoltiplicatori da Impiegare in uno Spettrometro in BGO a Grande Angolo Solido

**PROVE DI FOTOMOLTIPLICATORI DA IMPIEGARE IN UNO
SPETTROMETRO IN BGO A GRANDE ANGOLO SOLIDO**

C.Bernini ^[1], M.Castoldi ^[2], G.Gervino ^[3], G.Giuliano ^[2]
A.Rottura ^[2], F.Terzi ^[1] e A.Zucchiatti ^[2],

[1] *Dipartimento di Fisica dell'Università Genova-Italy*

[2] *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare via Dodecaneso 33 16146 Genova-Italy*

[3] *Dipartimento di Fisica dell'Università Torino-Italy*

1. INTRODUZIONE

La realizzazione dell'apparato *Rugby Ball*, uno spettrometro^{[1][2]} di scintillatori in BGO a geometria 4π , comporta l'utilizzo di 480 fotomoltiplicatori. Per giungere alla scelta dei tipi piú idonei si é dapprima effettuata una selezione basata sulle dimensioni dei fototubi e sulle caratteristiche medie di catalogo, in particolar modo massima corrente di picco, guadagno, massima corrente media e tempo di salita dell'impulso anodico.

Si sono poi acquisiti uno o piú campioni dei fototubi selezionati per sottoporli a test comparativi considerando la loro risposta a impulsi luminosi e il comportamento^[3] in accoppiamento con due cristalli prototipo della *Rugby Ball*. Si é valutato che, anche da test su un numero minimo di fototubi standard (con caratteristiche nominalmente corrispondenti a quelle di catalogo), si sarebbero potute evidenziare le caratteristiche di nostro interesse e anche comportamenti non compatibili con l'impiego previsto. Si é stabilito di volta in

volta, sulla base dei risultati di ciascun test, se procedere a test successivi fino a formulare una tabella di fattori di qualità. Sono stati scelti fototubi con catodo di tipo bialcalino (Sb-Rb-Cs) (Sb-K-Cs) la cui risposta spettrale si estende sull'intervallo 300 ÷ 600 nm e la massima sensibilità si ha per $\lambda \approx 400 - 420$ nm. Questo copre bene lo spettro di emissione del BGO che alla temperatura di 293 K si estende da ≈ 380 nm a ≈ 650 nm con un massimo intorno a 480 nm. Tutti i fototubi prescelti hanno la finestra costituita da silicato di boro che permette la trasmissione della radiazione luminosa con lunghezza d'onda dall'infrarosso a circa 300 nm.

Sono stati selezionati quei fotomoltiplicatori con tempo di salita inferiore a 5 ns e che garantissero di ottenere un segnale di ampiezza accettabile anche nel caso di bassa efficienza del sistema cristallo-fototubo. Considerando una efficienza di conversione fra 50 e 150 fotoelettroni/MeV ^[4] e volendo all'anodo un segnale su 50Ω non inferiore a 100 mV ($I_{peak}^{min} = 2$ mA) con $E = 0.15 \div 2.0$ GeV si ottiene per il guadagno G richiesto

$$G \cdot n \cdot e = I \cdot \tau$$

con n numero di fotoelettroni al catodo, e carica dell'elettrone e τ (=350 ns) tempo di decadimento della scintillazione del BGO. Nel caso peggiore si ha $n = 7.5 \cdot 10^3$ fotoelettroni e in quello migliore si ha $n = 3.0 \cdot 10^5$ fotoelettroni. Si può allora concludere che posto $I_{peak}^{min} = 2$ mA il guadagno del fototubo deve essere $G \approx 6 \cdot 10^5$.

2. TEST IN ACCOPPIAMENTO A CRISTALLI PROTOTIPO

Le dimensioni dei 480 settori della *Rugby Ball* permettono l'utilizzo di fototubi da 2" o da 1.5" solamente. E' stata scartata a priori la possibilità di utilizzo di fototubi specificamente disegnati per il nostro spettrometro in quanto lo standard qualitativo complessivo di ciascuno scintillatore non sarebbe stato a priori garantito da una produzione su cosípiccola scala. Inoltre tale operazione avrebbe comportato un notevole incremento di costi. Viceversa la scelta di fototubi di dimensioni standard ha consentito di reperire sul mercato una sufficiente varietà di tipi su cui effettuare la nostra selezione. I due cristalli campione hanno forma troncopiramidale e basi trapezoidali ($h = 24$ cm, $l_{min} \approx 2$ cm, $l_{max} \approx 6$ cm). Le superfici laterali sono appositamente trattate perché sia garantita la massima uniformità longitudinale di risposta. Essi corrispondono, fra gli otto diversi tipi che compongono

la *Rugby Ball*, a quello con massima (fototubo da 1.5") e minima (fototubo da 2") copertura della superficie posteriore, ossia ai casi piú e meno favorevoli per cio' che concerne la uniformitá di risposta e la raccolta di luce.

Le misure di risoluzione energetica e di uniformitá sono state eseguite irraggiando il cristallo con una sorgente di ^{137}Cs di bassa attivitá ($1\mu\text{Ci}$) ed analizzando il segnale di anodo attraverso uno Spectroscopy Amplifier con costante di tempo $\tau = 6\mu\text{s}$ ed un analizzatore multicanale con range 1 mV/ch su 4000 canali. Per ogni fototubo sono state costruite quattro curve.

