



Indice

Introduzione	2
1 Il sistema per il tempo di volo (TOF) dell'esperimento AMS	4
1.1 L'esperimento AMS	4
1.2 Il sistema TOF	6
1.3 Misura del tempo di volo attraverso contatori a scintillazione	7
1.4 Funzioni del sistema TOF	9
2 Scelta dei fotomoltiplicatori per il sistema TOF	15
2.1 Generalità sui fotomoltiplicatori	15
2.2 Il fotocatodo	16
2.3 I dinodi	17
2.3.1 Caratteristiche generali	17
2.3.2 Amplificazione in corrente	19
2.4 Il partitore resistivo	20
2.5 Risoluzione temporale	22
2.6 Sorgenti di rumore termico: la corrente di buio	23
2.7 I fotomoltiplicatori R5900 Hamamatsu	24
2.7.1 Caratteristiche tecniche nominali	24
3 Misure di calibrazione dei fotomoltiplicatori R5900	37
3.1 Metodologia delle misure	38
3.2 Risultati delle misure	42
3.3 Classificazione dei fotomoltiplicatori in triplette	42

3.4	Simulazione degli effetti del partitore resistivo sulle misure di guadagno	44
4	Trattamenti di spazializzazione dei fotomoltiplicatori R5900 per l'esperimento AMS	62
4.1	Il problema delle scariche dei conduttori in gas a bassa pressione . .	62
4.1.1	Scarica a scintilla	63
4.1.2	Scariche distruttive: bagliore ed effetto corona	64
4.1.3	Potere delle punte: effluvio	65
4.2	L'incapsulamento (" <i>Potting</i> ")	66
4.2.1	Confronto delle misure di guadagno su un fotomoltiplicatore R5900 prima e dopo il trattamento di incapsulamento . .	68
4.3	Il rivestimento (" <i>Coating</i> ")	69
4.4	Prove di vibrazione meccanica	71
4.5	Schermatura dal campo magnetico	73
	Conclusioni	77
	Appendice 1: il database dei fotomoltiplicatori R5900 a disposizione per il montaggio del sistema TOF	79

Introduzione

Il lavoro sperimentale su cui si basa questa tesi è stato condotto in collaborazione con uno dei gruppi di ricerca responsabili della costruzione dello spettrometro magnetico per il progetto *AMS* di ricerca di nuclei di antimateria nello spazio.

L'esperimento viene descritto nel primo capitolo con un particolare rilievo sul sistema per la misura del tempo di volo, la cui realizzazione è interamente a cura del gruppo italiano di Bologna; il tempo di volo viene comunemente indicato con la sigla *TOF*, dalle iniziali della traduzione in inglese di questa grandezza (*Time Of Flight*) e con la stessa sigla viene identificato il sistema in costruzione.

Esso si compone di quattro piani di contatori a scintillazione plastici, visti in entrambi i lati da tre fotomoltiplicatori con la funzione di trasformare la luce di scintillazione prodotta dai contatori in segnali elettrici.

Il secondo capitolo è dedicato appunto ai fotomoltiplicatori, che sono l'oggetto del lavoro sperimentale che questa tesi vuole presentare. Dopo una trattazione introduttiva delle caratteristiche generali di un fotomoltiplicatore, viene presentato il tipo di dispositivo scelto per l'esperimento *AMS* ovvero il modello *R5900 Hamamatsu*. Nella seconda parte del capitolo verranno esposti i criteri su cui si è basata la scelta; vedremo che quello con la maggior priorità è stato l'accordo con le limitazioni in peso, ingombro e potenza elettrica che distinguono un esperimento spaziale.

Nel terzo capitolo viene esposta la parte principale del mio lavoro di tesi; avendo in totale 56 scintillatori (14 per ognuno dei quattro piani) è stato infatti necessario procedere ad una caratterizzazione individuale dei 336 fotomoltiplicatori che verranno loro abbinati allo scopo di individuare la relazione che lega il loro fattore di guadagno alla tensione di alimentazione.

Le misure di caratterizzazione condotte su 380 fotomoltiplicatori (di cui il 10% viene tenuto come riserva), vengono descritte nel terzo capitolo sia dal punto di vista fisico che metodologico. Vengono presentati i risultati delle calibrazioni, alcune

statistiche di interesse ed i criteri adottati per selezionare i sei fototubi che andranno montati su ciascun contatore. In appendice A vengono riassunti i risultati della caratterizzazione di ciascun fotomoltiplicatore in forma di tabella). Il capitolo termina con i risultati di una simulazione dell'apparato sperimentale utilizzato per le misure allo scopo di stimarne gli effetti sulle risposte dei fototubi e, come vedremo, sono consistenti con le prove sperimentali eseguite a confronto.

L'ultimo capitolo prende infine in considerazione i trattamenti a cui abbiamo sottoposto i fotomoltiplicatori allo scopo di renderli idonei alle particolari condizioni di lavoro che dovranno affrontare nello spazio; si è provveduto in particolare ad un isolamento elettrico in grado di prevenire fenomeni di scarica correlati alle bassissime pressioni tipiche dello spazio. Il problema delle scariche è spiegato brevemente come introduzione al capitolo che termina con la descrizione dettagliata delle due tecniche di spazializzazione applicate e con un accenno al problema del campo magnetico.

La prima delle due appendici è, come già accennato, il resoconto in forma di tabella dei dati salienti relativi ai 380 singoli fotomoltiplicatori scelti per il montaggio finale sui plastici scintillatori del sistema TOF; essi sono stati selezionati dalla banca dati realizzata ad uso interno del gruppo *AMS* che raccoglie sia le caratteristiche tecniche fornite dalla casa costruttrice (*Hamamatsu Photonics K. K.*) che i risultati delle misure condotte in laboratorio per ognuno dei dispositivi a disposizione.

Nella seconda appendice, che conclude la tesi, è raccolta la documentazione fornita dalla ditta *Hamamatsu Photonics K. K.* riguardo ad alcune caratteristiche dei fototubi *R5900* emerse dai test condotti in azienda.

Capitolo 1

Il sistema per il tempo di volo (TOF) dell'esperimento AMS

1.1 L'esperimento AMS

AMS è l'acronimo di *Alpha Magnetic Spectrometer* e si propone come un esperimento spaziale per la ricerca di nuclei di antimateria nella radiazione cosmica. L'apparato che si intende realizzare è uno spettrometro magnetico di grande accettazione alla cui costruzione sta lavorando un'ampia collaborazione internazionale di cui fanno parte: Cina, Finlandia, Francia, Germania, Italia, Russia, Svizzera e Stati Uniti.

Il programma di ricerca prevede la raccolta di dati per almeno tre anni a partire dal 2001 presso la stazione permanente *Alpha* (ISSA) situata a circa 400 km di distanza dalla Terra che verrà raggiunta dall'apparato *AMS* durante un'apposita missione dello Space Shuttle. In questo arco di tempo il volume sensibile di *AMS* verrà attraversato, secondo le stime, da 10^{10} particelle, permettendo di raccogliere una quantità rilevante di dati con una sensibilità migliore di un fattore $\approx 10^5$ rispetto a quelle raggiunte dagli esperimenti condotti precedentemente con palloni aereostatici e satelliti.

Uno dei più recenti (luglio 1993) è, per esempio, "BESS"[2], che ha compiuto la ricerca di antinuclei con uno spettrometro magnetico a magnete superconduttore condotto ad una quota di 36.5 km da un pallone. Analizzando tutti gli eventi acquisiti durante 13 ore di misure ($\approx 10^5$) non è stata osservata la presenza di antimateria;

è stato comunque posto un limite superiore alla sensibilità degli esperimenti in questo campo. In termini di rapporto ${}^4\overline{He}/He$, si è raggiunto finora il valore di 10^{-5} mentre per *AMS* si prevede una sensibilità di 10^{-9} .

Qualora la ricerca di antinuclei abbia successo si avrebbe un'evidenza diretta della presenza di domini di antimateria nell'universo, predetta da alcuni modelli teorici sull'evoluzione cosmica.

Se esistono quantità significative di antimateria primordiale l'anti-Elio è la forma più probabile da trovare; le teorie sulla composizione dell'universo alle sue origini e sulla formazione delle stelle lo indicano infatti come l'elemento più abbondante dopo l'Idrogeno [3], [4].

Antiprotoni e positroni non sono invece indicativi della presenza di antimateria risalente all'origine dell'universo in quanto questi vengono prodotti dalla collisione dei raggi cosmici con il mezzo interstellare.

I tre elementi principali che costituiscono l'apparato, evidenziati in figura 1.1, sono:

- Un magnete permanente costituito di blocchi di materiale ferromagnetico (Nd-Fe-B) racchiusi da pareti cilindriche in alluminio; la forma cilindrica è stata scelta nel tentativo di ottimizzare il tutto dal punto di vista del peso conservando nello stesso tempo un alto potere analizzatore che è di 0.15 Tm^2 .
- Un sistema per la rivelazione di tracce collocato all'interno del magnete. Si compone di 6 strati di strisce di Silicio allineate ("*Wafers*" di Silicio o *Microstrips*) in grado di ricostruire una traccia con una precisione dell'ordine di $10 \mu\text{m}$; anche se il sistema si presenta come una serie di sottili strutture planari ha dato comunque prove di buona stabilità meccanica durante i test di vibrazione a cui è stato sottoposto finora.
- Un sistema per la misura del tempo di volo posto alle due estremità circolari del magnete permanente, che verrà descritto in dettaglio nel seguito.

Il tutto verrà assemblato sulla struttura cilindrica del magnete le cui dimensioni sono 80 cm di altezza e 114 cm di diametro; dovrà inoltre far fronte alle limitazioni di peso, ingombro e consumo tipiche di un esperimento spaziale. Secondo le specifiche della NASA in proposito, *AMS* non dovrà pesare, globalmente, più di 3000 kg e avrà a disposizione una potenza massima di 1000 W.

Attualmente si sta lavorando alla costruzione dell'apparato che funzionerà durante un volo di prova previsto per l'Aprile del 1998 sulla navetta *Discovery*; si tratta di una missione preliminare in cui l'apparato prototipo di *AMS* raccoglierà dati per circa 100 ore allo scopo di fare misure ad ampia statistica riguardo lo spettro di antiprotoni nei raggi cosmici.

L'obiettivo principale di queste misure è il tentativo di individuare eventuali deviazioni dallo spettro convenzionale descritto dal modello *Leaky Box* [6] per la propagazione dei raggi cosmici all'interno della nostra galassia, attribuibili ad altre sorgenti di anti-protoni; un esempio di queste possibili sorgenti alternative può essere l'annichilazione di particelle come i *neutralini*, candidati dai modelli teorici di supersimmetria come costituenti la materia oscura [7], che rientra fra gli oggetti di indagine del programma di ricerca dell'esperimento *AMS*.

La rivelazione di antiprotoni sarà favorita dalla presenza di un contatore Cherenkov ad aereogel posto nella parte inferiore dell'apparato, che permetterà una separazione di antiprotoni dagli elettroni fino ad un impulso di circa 4 Gev/c.

1.2 Il sistema TOF

Il sistema per il tempo di volo nell'esperimento *AMS* consiste essenzialmente in due telescopi per raggi cosmici posti rispettivamente sopra e sotto il magnete permanente; ciascuno è costituito da due piani sovrapposti di contatori a scintillazione per un totale di quattro piani sorretti da una struttura di supporto in *honeycomb* (materiale molto leggero a base di alluminio a nido d'ape). L'orientazione dei plastici fra piani consecutivi è ortogonale in modo da consentire una localizzazione delle particelle a due coordinate.

La figura 1.2 ci mostra l'assemblaggio dei contatori di un piano. Ognuno dei quattro piani è costituito di 14 contatori a scintillazione plastici ¹ larghi 11 cm, di spessore uguale ad 1 cm e di lunghezza variabile tra 72 e 136 cm, in modo da ricoprire una superficie circolare del diametro di circa 140 cm, corrispondente all'apertura del magnete permanente. L'orientazione dei plastici fra piani consecutivi è ortogonale in modo da consentire una localizzazione delle particelle a due coordinate.

¹I plastici scelti sono *Bycron* di tipo *BC408*, caratterizzato da un indice di rifrazione $n=1.58$

Tutti i contatori sono visti alle estremità da tre fotomoltiplicatori *R5900 Hamamatsu* (di cui parleremo in dettaglio nel capitolo seguente) che ricevono la luce di scintillazione attraverso guide di luce trapezoidali realizzate in plexyglass (materiale ritenuto adatto per esperimenti spaziali dalle specifiche della *NASA* in proposito). Per la scelta della forma delle guide di luce ci si è basati principalmente sulla ricerca della massima uniformità nella risposta dei tre fotomoltiplicatori, cercando di ridurre la dipendenza di questa dal punto di impatto della particella lungo il contatore.

Si è osservato che, riducendo la lunghezza della parte trapezoidale delle guide, si riesce a limitare la regione di non uniformità presso le estremità dei contatori a pochi centimetri; i fotoni prodotti in queste zone riescono infatti a raggiungere direttamente il catodo dei fototubi senza subire riflessioni interne e senza quindi dar luogo a disomogeneità marcate dovute ad una distribuzione disuguale della luce verso i tre fotomoltiplicatori [8].

In figura 1.4 possiamo vedere un contatore completo di tutte le parti previste per il montaggio sui piani del sistema TOF. Abbiamo innanzitutto una copertura in sottile fibra di carbonio alluminata su tutta la lunghezza dello scintillatore; vediamo inoltre i particolari della connessione dei fotomoltiplicatori con le guide di luce. Il contatto ottico è realizzato tramite pastiglie in silicone morbido di dimensioni $22 \times 22 \text{ mm}^2$ di superficie per 3 mm di spessore. In precedenza si era utilizzato il plexyglass che però, essendo più rigido, sottoponeva maggiormente la finestra vitrea del fotomoltiplicatore ai danneggiamenti da parte delle compressioni esterne come quelle esercitate dalle viti attraverso cui il fototubo viene spinto verso la guida di luce dello scintillatore per creare adesione.

1.3 Misura del tempo di volo attraverso contatori a scintillazione

Il principio su cui si basa la misura del tempo di volo con contatori a scintillazione di grande superficie in esperimenti di fisica delle particelle è schematizzato in figura 1.5.

Quando una particella attraversa l'area sensibile del contatore incidendo a distanza, rispettivamente, x e $L - x$ dai due fotomoltiplicatori posti ai lati, la luce di

scintillazione si propaga in entrambe le direzioni con velocità u , viene raccolta e trasformata in un impulso elettrico.

I segnali prodotti ai vengono poi inviati a due discriminatori a soglia che, a loro volta, li convogliano in due canali di un *TDC* (*Time to Digital Converter*) che ha il compito di registrare i due istanti di arrivo T_1 e T_2 rispetto ad un segnale di riferimento comune, solitamente fornito da una logica elettronica dedicata alla selezione degli eventi (denominata *trigger*).

Noti i tempi di risposta dei due fotomoltiplicatori è possibile risalire al tempo di passaggio della particella nel contatore T_0 (riferito al tempo dato dal *trigger*) e alla coordinata del punto di impatto della particella combinando opportunamente le relazioni che esprimono la dipendenza dei tempi dalla geometria del contatore e dalla velocità della luce attraverso di esso:

$$T_1 = T_0 + \frac{x}{u} + C_1 \quad (1.1)$$

$$T_2 = T_0 + \frac{L - x}{u} + C_2 \quad (1.2)$$

C_1 e C_2 sono costanti dipendenti dal ritardo indotto dai cavi di connessione con l'elettronica di controllo.

Per quanto riguarda la posizione del punto di impatto avremo:

$$x = \frac{u}{2}(T_1 - T_2) + Costante \quad (1.3)$$

Per quanto riguarda il tempo T_0 , l'espressione che otteniamo dalle 1.1 e 1.2 è indipendente dalla posizione:

$$T_0 = \frac{T_1 + T_2}{2} + Costante \quad (1.4)$$

Chiamando T_0^A e T_0^B i tempi di attraversamento misurati da due contatori A e B (riferiti allo stesso tempo di trigger) a distanza D , la loro differenza ΔT rappresenta il *tempo di volo* della particella:

$$\Delta T_{tof} = T_0^A - T_0^B \quad (1.5)$$

Dal tempo di volo si può risalire alla velocità della particella v :

$$v = \frac{D}{\Delta T_{tof}} \quad (1.6)$$

Nel caso di *AMS*, avendo quattro piani di contatori sovrapposti a due a due, siamo in grado di fare due misure indipendenti della velocità della particella e di determinare il suo verso di percorrenza; il segnale che parte da ciascun lato dei contatori è la somma passiva delle risposte anodiche dei tre fotomoltiplicatori.

1.4 Funzioni del sistema TOF

Le funzioni per cui è stato pensato il sistema TOF di *AMS* sono essenzialmente tre; la prima è quella di fornire un primo livello di selezione delle particelle che attraverseranno lo spettrometro nel corso della missione. È necessario operare una cernita di questo tipo in quanto i nuclei di antimateria che *AMS* si propone di cercare come suo scopo primario rappresentano una frazione molto piccola del totale di raggi cosmici a cui sarà esposto.

La seconda funzione consiste nella determinazione della velocità delle particelle attraverso la misura del tempo di volo che si è descritta nel paragrafo precedente. La risoluzione prevista per la determinazione del tempo di volo è dell'ordine dei 100 *ps*, dato che sembra essere confermato dalle caratterizzazioni dei singoli contatori a scintillazione attualmente in corso nei laboratori del gruppo di Bologna; ciò permetterà una determinazione di velocità in grado di separare gli antiprotoni dalle altre particelle di carica $Z=1$ e di impulso fino a circa 1.5 *GeV*.

Gli eventi di carica unitaria verranno selezionati tramite la coincidenza, entro 30 *ns*, delle risposte dei quattro piani. La determinazione del valore assoluto $|Ze|$ della carica elettrica delle particelle rappresenta la terza delle funzioni del sistema; questa avviene attraverso una misura di perdita di energia in quattro scintillatori di spessore 1 cm (uno per piano). *AMS* sarà in grado di raggiungere una risoluzione sul numero atomico di circa 0.2, sufficiente a distinguere i nuclei degli elementi presenti nei raggi cosmici fino al Ferro ($Z = 26$) [1]; gli eventi di carica unitaria verranno selezionati tramite la coincidenza delle risposte dei quattro piani.

Il segno della carica delle particelle selezionate in questo primo livello verrà poi determinato dal rivelatore tracciante a microstrip, che rappresenta quindi il secondo

livello di selezione degli eventi. L'ultimo livello di selezione sarà interamente fornito dal software presente all'interno dello Shuttle nel corso della missione; questo procederà ad una prima analisi dei dati raccolti escludendo tutti quelli relativi ad eventi non interessanti e trasmettendo i risultati definitivi a terra.

1.4. Funzioni del sistema TOF

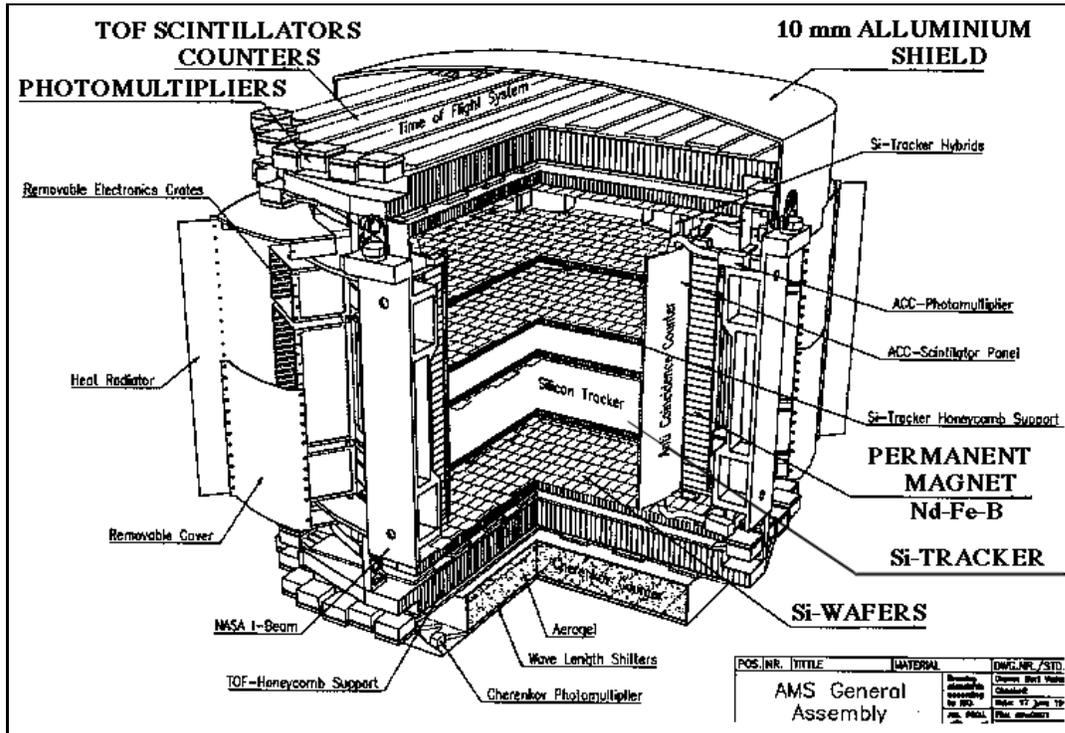


Figura 1.1: Costruzione schematica dell'apparato AMS. Sono evidenziati i tre elementi principali: magnete permanente, sistema tracciante e sistema per il tempo di volo.