La prima rappresenta la risoluzione al Cesio con sorgente non collimata posta perpendicolarmente rispetto all'asse della piramide in funzione della tensione di alimentazione del fototubo (esempio in figura 1a). Oltre al valore tipico (V_{typ} suggerito dal catalogo si determina da questa curva il valore minimo V_{min} oltre il quale la risoluzione comincia a peggiorare.

La seconda rappresenta il comportamento temporale del rivelatore in funzione della tensione di alimentazione che é nel nostro caso di grande importanza. Infatti l'uso della *Rugby Ball* su fasci quali *JETTARGET* che hanno strutture temporali molto stringenti (radiofrequenza a 350 MHz), impongono la verifica dei tempi risolutivi di coincidenza fra i cristalli prototipo in BGO e un altro rivelatore veloce. Per i nostri test é stato scelto uno scintillatore plastico di dimensioni $2 \times 2 \times 1\text{ cm}^3$ letto da un fototubo Philips XP2232B. Il segnale di anodo del BGO é stato temporizzato mediante un Timing Filter Amplifier ed un Constant Fraction Discriminator mentre il segnale di temporizzazione dello scintillatore plastico proveniva da un discriminatore Leading Edge. Lo spettro temporale degli eventi in coincidenza prodotti da una sorgente di ^{60}Co é stato analizzato da un Time to Analog Converter e letto su multicanale. La FWHM del picco di coincidenza é riportata in un esempio nella figura 1b. I valori ottenuti a V_{typ} ed a V_{min} risultano piú alti di altri riportati in letteratura^{[5][6]}. Ferma restando la validitá relativa delle nostre misure, gli alti valori possono trovare giustificazione nel fatto che i nostri cristalli sono di dimensioni maggiori e che il trattamento delle superfici volto ad ottenere la migliore uniformitá longitudinale, limita la intensitá luminosa che giunge al fotocatodo e dunque la risoluzione temporale che a queste energie é essenzialmente determinata dalla fluttuazione statistica sul numero di

fotoelettroni raccolti per unità di tempo. Assumendo un andamento del tipo $R = a/\sqrt{E} + b$ e partendo dal valore di R_t misurato a V_{min} è stata calcolata ed assunta come parametro di valutazione l'energia E_{3ns} alla quale la risoluzione temporale diventa inferiore a 3 ns.

La terza curva (un esempio in figura 2a) rappresenta l'andamento della risoluzione in energia con sorgente collimata quando questa viene spostata lungo una faccia del cristallo con alimentazione fissata al valore V_{typ} o al valore V_{min} . Da queste curve è stato calcolato il valore medio della risoluzione ($\langle R_E \rangle$) a distanze dal fototubo fra 6 e 20 centimetri. Partendo dal valore ottenuto a V_{min} ed assumendo ancora una volta un andamento del tipo $R = a/\sqrt{E} + b$ è stata calcolata l'energia E_{1pc} alla quale il contributo statistico diventa inferiore allo 1 per cento.

L'ultima curva (in esempio in figura 2b) rappresenta l'andamento del rapporto fra l'altezza di impulso osservata in un punto della superficie laterale del cristallo (Can) e il valore massimo trovato ($Can Max$), in funzione della distanza dal fotocatodo. Da queste curve è stato calcolato il valore medio di uniformità ($\langle Unif \rangle$) a distanze dal fototubo fra 6 e 20 centimetri. Tutti i parametri sin qui definiti sono raccolti in tabella I. Da essi è stato calcolato un fattore di merito parziale definito da:

$$F_{BGO} = \frac{\langle Unif \rangle^2}{E_{3ns} \cdot E_{1pc}}$$

e normalizzato a 100. Il valore della uniformità è stato inserito al quadrato essendo i valori molto vicini fra loro e prossimi ad 1. In base ai fattori di merito riassunti in tabella I potrebbero già essere esclusi i fototubi per cui F_{BGO} non raggiunge il valore 50 (XP2202, R2154, R1847, R1306). Per gli altri il criterio non è sufficientemente selettivo. Infatti i risultati delle misure di uniformità longitudinale di risposta e di risoluzione al Cesio non presentano, per i fototubi migliori, differenze decisive. Soprattutto se si considera che l'insieme dei risultati ha confermato che le prestazioni in uniformità sono principalmente dovute alla lavorazione delle superfici del cristallo. Sarà quindi possibile, una volta scelto il fototubo da utilizzare, ottenere per ciascuno dei 480 contatori il valore di uniformità (> 0.95) imposto dalla risoluzione totale dell'apparato ($R_E \approx 2.0\%$ ad $E > 1 \text{ GeV}$).