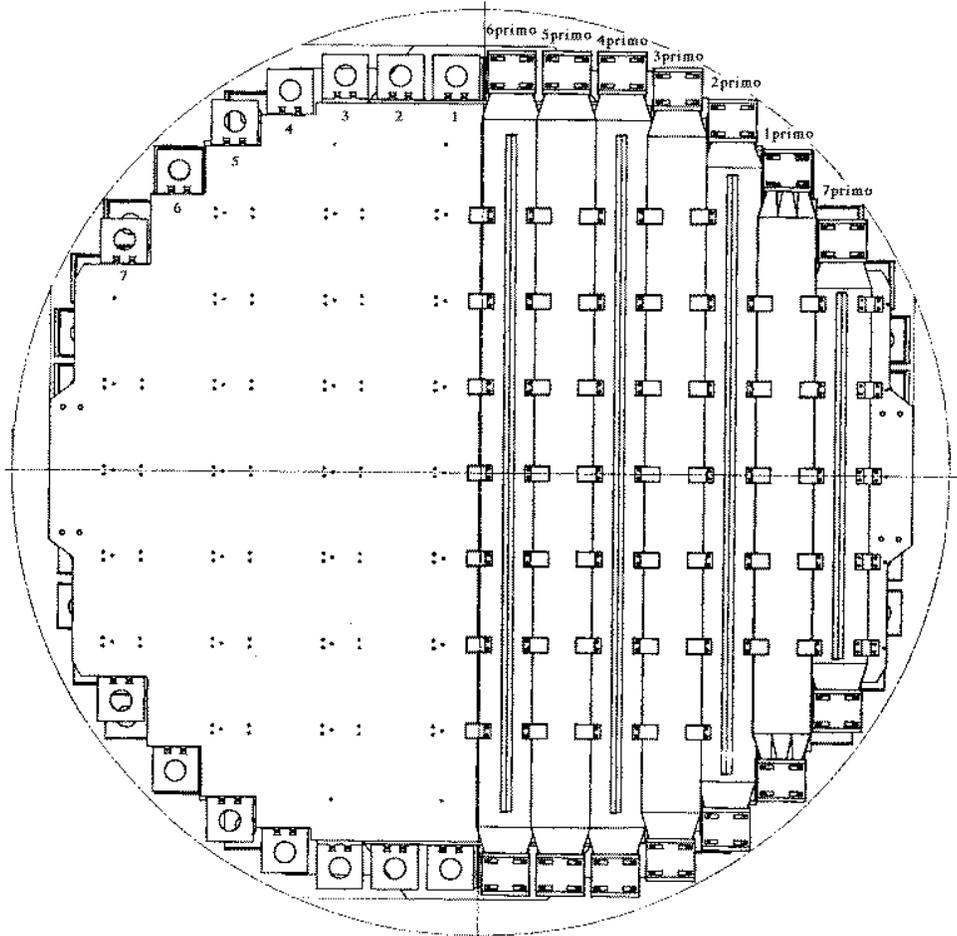


Figura 1.2: Disegno meccanico di un piano di contatori a scintillazione del sistema per il tempo di volo di *AMS*. La figura e le diciture contenute in essa si riferiscono al piano prototipo su cui è stato fatto un test vibrazionale nel mese di Febbraio.

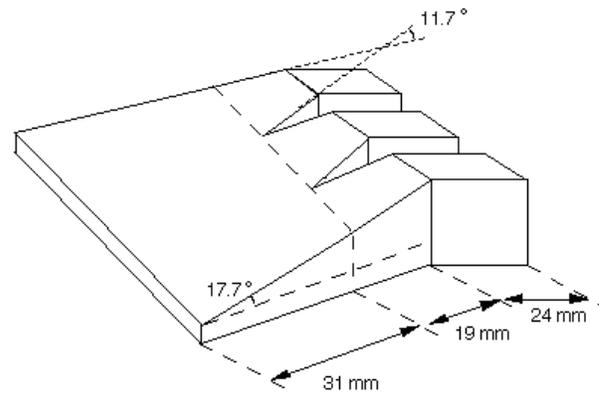


Figura 1.3: Disegno finale delle guide di luce per i contatori a scintillazione.

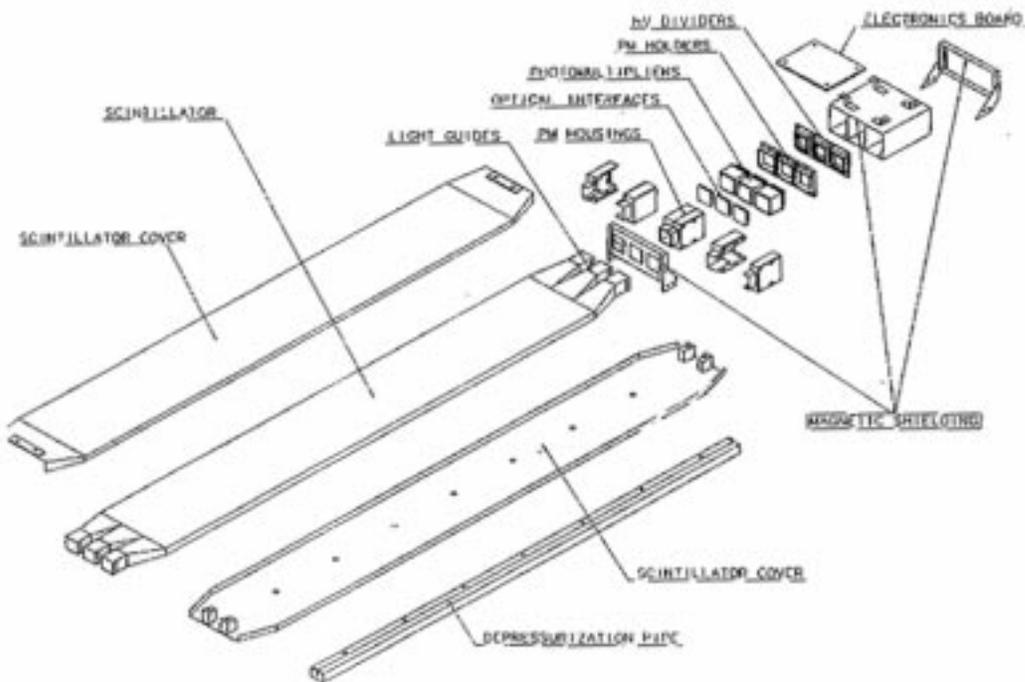


Figura 1.4: Schema delle varie parti che costituiscono i contatori a scintillazione nella loro configurazione finale.

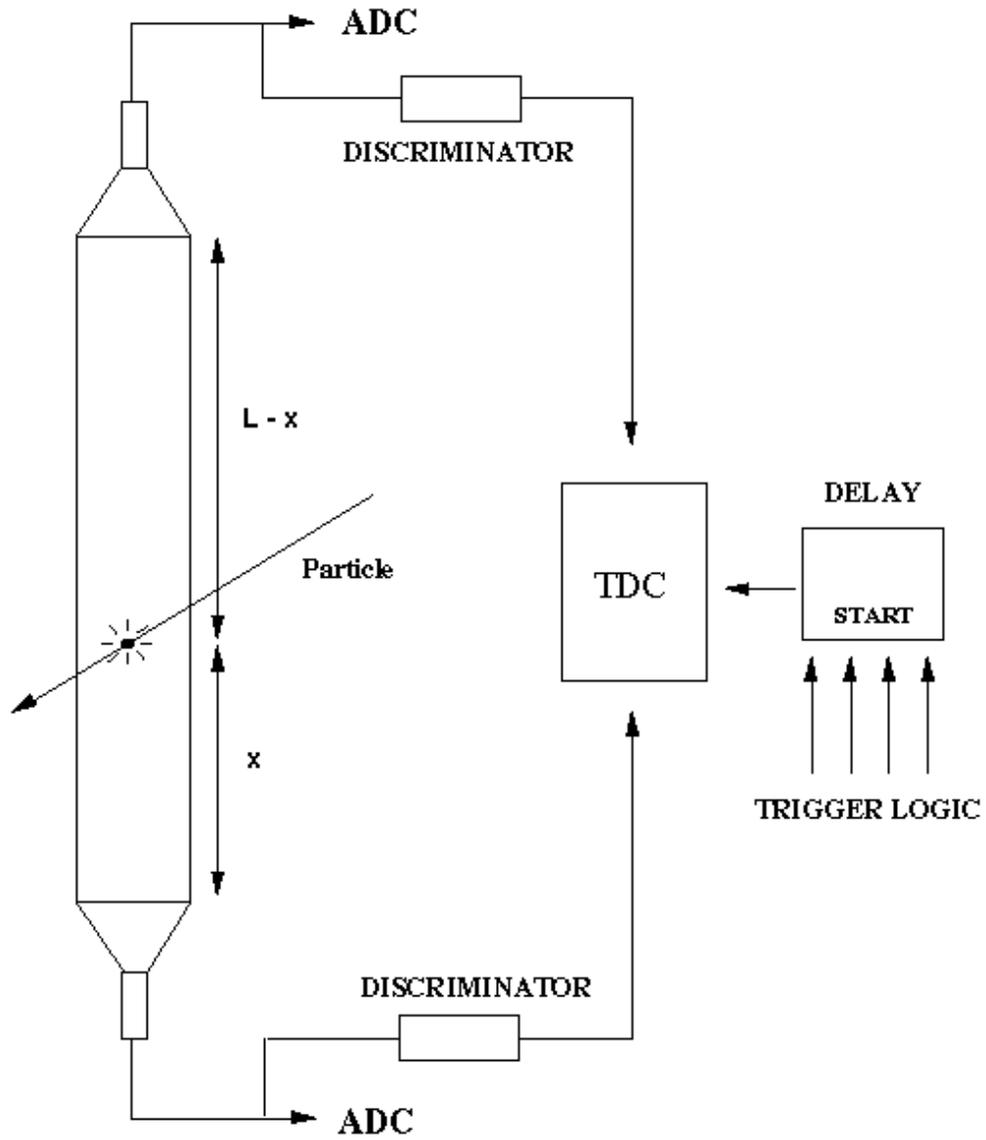


Figura 1.5: Uso di scintillatori per la rivelazione del tempo di volo.