3. TEST SU FOTOTUBI SEPARATI

Questi test si sono concentrati soltanto su proprietà dei fototubi: linearità, massima cor-

rente di picco, variazione di guadagno associata all'aumento di corrente media, stabilità in temperatura, linearità in energia. Tutte queste caratteristiche sono state valutate a V_{typ} , a V_{min} o ad entrambi. L'apparato [7] consiste in un tubo a tenuta di luce all'interno del quale tre LED (HP 1540 a luce verde), alimentati separatamente, inviano luce al fotocatodo, eventualmente attraverso una griglia diffondente. Due generatori, uno a singolo impulso (HP 8112A) ed uno a doppio impulso (HP 8013A), pilotato esternamente dal primo, sono stati usati per alimentare i LED con impulsi quadrati di 30 ns FWHM e con periodi dell'ordine del millisecondo. Per ulteriori analisi è stato usato un generatore di impulsi esponenziali modificato per ottenere impulsi di LED ($t_R \approx 100$ ns, $\tau \approx 250$ ns) sufficientemente simili a quelli prodotti all'anodo da un segnale di BGO ($\tau \approx 350$ ns). In questo caso la frequenza di ripetizione è rimasta fissa al valore di 70 Hz. I segnali di anodo generati da due o tre LED sono stati opportunamente attenuati per essere integrati in carica da un Linear Gate and Stretcher avente un range di linearità a 100 pC. L'uscita di questo è stata letta con un multicanale a 1 mV/ch di sensibilità su 4000 canali. Sono stati generati impulsi di luce da singoli LED corrispondenti a cariche raccolte all'anodo A, B, \dots lette ai canali C_A, C_B, \dots . Nel caso di LED contemporaneamente alimentati la carica complessiva Q letta all'anodo deve corrispondere al canale Ch data dalla somma dei canali singoli precedentemente letti $Ch = C_A + C_B + \dots$. Deviazioni da questa relazione che corrisponde alla bisettrice del piano $Ch - \Sigma C_i$, indicano l'inizio della regione di slinearità del fototubo (esempio in figura 3a). Per deviazione dalla linearità del 2 – 3 % l'impulso di anodo è stato letto con un oscillografo sampling da 150 Ms/s. Dall'impulso si sono ricavate la corrente di picco I_p^{sq} , la carica, e, nota la frequenza di ripetizione, la corrente media anodica. In condizioni di deviazione 2 % dalla linearità veniva accresciuta la corrente media di anodo aumentando la frequenza di ripetizione degli impulsatori fintanto che non si osservava un ulteriore spostamento del picco di 2% ca. A questo punto veniva calcolata la corrente media anodica corrispondente $\langle I_A^{max} \rangle$. Per i fototubi in cui il test di linearità presentava risultati complessi, quali apprezzabili oscillazioni attorno alla bisettrice, e slinearità già a basse correnti non venivano effettuate ulteriori prove. Per gli altri il test veniva ripetuto con impulsi approssimativamente esponenziali ottenendo risultati per la corrente di picco I_p^{exp} del tutto equivalenti al caso di impulsi quadrati (vedi figura 3b).

Una stima dell'energia corrispondente é stata fatta leggendo, assieme ai LED, un *Light Pulser* consistente in un minuscolo scintillatore di NaI(Tl) su cui é depositata una sorgente di ^{241}Am . Un valore approssimato (E_{sat}) dell'energia corrispondente agli impulsi di LED letti in condizione di massima linearitá é stato calcolato sapendo che l'energia equivalente in γ dello Americio é di 2.4-3.6 MeV [8] e che il rapporto fra le efficienze BGO/NaI é 0.10-0.12. Questo porta ad una energia equivalente (perquanto assai approssimata) in BGO di 20-36 MeV per l'impulso di *Light Pulser* che, puó essere confrontato con gli impulsi di LED. Nei casi in cui il range di linearitá misurato a V_{min} é risultato sensibilmente inferiore al range di utilizzo della *Rugby Ball* non si sono effettuate altre prove (fototubi EMI e XP2212B).

Lo stesso *Light Pulser* é stato utilizzato per studiare le variazioni di guadagno con la temperatura su tempi lunghi. Come si vede dal grafico in figura 4a le variazioni di picco sono chiaramente correlate a quelle di temperatura in ragione del fatto che lo NaI(Tl) ha un suo coefficiente di temperatura pari a $0.22\%/^{\circ}\text{C}$ [9]. Occorre dunque considerare i grafici delle variazioni percentuali del canale di picco con la temperatura in modo relativo fra i vari fototubi. Alcuni hanno andamento lineare con coefficiente $\Delta G/\Delta T$ simile a quello noto per lo NaI (figura 4b) con coefficienti di regressione C_{reg}^T elevati a testimonianza di una buona stabilitá nel tempo. Altri (esempio di figura 5) presentano invece significativi fenomeni di isteresi che ne sconsigliano l'uso. Il coefficiente della retta indica fototubi tanto migliori quanto piú esso si avvicina al valore proprio dello NaI. Il coefficiente di regressione é stato invece assunto come indice della stabilitá nel tempo del guadagno dei fototubi. Tutti i parametri sono raccolti in tabella II.

4. ANALISI DEI RISULTATI

La scelta dei fototubi é stata effettuata combinando i risultati delle tabelle I e II. Le prove su cristalli avrebbero giá permesso di restringere il numero di fototubi idonei al nostro scopo. Tuttavia per alcuni fototubi che avevano caratteristiche di economicitá e di compattezza si é preferito estendere le prove anche ai soli fototubi. La scelta é condizionata in primo luogo dal range di energia in cui verrá utilizzata la *Rugby Ball* (150-2000 MeV). Sono richieste risposte lineari dei fotomoltiplicatori per energie di almeno 1 GeV. Dalle misure di linearitá sono stati valutati per ogni fototubo i valori di energia di saturazione

E_{sat} : la prima selezione é stata fatta scartando quei fototubi con valori di energia di saturazione inferiore a 1 GeV alla tensione V_{min} . Da questa prima analisi sono risultati insoddisfacenti i fototubi EMI e il Philips 2212B. Nella previsione dell'uso del calorimetro sul fascio *JETTARGET* si richiedono tempi risolutivi delle coincidenze attorno a 3 ns. I valori di FWHM degli spettri di coincidenza BGO-plastico sono stati ottenuti ad energie di 1.17-1.33 MeV. E' noto che la risoluzione temporale migliora all'aumentare dell'energie con un andamento tipico dei fenomeni statistici: $R_t = b + a\sqrt{E}$. Estrapolando i valori ad energie maggiori di 150 MeV, si deduce che devono essere scartati quei fototubi che al Cobalto hanno FWHM maggiori di 6 ns. Da questa seconda analisi sono stati scartati i fototubi Hamamatsu R1306 e R2154 e XP2202. Per i restanti fotomoltiplicatori si sono pesati i vari parametri di tabella I e II, costruendo un fattore di merito che tenesse conto delle caratteristiche complessive. Fra queste é sta calcolato e riportato in tabella II il valore A_{150} corrispondente all'altezza che il segnale di anodo avrebbe a 150 MeV. Il fattore di merito é stato definito come:

$$F_{mer} = \frac{E_{sat} \cdot A_{150} \cdot C_{reg}^T}{R_t \cdot \langle R_E \rangle \cdot \Delta G / \Delta T}$$

e include al numeratore i parametri per i quali é desiderato il valore piú alto possibile e viceversa al denominatore. Il fattore di merito sará dunque tanto piú alto quanto migliore é il fototubo in esame. Dai valori ottenuti riportati in tabella II emerge che il tipo Hamamatsu R329 fra quelli da 2" ed il tipo Hamamatsu R580 fra quelli da 1.5" sono i fototubi che alla nostra analisi hanno presentato le caratteristiche complessive migliori. Su questi due fototubi sono state eseguite prove di conferma per ciò che riguarda linearità, corrente media anodica e range in energie ripetendo i test su alcuni altri fototubi con risultati sostanzialmente confermati [7]. Tuttavia, essendo le pur buone prestazioni del tipo R329, al limite del range di linearità richiesto, si é deciso di procedere all'acquisto, in questo caso di fototubi che fossero già selezionati dalla fabbrica per una linearità al di sopra dei 100 mA.

RIFERIMENTI

- [1] A.Zucchiatti
SIF Atti di conferenze 9(1988)965
 - [2] A.Zucchiatti et al.
Int. Nucl. Phys. Conf Sao Paulo proc. vol.1 pg 257 1989
 - [3] F.Terzi
Tesi Università di Genova 1989 non pubblicata
 - [4] G.Blanar et al.
EPS Int. Conf. on High En. Phys. Lisbon 1981
 - [5] S.A.Wender et al.
Nucl. Instr. and Meth. 197(1982)591
 - [6] M.Moszynski et al.
Nucl. Instr. and Meth. 188(1981)403
 - [7] C.Bernini
Tesi Università di Genova 1989 non pubblicata
 - [8] Engelhard B.V.
private communication
 - [9] D.Williams et al.
Nucl. Instr. and Meth. 39(1966)141
-

TABELLA I

Prove con Cristalli Prototipo in BGO

<i>TIPO</i>	V_{typ} [Volts]	V_{min} [Volts]	$\langle R_E \rangle$ a V_{typ} [%]	$\langle Ris_E \rangle$ a V_{min} [%]	E_{1pc} [MeV]	$\langle Unif \rangle$ a V_{min}	$\langle R_t \rangle$ a V_{min} [ns]	E_{3ns} [MeV]	F_{BGO}
R329	1500	1200	17.3	17.9	210	0.964	4.6	3.5	92.7
R1306	1000	600	16.0	16.2	174	0.974	9.4	16.7	23.8
R1847	1000	700	17.6	18.5	227	.966	6.0	6.3	47.2
R2154	1250	850	18.0	18.3	222	0.976	7.2	9.4	33.3
9256	1000	750	15.9	16.5	180	0.965	4.8	3.8	100
9257	1000	750	14.6	15.9	16.7	0.974	6.0	6.3	72.5
XP2202	1150	800	18.8	19.7	257	0.980	7.0	8.9	30.8
R580(*)	1600	900	21.9	22.3	329	0.983	5.2	4.6	47.0
R980(*)	1000	650	19.3	19.7	257	0.981	5.3	4.8	57.6