Capitolo 2

Scelta dei fotomoltiplicatori per il sistema TOF

2.1 Generalità sui fotomoltiplicatori

Un fotomoltiplicatore è essenzialmente un tubo a vuoto costituito da una finestra trasparente alla luce posta su un elettrodo fotosensibile (catodo) e da una sezione di elettrodi moltiplicatori di elettroni (dinodi) in grado di convertire il passaggio di luce in un segnale di corrente rivelabile all'anodo.

In figura 2.1 possiamo vedere la costruzione schematica di un fotomoltiplicatore; il funzionamento di tutto il dispositivo è basato sul meccanismo di emissione di elettroni da parte del catodo per effetto fotoelettrico, stimolato dai fotoni che compongono la luce entrante.

La debole corrente di fotoelettroni prodotta inizialmente dal catodo viene focalizzata da un apposito elettrodo verso il primo dinodo dove ha inizio un processo a catena di emissione secondaria di elettroni che prosegue lungo i dinodi successivi fino al raggiungimento dell'anodo, il quale raccoglie la corrente finale (aumentata di un fattore fino a 10^6 , 10^8 rispetto a quella iniziale) e la fornisce in uscita.

2.2 Il fotocatodo

Il tipo di conversione fotoelettrica che avviene all' interno di un fotomoltiplicatore è di tipo "interna", ovvero i fotoelettroni vengono eccitati nella banda di conduzione del materiale che, nel caso del fotocatodo, è un semiconduttore.

Secondo il modello a bande sviluppato dalla meccanica quantistica, un semiconduttore è caratterizzato da una regione di stati di energia "proibita" agli elettroni che separa la banda di valenza dalla banda di conduzione. Possiamo inoltre definire l'affinità elettronica come l' intervallo di energia compreso tra la banda di conduzione ed il cosiddetto "livello del vuoto", indicativo dell'energia necessaria perchè un elettrone eccitato possa sfuggire alla superficie del fotocatodo. La funzione di lavoro Φ è invece l'intervallo energetico che separa il livello di Fermi dal livello del vuoto.

Dato che l'emissione fotoelettrica dipende, come appena detto, dal raggiungimento di un certo livello di energia, si tratta di un processo probabilistico: non tutti gli elettroni eccitati dall'arrivo di fotoni saranno in grado di superare il livello del vuoto per cui è interessante avere una stima della quantità di eventi di fotoemissione osservabili per ciascun fotone incidente. Questo tipo di informazione è dato dall'efficienza quantica, funzione della frequenza della luce incidente:

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{P_\nu}{K} \left(\frac{1}{1 + 1/KL} \right) P_s \quad (2.1)$$

R = coefficiente di riflessione

P_ν = probabilità che l'elettrone venga eccitato oltre il livello del vuoto

K = coefficiente di assorbimento

L = cammino libero medio di fuga degli elettroni eccitati

P_s = probabilità che l'elettrone eccitato venga emesso come fotoelettrone

P_s dipende fortemente dall'affinità elettronica del materiale e aumenta al diminuire di essa; quest' ultima può essere resa addirittura negativa qualora venga creata una zona di svuotamento con l'aggiunta di un materiale elettropositivo (tipicamente si ricorre ad ossidi di metalli alcalini), aumentando la probabilità di avere fotoemissione. L'efficienza quantica può allora essere definita come il numero di fotoelettroni emessi dal catodo rispetto al numero di fotoni incidenti. In figura 2.2 possiamo

vedere la dipendenza funzionale dell'efficienza quantica di un fotomoltiplicatore dalla lunghezza d'onda del flusso luminoso visto dal fotocatodo.

I fotoni con lunghezza d'onda minore trasportano un'energia maggiore rispetto agli altri ($E = \frac{hc}{\lambda}$) per cui daranno un contributo superiore alla probabilità di osservare fotoemissione.

Un altro parametro con cui è possibile descrivere la risposta spettrale di un fotomoltiplicatore è la sensibilità luminosa, grandezza definita sia per il catodo che per l'anodo.

Per sensibilità luminosa del catodo si intende la corrente da esso prodotta divisa per il flusso luminoso (misurato in lumen) proveniente da una lampada al Sodio la cui distribuzione di temperatura è massima a 2856 K.

Ricordiamo che il lumen è un'unità di misura definita come il flusso di un Lux attraverso una superficie di 1 m²; un Lux è la luminanza prodotta da una sorgente luminosa di una candela. Dato che si tratta di una grandezza riferita alla sensibilità visuale dell'occhio umano (mentre l'intervallo spettrale di sensibilità di un fotomoltiplicatore può essere più esteso) è possibile riferirsi alla sensibilità *raggiante* ("radiant sensitivity"), ovvero alla corrente fotoelettrica fornita dal catodo rispetto al flusso incidente ad una certa lunghezza d'onda; questa grandezza viene misurata in $\frac{A}{W}$.

Un parametro utile per il confronto delle risposte spettrali dei fotomoltiplicatori è la sensibilità al blu del catodo, ovvero la corrente che si ottiene in uscita qualora venga applicato un filtro blu di fronte al fotomoltiplicatore che intercetti la luce diretta verso il fotocatodo. Questa grandezza assume importanza nelle applicazioni con contatori a scintillazione dato che la lunghezza d'onda della luce emessa da questi si colloca solitamente nella regione blu-verde del visibile.

2.3 I dinodi

2.3.1 Caratteristiche generali

La funzione di moltiplicazione della corrente primaria di fotoelettroni svolta dalla catena di dinodi di un fotomoltiplicatore si basa sul fenomeno di emissione secondaria degli elettroni, la cui teoria è molto simile a quella dell'emissione fotoelettrica in cui il ruolo del fotone viene esercitato, questa volta, dall'elettrone.

Nell'impatto si ha un trasferimento diretto di energia agli elettroni che costituiscono

il materiale del dinodo; questa energia permette l'estrazione di un certo numero di elettroni secondari.

Analogamente al caso del fotocatodo, anche nella scelta del materiale in cui realizzare i dinodi si ricorre a semiconduttori o isolanti, visto che un metallo ostacolerebbe la fuga degli elettroni a causa delle cariche libere che contiene; il materiale di seconda emissione viene comunque depositato sopra ad un supporto conduttore in modo da garantire la stabilità del campo elettrico che accelera e guida il flusso di elettroni fra un dinodo e l'altro. Una procedura comune è la deposizione di una lega di metalli alcalini (o alcalino-terrosi) e di metalli più "nobili", per esempio Cu-Be oppure Cs-Sb; durante il processo di miscela solo il metallo alcalino ossida creando una copertura isolante su supporto conduttore. Esistono vari tipi di dinodi caratterizzati ognuno da una propria amplificazione in corrente, uniformità ed efficienza di emissione secondaria dipendenti dalla struttura e dal numero di stadi presenti nel fotomoltiplicatore; in figura 2.3 possiamo vedere alcune fra le tipologie più diffuse:

Nella configurazione *a tendina veneziana* ("venetian blind"), i dinodi sono disposti ad un angolo di 45 gradi rispetto all'asse della cascata di elettroni; questo permette di avere un'ampia area di raccolta degli elettroni primari all'interno di una struttura di dimensioni lineari contenute.

Per quanto riguarda la risoluzione temporale, le migliori prestazioni sono fornite dai fotomoltiplicatori con dinodi focalizzati linearmente ("linear focused"), in cui gli elettroni vengono riflessi da un dinodo a quello successivo.

Anche la linearità della risposta è migliore in questa configurazione, mentre il modello a tendina veneziana presenta buona linearità in un intervallo di correnti anodiche meno ampio (fino circa a 40 mA); in questo intervallo di correnti la qualità della linearità è però confrontabile con quella offerta dai dinodi focalizzati linearmente e, dal punto di vista dei costi, risulta più vantaggioso l'uso dei fototubi a tendina veneziana.

La configurazione di tipo *fine mesh* è stata invece studiata per applicazioni in presenza di forte campo magnetico; all'interno dei fotomoltiplicatori con questo tipo di dinodi, infatti, gli elettroni sono poco influenzati dalla componente di campo magnetico lungo la direzione del campo elettrico che li accelera. Quando un elettrone urta la parte superiore della "mesh" (si tratta essenzialmente di una griglia metallica), la superficie depositata sopra provoca l'emissione di elettroni secondari ed il processo prosegue fino all'ultimo stadio di dinodi. L'insensibilità al campo magnetico è dovuta principalmente alla maglia fine della griglia di cui è composto

il dinodo che consente una minor spaziatura tra elettrodi successivi e, quindi, una minore perturbazione della traiettoria degli elettroni.

È proprio attraverso lo studio della traiettoria degli elettroni all'interno del fotomoltiplicatore che è possibile ottimizzare la progettazione degli elettrodi per minimizzare il tempo di transito. Agendo sulla configurazione degli elettrodi e, quindi, sul campo elettrico che agirà sugli elettroni in moto è infatti possibile stabilirne il cammino e, soprattutto, ottenere una buona focalizzazione del fascio primario di elettroni dal catodo verso il primo dinodo, da cui dipende maggiormente il fattore di amplificazione; questo è dovuto al fatto che, pur essendo possibile che alcuni elettroni secondari non portino contributo alla moltiplicazione presso i dinodi successivi, si tratta comunque di un effetto non rilevante dato il grande numero di elettroni secondari che vanno formandosi lungo il percorso verso l'anodo.

A questo proposito possiamo introdurre una grandezza indicativa del numero di elettroni che vengono effettivamente intercettati dal primo dinodo; si definisce "efficienza di raccolta" il rapporto degli elettroni che giungono a colpire l'area sensibile del primo dinodo rispetto al numero di fotoelettroni emessi dal fotocatodo. Per area sensibile del dinodo si intende l'area in cui un elettrone incidente in arrivo dal fotocatodo può essere moltiplicato e diretto verso il dinodo successivo senza deviare dalla traiettoria più favorevole acchè ciò avvenga.

L'efficienza di raccolta è una funzione della tensione applicata tra il catodo e il primo dinodo; dalla figura 2.4 possiamo vedere che basta una tensione dell'ordine dei 70 Volt per massimizzarla.

2.3.2 Amplificazione in corrente

Quando un elettrone primario di energia iniziale E_{in} colpisce la superficie di un dinodo, vengono prodotti δ elettroni secondari, dove con δ indichiamo il fattore di emissione secondaria caratteristico del dinodo. Questo parametro è funzione della tensione V che accelera gli elettroni primari in prossimità del dinodo ed è dato dalla seguente espressione:

$$\delta = aV^k \quad (2.2)$$

a = costante moltiplicativa

k = parametro dipendente dalla struttura e dal materiale del dinodo il cui valore è

compreso solitamente fra 0.7 e 0.8.

Quando la corrente di fotoelettroni I_c emessa dal fotocatodo colpisce il primo dinodo vengono prodotti I_{d1} elettroni secondari in funzione del fattore di emissione secondaria che possiamo esprimere come:

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_c} \quad (2.3)$$

Questi elettroni vengono moltiplicati in cascata lungo tutti gli n dinodi di cui è costituito il fotomoltiplicatore fino a raggiungere l'anodo che raccoglierà una corrente I_a pari a:

$$I_a = I_c \alpha \delta_1 \delta_2 \dots \delta_n \quad (2.4)$$

da cui otteniamo il fattore di amplificazione in corrente o *guadagno* del fotomoltiplicatore:

$$G = \alpha \delta_1 \delta_2 \dots \delta_n \quad (2.5)$$

α : efficienza di raccolta del primo dinodo

Nel caso ideale di un'efficienza di raccolta pari ad 1 e avendo n dinodi, è possibile esprimere il guadagno in funzione della tensione di alimentazione:

$$G = a^n \left(\frac{V}{n+1} \right)^{kn} = AV^{kn} \quad (2.6)$$

Da questa espressione vediamo che il fattore di moltiplicazione segue una legge di potenza in funzione della tensione d'alimentazione.

L'andamento esponenziale è graficato in figura 2.5, dove in ascissa abbiamo l'alta tensione e in ordinata il guadagno in scala logaritmica. La misura da cui sono stati presi i dati messi in grafico è stata fatta con un fotomoltiplicatore R5900 Hamamatsu calibrato per l'esperimento AMS.

2.4 Il partitore resistivo

Per utilizzare un fotomoltiplicatore occorre fornire la tensione di alimentazione attraverso un circuito esterno in grado di creare fra tutti gli elettrodi che compongono

il dispositivo una adeguata differenza di potenziale. Il metodo più pratico per raggiungere questo scopo è ricorrere ad un partitore resistivo connesso fra il catodo e l'anodo, ovvero ad una catena di resistenze scelte in modo da produrre la tensione desiderata in ciascun punto del fotomoltiplicatore.

La corrente che attraversa la catena resistiva (*bleeder current*) è, approssimativamente:

$$I_b = \frac{V}{\sum_{i=1}^{n+1} R_i} \quad (2.7)$$

In genere il circuito è progettato in modo che questa corrente abbia un valore molto maggiore di quello della corrente anodica; la variazione percentuale del fattore di guadagno è infatti proporzionale al rapporto delle due correnti ed è dell'ordine dell'1% per una corrente 100 volte superiore alla corrente anodica.

Per le applicazioni a regime impulsato (*pulse mode*, come quello richiesto da *AMS*), dove un fotomoltiplicatore veloce può fornire risposta con un tempo di salita anche dell'ordine di pochi ns, occorre fare un discorso a parte in quanto è possibile avere temporanee cadute di potenziale dovute ad improvvisi picchi di corrente. Per evitare questo gli ultimi stadi di dinodi vengono generalmente mantenuti a potenziale costante tramite l'aggiunta di capacitori ausiliari in grado di fornire la carica necessaria a compensare il picco di corrente per poi ricaricarsi subito dopo. Uno schema semplificato può essere quello di figura 2.6.

Connettendo il partitore resistivo al fotomoltiplicatore, generalmente, si fa in modo di mettere l'anodo a terra applicando quindi una corrente negativa al catodo. Questa configurazione è particolarmente vantaggiosa nelle applicazioni di temporizzazione in cui è necessario che il dispositivo elettronico esterno raccolga direttamente il segnale prodotto all'anodo senza la perturbazione dei componenti intermedi che si avrebbero nella configurazione opposta; mettendo infatti il catodo a terra e applicando una tensione positiva all'anodo occorrerebbe frapporre un capacitore disaccoppiante in grado di separare il segnale dalla tensione positiva che però influirebbe negativamente dal punto di vista dell'informazione temporale che si vuole ricevere. Ponendo il catodo a terra, l'accorgimento da adottare sarà un buon isolamento dell'involucro del fotomoltiplicatore allo scopo di evitare scariche o altri tipi di fughe di corrente.

In prossimità degli ultimi dinodi, quando la densità di elettroni comincia ad essere molto grande, è possibile che si verifichino fenomeni di carica spaziale che possono disturbare la corrente di fotoelettroni che fluisce lungo la catena di mol-

tiplicazione; fra i compiti di un partitore resistivo ci sarà allora quello di fornire maggiore tensione presso gli ultimi elettrodi in modo che gli elettroni vengano sottoposti ad una maggiore accelerazione in questa regione migliorando la linearità della risposta finale.

2.5 Risoluzione temporale

Il tempo di risposta di un fotomoltiplicatore è caratterizzato da due fattori principali: le variazioni nel tempo di transito dei singoli fotoelettroni e il rumore statistico.

Il tempo di transito dei fotoelettroni è determinato dall'energia con la quale questi vengono estratti dal fotocatodo e che fa sì che questi percorrano un certo cammino piuttosto che un altro.

Chiaramente gli elettroni provenienti da direzioni trasversali percorreranno tragitti più lunghi rispetto a quelli diretti lungo la normale al primo dinodo; l'effetto sarà ulteriormente accentuato da eventuali asimmetrie nella geometria di quest'ultimo. Una soluzione tipicamente adottata a questo proposito è l'applicazione di un campo elettrico focalizzante non uniforme in grado di imprimere maggiore accelerazione agli elettroni provenienti dai bordi del fotocatodo.

Un altro limite alla risoluzione temporale è costituito dalle fluttuazioni dovute alla natura statistica dei processi di emissione fotoelettrica e secondaria, ovvero dal cosiddetto rumore statistico; questo fa sì che, anche mantenendo costante l'intensità della luce che arriva al fotocatodo, il numero di fotoelettroni prodotti fluttui nel tempo.

Le fluttuazioni statistiche della corrente anodica possono avere origine sia dal fotocatodo che dalla catena dinodica; per quanto riguarda il catodo si assume una distribuzione poissoniana per il numero di fotoni incidenti ed una distribuzione binomiale per il numero di fotoelettroni rilasciati.

Per le fluttuazioni generate dalla catena dei dinodi il discorso è analogo; occorre però tenere conto anche di eventuali non uniformità nei fattori di emissione secondaria dei vari elettrodi. Una stima globale di queste variazioni, che comunque contribuiscono solo per il 10 % al rumore statistico totale, può essere fatta a partire dallo studio dello spettro di singolo fotoelettrone, che verrà discusso in dettaglio più avanti.

2.6 Sorgenti di rumore termico: la corrente di buio

Anche in assenza di illuminazione all'interno di un fotomoltiplicatore passa una piccola quantità di corrente chiamata "corrente di buio" il cui insorgere è dovuto a parecchie cause. La componente principale di tutte le sorgenti di corrente di buio è il rumore termico che caratterizza per esempio l'emissione termoionica da parte di catodo e dinodi che, avendo superfici composte di materiali con bassa funzione di lavoro, sono in grado di emettere anche a temperatura ambiente.

Il contributo termico alla corrente di buio è descritto dall'equazione di Richardson che prevede un andamento esponenziale rispetto alla tensione di alimentazione:

$$I = AT^2 e^{(-\frac{e\Phi}{kT})} \quad (2.8)$$

dove:

A = costante moltiplicativa

T = temperatura assoluta

e = carica dell'elettrone

Φ = funzione di lavoro

k = costante di Boltzmann

Un'altra causa di rumore è costituita dalle correnti di fuga (*leakage*) lungo i supporti degli elettrodi o presso i piedini per la connessione con i circuiti esterni; la riduzione di questo tipo di rumore attraverso l'isolamento dei componenti non è facile a causa delle piccole correnti in gioco che richiedono un'alta qualità dei materiali isolanti: per raggiungere una corrente di buio dell'ordine del nA, per esempio serve una resistenza isolante dell'ordine dei $10^{12} \Omega$.

Si può avere corrente di *leakage* anche a causa di contaminazioni come umidità e grasso, per cui è importante mantenere il fotomoltiplicatore in condizioni pulite e di bassa umidità. Il fenomeno di *leakage* è più accentuato alle basse tensioni dopodiché prevale l'andamento esponenziale del rumore di origine termica.

Possiamo identificare altre sorgenti di corrente di buio nella ionizzazione di gas residui presenti all'interno del fotomoltiplicatore nonostante l'alto livello di vuoto presente (dell'ordine di 10^{-4} mmHg). Le molecole di questi gas possono essere ionizzate per collisione con gli elettroni e provocare valanghe spurie il cui effetto è ravvisabile in un impulso di corrente che appare subito dopo quello della fotocorrente principale (*afterpulse*).

2.7 I fotomoltiplicatori R5900 Hamamatsu

2.7.1 Caratteristiche tecniche nominali

I fotomoltiplicatori che verranno montati sui contatori a scintillazione del sistema per la rivelazione del tempo di volo di *AMS* sono l'ultima generazione del modello *R5900* sviluppato dall'Hamamatsu Photonics; questo tipo di fotomoltiplicatori è particolarmente adatto alle applicazioni di tipo aereospaziali essendo piuttosto leggero (25 gr di peso) e presentando dimensioni molto ridotte ($2.5 \times 2.5 \times 3 \text{ cm}^2$), compatibilmente con le specifiche dettate dalla NASA per il peso globale dell'intero apparato *AMS*.