(*) *fototubi da 1.5"*

TABELLA II

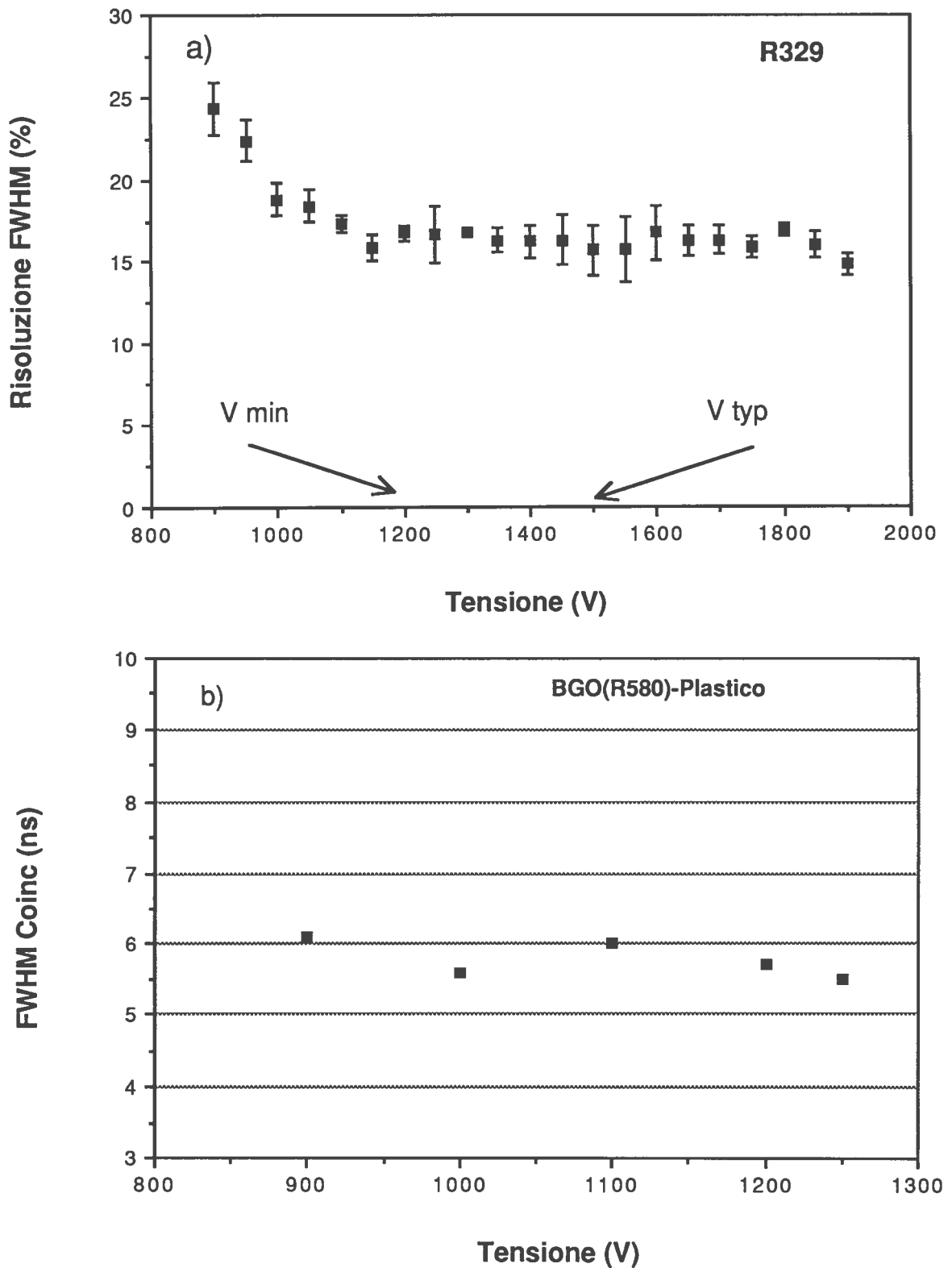
Prove su soli fototubi a $V = V_{typ}$

<i>TIPO</i>	I_p^{sq} [mA]	$\langle I_A^{max} \rangle$ [μ A]	I_p^{exp} [mA]	E_{sat} [GeV]	$\Delta G/\Delta T$ [%/ $^{\circ}$ C]	C_{reg}^T
R329	103.6	18.0	112.	0.6-1.2	0.32	0.96
R1306	17.4					
R1847	30.	34.	33.	1.0-1.9	0.44	0.90
R2154	50.0	25.0	56.0	0.3-0.6	0.30	0.95
9257	48.	12.6				
9939	152.	19.5	94.	0.2-0.3	0.36	0.60
2212	>284	53.	340.	0.1-0.2	1.06	0.56
R580 ^(*)	100	8.0	106.	8.4-15.1	0.46	0.92
R980 ^(*)	17	3.8	17.2	0.6-1.2	0.56	0.72