La compattezza di questi fotomoltiplicatori è visibile in figura 2.7, dove è possibile vedere anche le dimensioni dell'area fotosensibile ($1.8 \times 1.8 \text{ cm}^2$), realizzata in materiale bialcalino; la sezione di amplificazione è costituita da 10 stadi di dinodi a tendina veneziana.

La risposta spettrale degli *R5900* si estende nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 300 e 600 nm con un massimo attorno ai 400 nm in corrispondenza del quale abbiamo un'efficienza quantica del 20% circa (si veda, a proposito la figura 2.8).

La figura 2.9 mostra una tipica forma d'onda di uscita dei fotomoltiplicatori; possiamo notare che la risposta è piuttosto veloce, avendo un tempo di salita di circa 1.5 ns e una dispersione del tempo di transito dei fotoelettroni di circa 0.26 ns (FWHM).

La minimizzazione di quest'ultimo parametro è stato il criterio principale con cui la casa produttrice ha scelto i rapporti fra le resistenze del partitore resistivo consigliato per i fotomoltiplicatori *R5900*. A questo scopo sono stati studiate le caratteristiche temporali delle risposte usando 3 circuiti distinti con i seguenti rapporti di partizione (a partire dal catodo verso l'anodo):

1. 1.5:1.5:1.5:1:1:1:1:1:1:0.5
2. 1:1:1:1:1:1:1:1:1:1
3. 2:2:2:1:1:1:1:1:1:1

La seguente tabella riporta i risultati forniti dalla casa mediando sulle risposte di 6 fotomoltiplicatori:

PARTITORE RESISTIVO	TEMPO DI SALITA (ns)	TEMPO DI TRANSITO (ns)	DISPERSIONE DEL T. DI TRANSITO (ps)
1	1.58	8.76	241
2	1.49	8.99	290
3	1.60	9.00	260

Sulla base di queste considerazioni la casa costruttrice ha proposto l'uso del primo tipo di partitore che, perciò, è stato adottato per l'alimentazione dei fotomoltiplicatori di *AMS*; in figura 2.10 possiamo vedere lo schema elettrico del circuito realizzato.

La somma delle resistenze che costituiscono il circuito è di 26 M Ω che, nelle condizioni di lavoro in cui opereranno i fototubi (HV = 750-800 V), daranno luogo ad una corrente di *bleeder* dell'ordine dei 30 μ A mentre per le correnti anodiche si stima circa 30 nA, compatibilmente con quanto detto nella sezione 2.10 di questo capitolo.

Un ulteriore pregio di questo tipo di fotomoltiplicatori è la capacità di raggiungere un alto fattore di guadagno con una tensione di alimentazione relativamente bassa; bastano infatti 800 V per ottenere una moltiplicazione dell'ordine di 10^6 . Questo viene incontro alle esigenze di un esperimento spaziale dove viene richiesta, fra le altre cose, la minima dissipazione per ciascun componente; *AMS*, come accennato nel primo capitolo, una volta raggiunto lo spazio avrà a disposizione una potenza totale di 1000 W, che dovrà bastare ad alimentare tutti i componenti elettronici che costituiscono l'apparato. Stimando per il valore delle correnti anodiche un massimo di 40 μ A e per la tensione di alimentazione un valore limite di 800 V, i 336 fotomoltiplicatori che verranno utilizzati non dovrebbero dissipare più di 10.8 Watt.

In figura 2.11 è possibile verificare quanto detto a proposito del guadagno degli R5900; vediamo infatti che, a 800 V, la distribuzione dei guadagni nominali dei fotomoltiplicatori in dotazione al gruppo *AMS* parte da un minimo di 10^6 fino ad un massimo di circa 5.2×10^6 .

I valori riportati nell'istogramma 2.11 sono stati determinati dall'Hamamatsu attraverso la misura della corrente catodica ed anodica del fotomoltiplicatore sottoposto ad un flusso luminoso noto; il rapporto di queste due grandezze fornisce infatti il fattore di guadagno in accordo con le considerazioni che seguono.

Supponendo di utilizzare il fotomoltiplicatore esponendolo ad una sorgente lu-

minosa costante (assunzione lecita entro brevi intervalli di tempo), la corrente emessa dal fotocatodo si può esprimere come:

$$I_{ph}(v) = LS_{ph}(v) \quad (2.9)$$

L : flusso luminoso

S_{ph} : sensibilità luminosa del catodo

v : tensione presente fra il catodo ed il primo dinodo

Analogamente la corrente anodica è data da:

$$I_a(V) = GI_{ph}(v) = LS_a(V) \quad (2.10)$$

dove:

V : tensione di alimentazione

G : fattore di amplificazione (guadagno)

$S_a(V)$: sensibilità luminosa dell'anodo.

Possiamo allora ricavare il guadagno del fotomoltiplicatore dal rapporto delle due sensibilità luminose secondo la seguente espressione:

$$G = \frac{S_a(V)}{S_{ph}(v)} = \frac{I_a(V)}{I_{ph}(v)} \quad (2.11)$$

Come vedremo più avanti, per ciascun fotomoltiplicatore è stata fatta un'altra misura di guadagno in laboratorio seguendo un metodo completamente indipendente che, comunque, ha fornito risultati compatibili.

Nelle figure 2.12 e 2.13 possiamo vedere altre distribuzioni relative alle caratteristiche tecniche degli R5900 fornite dalla ditta; gli istogrammi sono stati realizzati basandosi su di un campione di 400 fotomoltiplicatori.

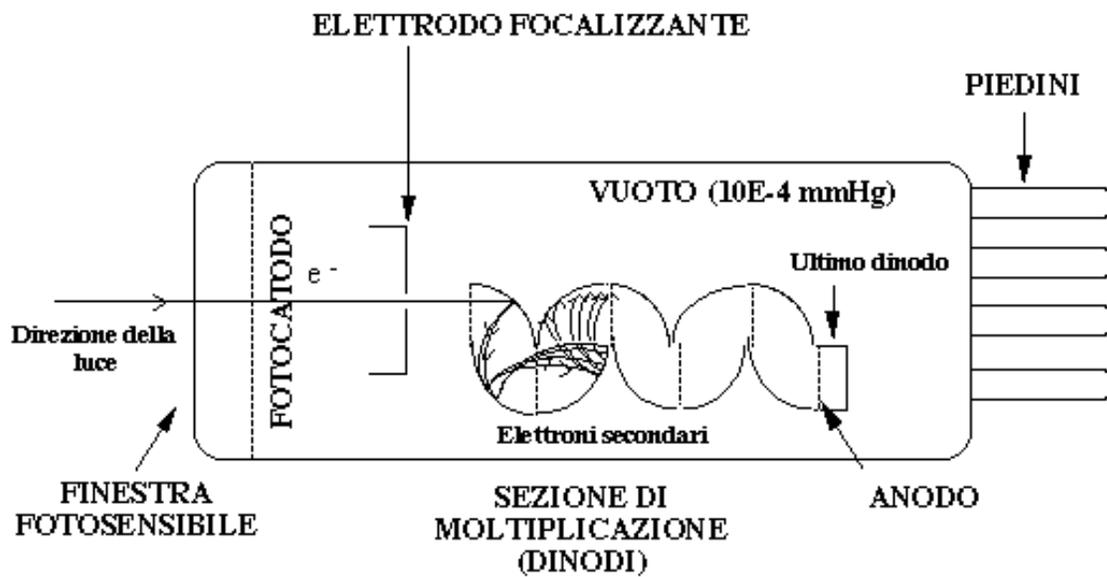


Figura 2.1: Schema semplificato della struttura e del funzionamento di un fotomoltiplicatore.

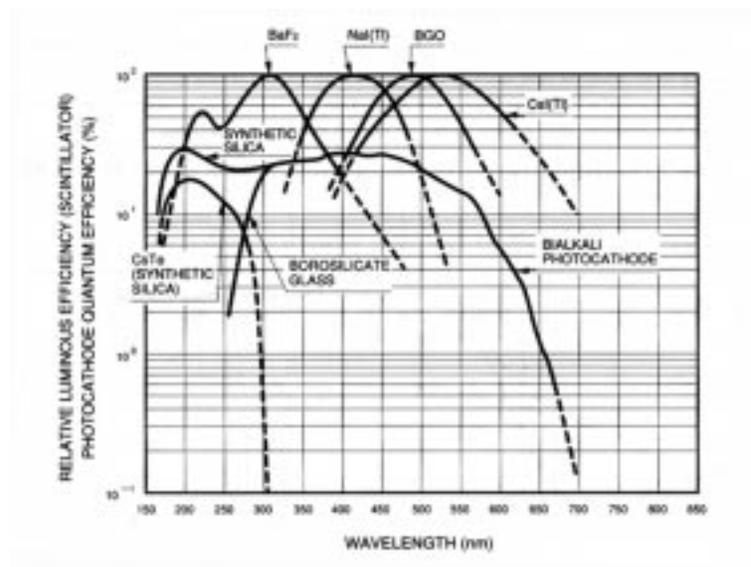


Figura 2.2: Efficienza quantica di un fotomoltiplicatore in funzione della lunghezza d'onda della luce incidente sul fotocathode. Sono evidenziate anche le curve relative alla sensibilità dei tipi più comuni di contatori a scintillazione.

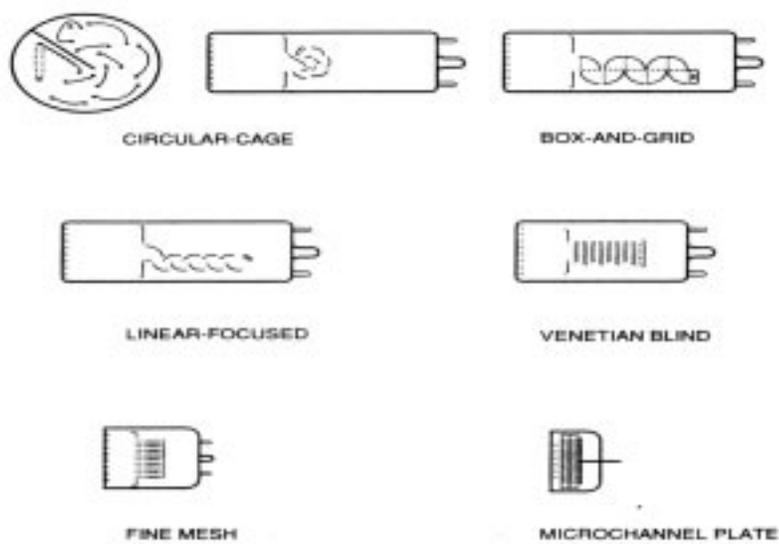


Figura 2.3: Alcuni tipi di dinodi usati nei fotomoltiplicatori.

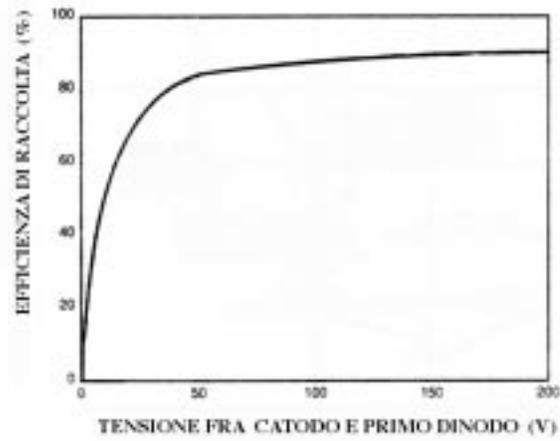


Figura 2.4: Efficienza di raccolta del primo dinodo in funzione della tensione applicata fra questo ed il catodo.

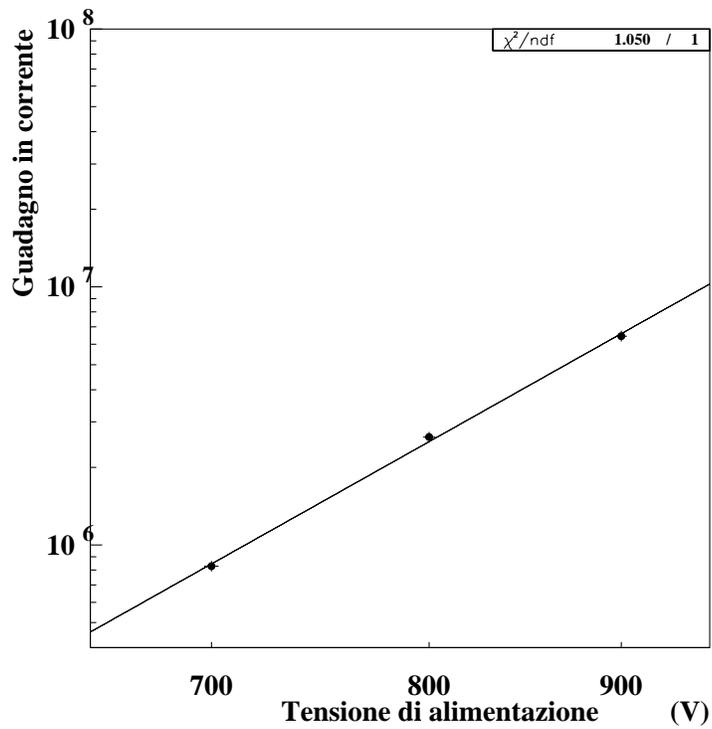


Figura 2.5: Curva ricavata dai valori misurati di guadagno di un fotomoltiplicatore R5900 in funzione della tensione di alimentazione; il guadagno è in scala logaritmica, la curva interpolante è un'esponenziale.

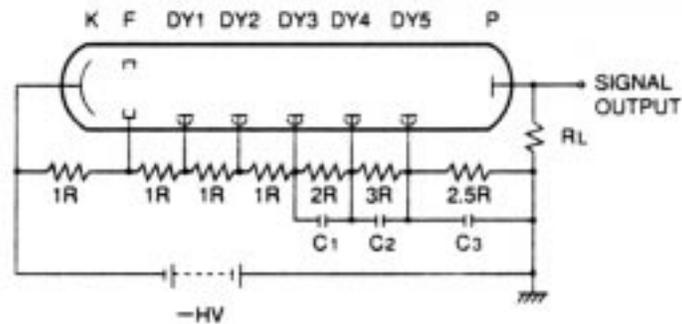


Figura 2.6: Schema elettrico di un partitore resistivo nella configurazione in cui l'anodo del fotomoltiplicatore è posto a terra.

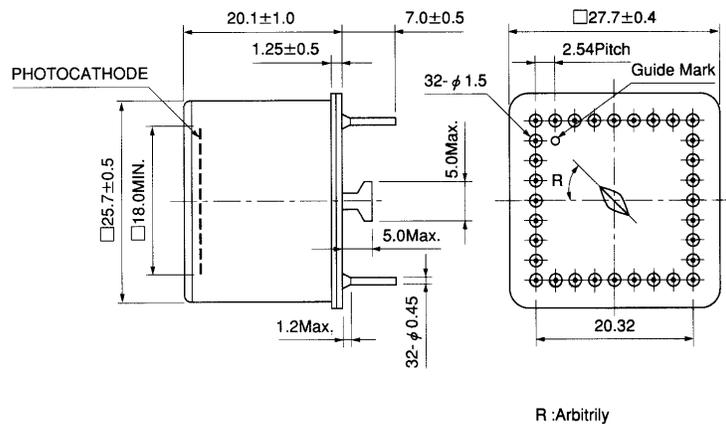


Figura 2.7: Profili dimensionali dei fotomoltiplicatori R5900 in unità di millimetri.

2.7. I fotomoltiplicatori R5900 Hamamatsu

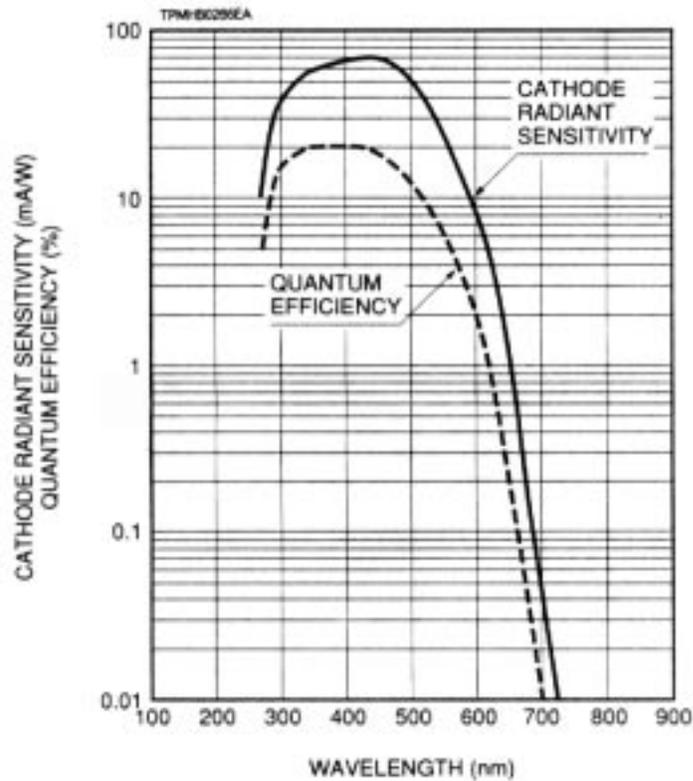


Figura 2.8: Risposta spettrale tipica di un R5900. Ricordiamo che per sensibilità raggiante si intende la corrente fotoelettrica emessa dal catodo divisa per il flusso luminoso incidente ad una data lunghezza d'onda.

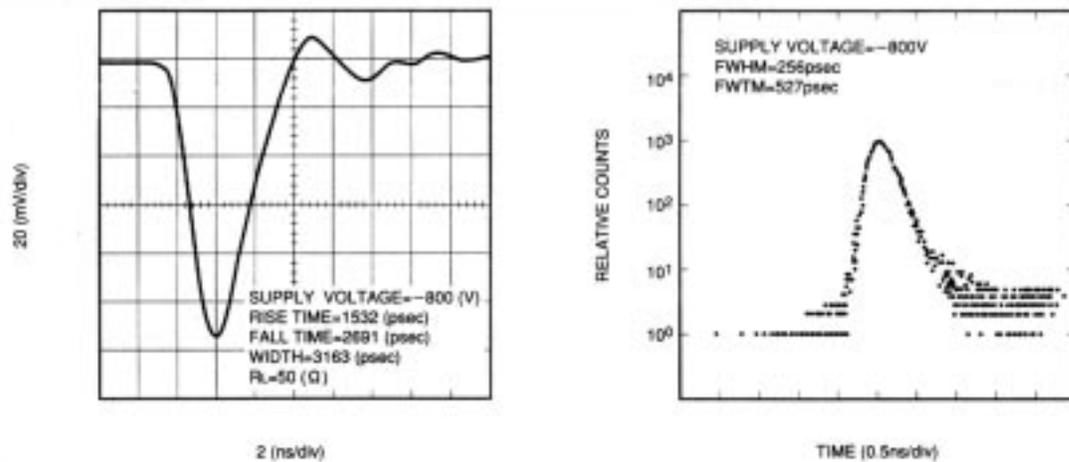


Figura 2.9: Risposta temporale tipica di un R5900. Sulla destra possiamo vedere la dispersione del tempo di transito dei fotoelettroni.

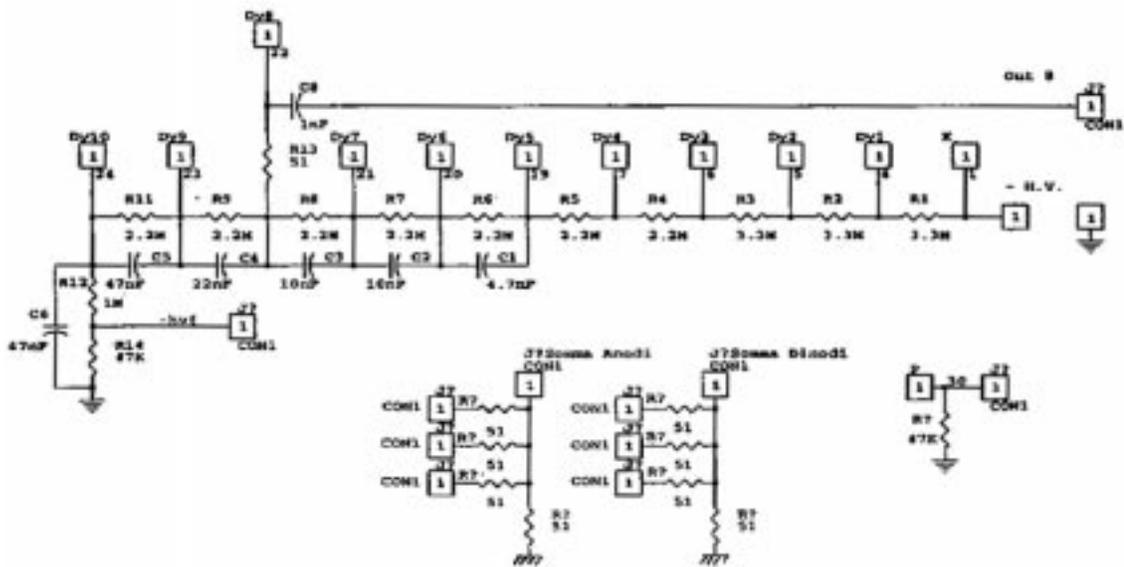


Figura 2.10: Schema elettrico del partitore resistivo progettato per i fotomoltiplicatori R5900.