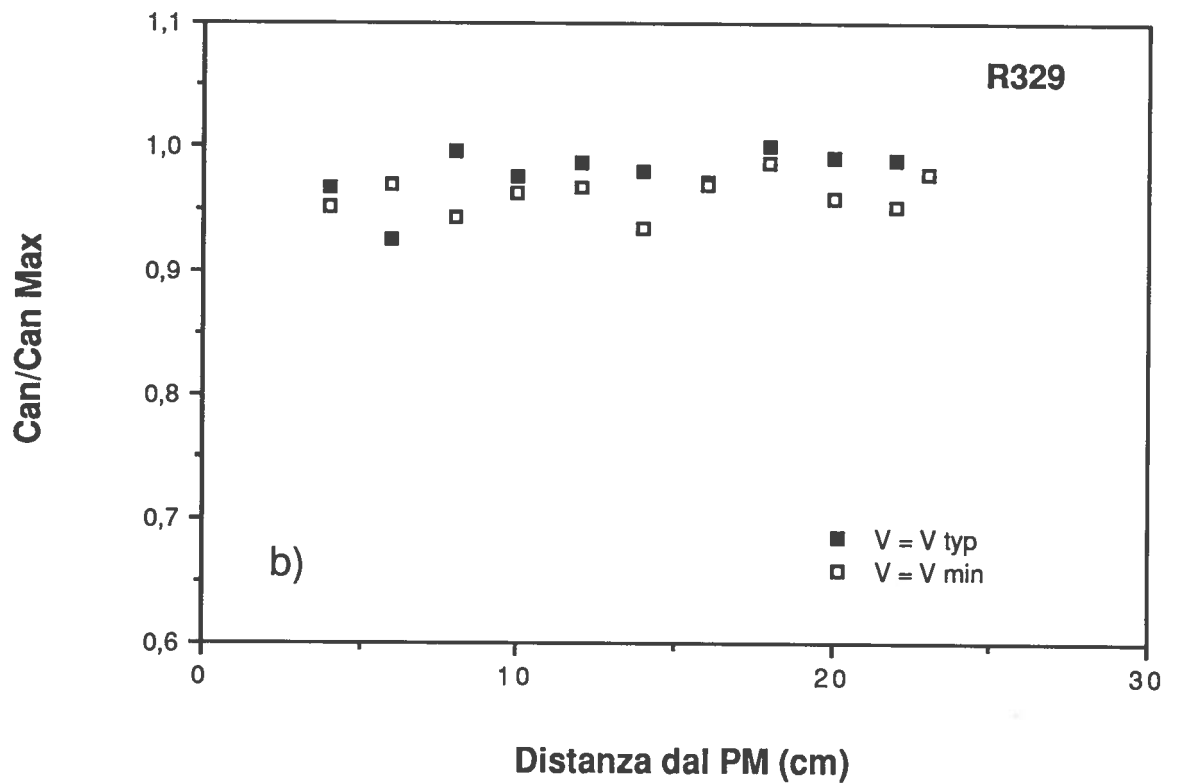
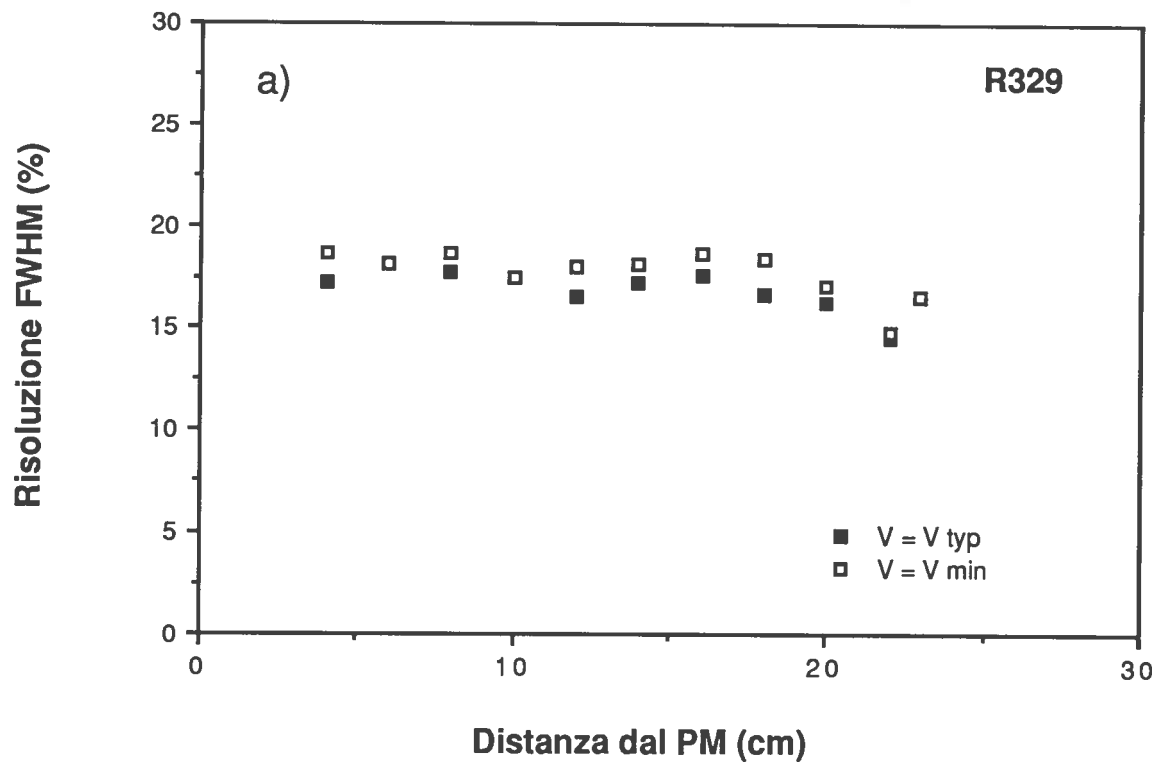
Prove su soli fototubi a $V = V_{min}$

<i>TIPO</i>	I_p^{sq} [mA]	$\langle I_A^{max} \rangle$ [μ A]	I_p^{exp} [mA]	E_{sat} [GeV]	A_{min} [mV]	F_{mer}
R329	47.0	15.2	43.0	1.4-2.4	190	13.0
R1306	5.7	6.7				
R1847	13.6	7.6	13.6	1.3-2.4	60	2.1
R2154	24.	9.5	28.	3.7-6.7	34	
9256			31	0.1-0.2	17	
9257	32.	9.2		0.1-0.2		
9939	70	5.8	26	0.4-0.6	390	
2212	>60	47	82	0.5-0.9	880	
R580 ^(*)	35	4.3	36	9.7-17.4	16	7.6
R980 ^(*)	3.5	1.8	3.4	2.7-4.9	7	0.4

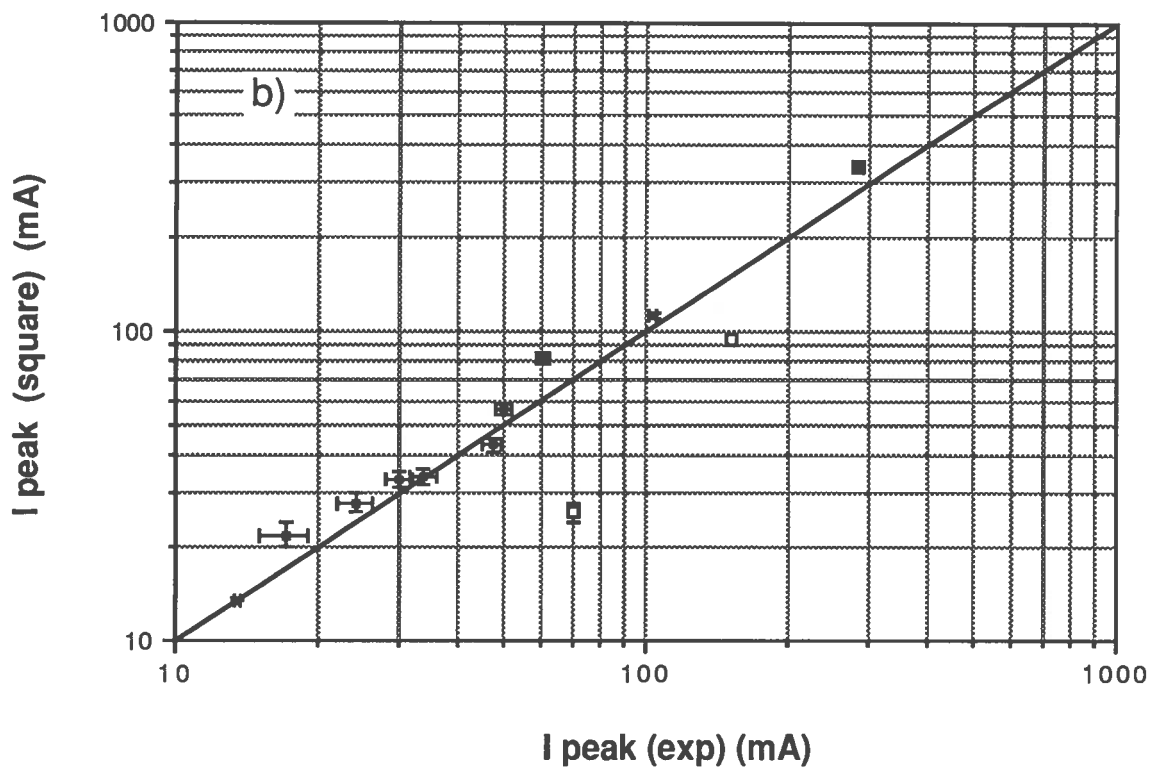
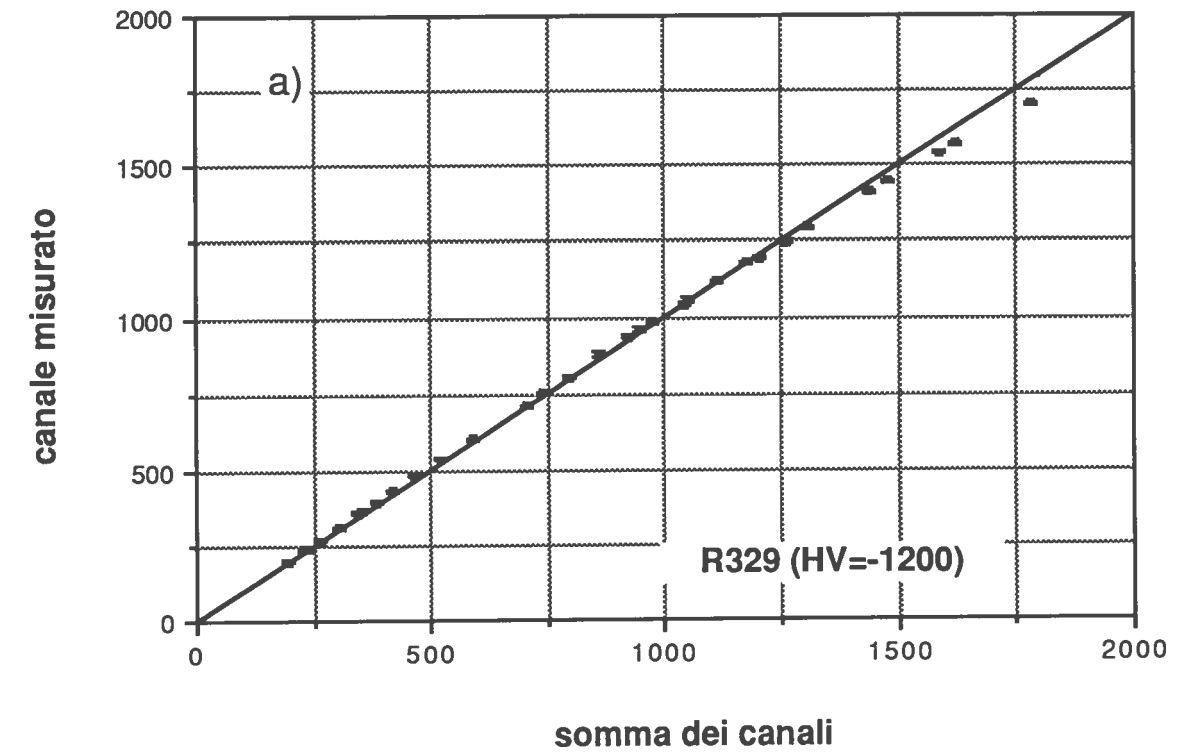
(*) *fototubi da 1.5"*



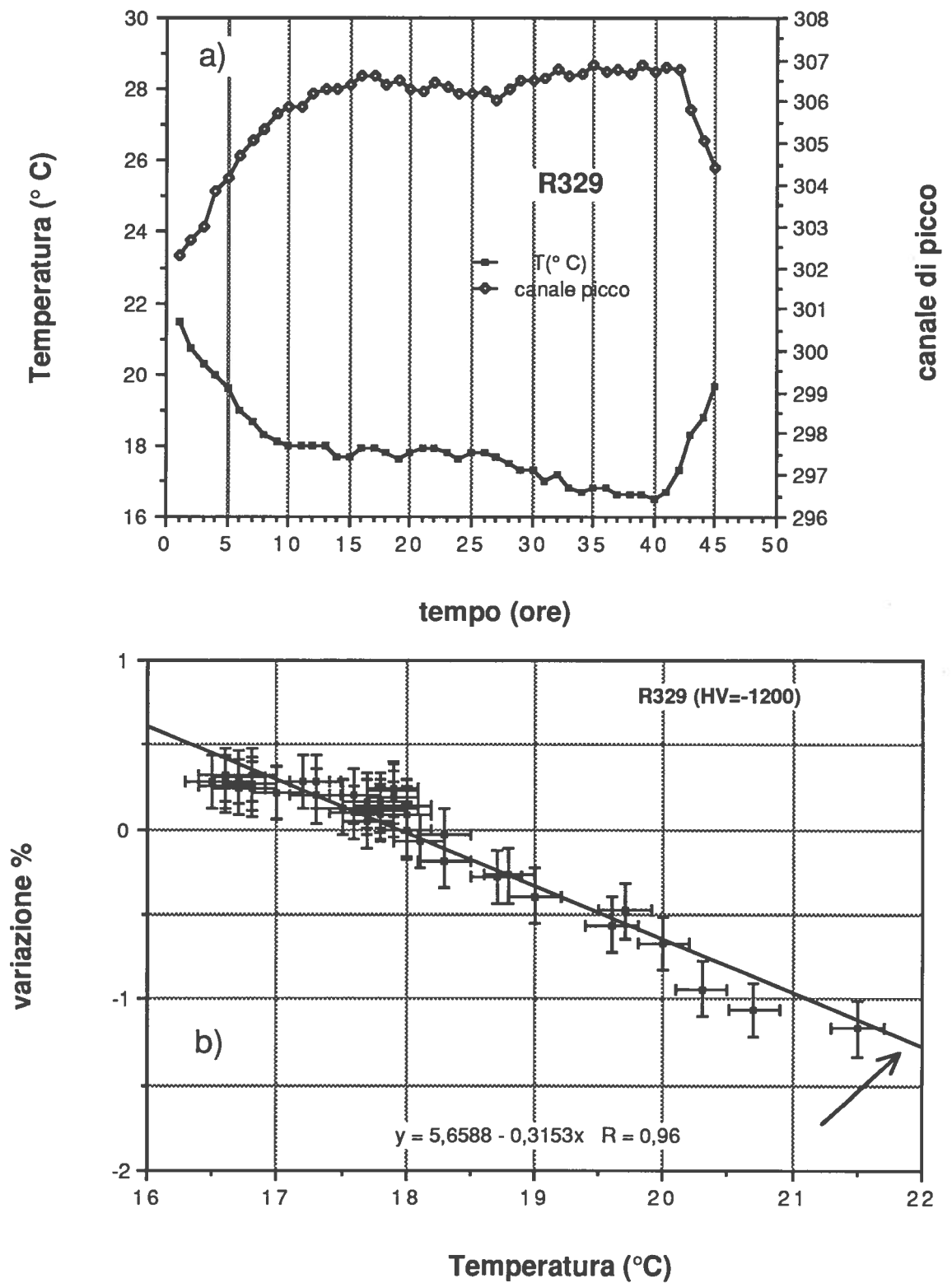
- **FIGURA 1** a) Andamento della risoluzione con sorgente non collimata posta trasversalmente al cristallo BGO in funzione della tensione di alimentazione del fototubo R329. b) Tempo risolutivo (FWHM) della coincidenza BGO-plastico in funzione della tensione di alimentazione del fototubo R580.



- FIGURA 2 a) Risoluzione al Cesio per un cristallo BGO in funzione della distanza del punto di misura dal fotocatodo. b) Uniformità longitudinale in funzione della distanza del punto di misura dal fotocatodo.



- FIGURA 3 a) Curva di linearità con impulsi quadrati per il fototubo R329. b) Confronto fra correnti di picco massime ottenute con impulsi quadri ed esponenziali nei diversi fototubi.



- **FIGURA 4** a) Andamento del canale di picco di un *Light Pulser* e della temperatura ambiente in funzione del tempo. b) Variazione percentuale del canale di picco in funzione della temperatura.