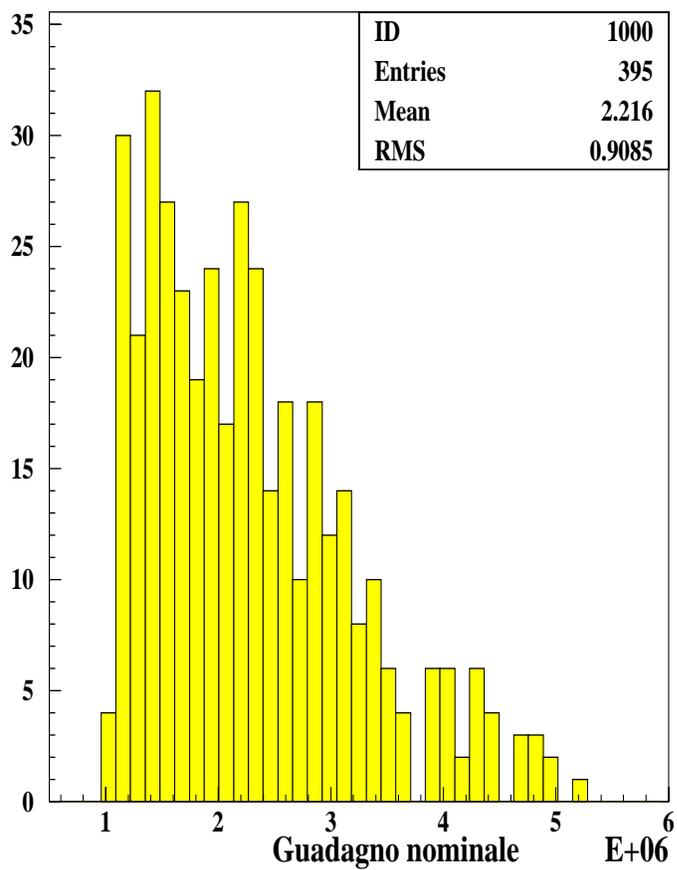


Figura 2.11: Distribuzione dei guadagni nominali dei fotomoltiplicatori *R5900* in corrispondenza di una tensione di alimentazione di 800 V.

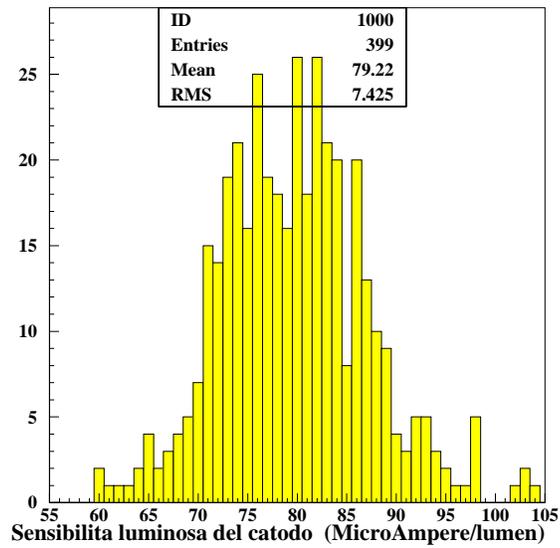


Figura 2.12: Distribuzione della sensibilità luminosa del catodo.

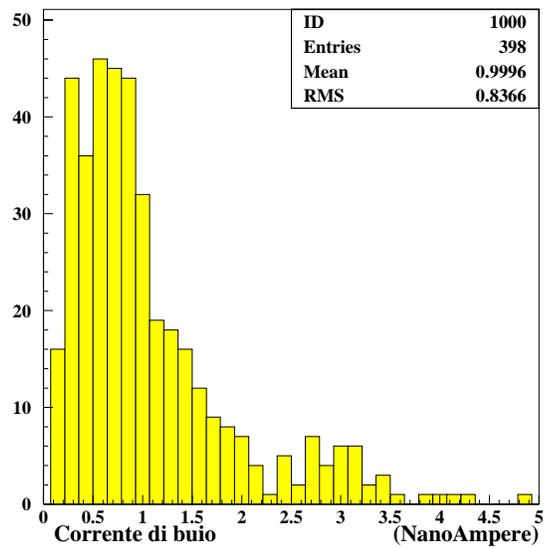


Figura 2.13: Distribuzione della corrente di buio.

Capitolo 3

Misure di calibrazione dei fotomoltiplicatori R5900

Ciascuno dei fotomoltiplicatori che verranno montati nel sistema per il tempo di volo di *AMS* è stato calibrato allo scopo di controllarne il corretto funzionamento e, soprattutto per ottenere una seconda misura di guadagno con un metodo indipendente da quello usato dalla casa costruttrice (descritto più avanti) e ricavare la funzione che lega il guadagno alla tensione di alimentazione; per fare questo è stato fatto funzionare il fotomoltiplicatore a 3 tensioni differenti, misurando per ciascuna di esse il fattore di amplificazione ottenuto. Dai tre punti sperimentali è stata interpolata una curva esponenziale i cui parametri hanno permesso di ricavare la tensione necessaria per ottenere il guadagno desiderato; in questo modo si è ricavata la tensione di lavoro a cui ognuno dei fotomoltiplicatori verrà fatto funzionare nel corso dell'esperimento.

Le misure di caratterizzazione sono state fatte utilizzando una sorgente luminosa impulsata, per avere compatibilità con il tipo di luce prodotta da un contatore a scintillazione a cui verranno abbinati i fotomoltiplicatori per svolgere la loro funzione in *AMS*.

Come si può notare dalla figura 3.1, gli impulsi luminosi sono stati inviati tramite un diodo emettitore di luce (*LED*) impulsato ad una frequenza di 300 Hz; questo ed i fotomoltiplicatori sono stati racchiusi in una cassa a tenuta di luce attrezzata in modo da consentire la caratterizzazione contemporanea di 6 fototubi.

Il segnale anodico di ognuno è stato collegata ad un canale *ADC* (*Analog To*

Digital Converter) letto via software e successivamente analizzato. L'ADC di cui si è fatto uso è di tipo "CIA" (*Charge Integrated ADC*) che integra e digitalizza il segnale usando contemporaneamente due diverse scale; una con una risoluzione di 0.25 pC per canale e l'altra con 0.25×7.5 pC per canale. In questo modo si ha una risoluzione migliore per i segnali di carica più bassa; l'uso di questo strumento si è reso necessario per la misura degli spettri di singolo fotoelettrone.

Per la regolazione del segnale diretto al LED è stato usato un *LED DRIVER* programmabile in grado di fornire segnali di larghezza compresa tra 1 e 500 ns e di altezza compresa tra 0 e 20 V.

3.1 Metodologia delle misure

Il metodo di calibrazione adottato per i fototubi R5900 di AMS è basato su alcune considerazioni riguardo la risposta di un fotomoltiplicatore ad un impulso luminoso. Questa si può esprimere come:

$$R = GN \quad (3.1)$$

dove:

G : fattore di moltiplicazione

N : numero di fotoelettroni prodotti dal catodo

Per quanto riguarda la varianza della risposta, occorre sommare in quadratura sia l'incertezza statistica che quella dovuta al rumore elettronico (σ_e):

$$\sigma_r^2 = (G\sqrt{N})^2 + N\sigma_s^2 + \sigma_e^2 \quad (3.2)$$

Il primo termine tiene conto della statistica poissoniana che governa il processo di fotoemissione del LED e, di conseguenza, il numero di fotoelettroni raccolti, mentre il secondo contiene la varianza sulla risposta ad un singolo fotoelettrone (σ_s^2). L'espressione si può semplificare introducendo la grandezza δ_s che definiamo come:

$$\delta_s = \frac{\sigma_s}{G} \quad (3.3)$$

Supponendo di poter trascurare il rumore elettronico avremo l'espressione finale:

$$\frac{\sigma_r^2}{R} = G(1 + \delta_s^2) \quad (3.4)$$

In questa espressione possiamo riconoscere l'equazione di una retta che ha in ascissa la risposta del fotomoltiplicatore (ci riferiamo al valor medio) e in ordinata la sua varianza; la pendenza di questa retta è proporzionale al guadagno del fotomoltiplicatore con un fattore di proporzionalità dipendente dalla grandezza δ_s , che possiamo interpretare come risoluzione della risposta di singolo fotoelettrone.

Nelle misure sperimentali, allo scopo di calcolare il guadagno dei fotomoltiplicatori tenendo conto delle considerazioni precedenti, sono stati acquisiti i dati relativi alla risposta di ciascun fototubo impulsando il *LED* con segnali di diversa ampiezza e misurando la carica totale raccolta dall'anodo dei fotomoltiplicatori con un *gate* di 200 ns sul CIA.

Per questo si è agito sull'altezza dell'impulso variandola nell'intervallo compreso tra 6 e 20 V mantenendo costante la durata a 12 ns; è stato comunque verificato che, entro gli errori sperimentali, la variazione in durata ad altezza costante fornisce gli stessi risultati. Per ogni variazione di ampiezza la risposta è stata approssimata con una curva gaussiana, costruendo una serie di punti sperimentali con la media e la varianza di quest'ultima da cui è stata ricavata una retta del tipo della 3.4. La pendenza di questa retta, come già detto, ci fornisce il guadagno del fotomoltiplicatore a meno di un fattore $(1 + \delta^2)$.

Per la determinazione di questo fattore occorre studiare la risposta del fotomoltiplicatore nella cosiddetta "regione di singolo fotoelettrone" con la quale si suole indicare il livello di illuminazione incidente sul fotocatodo tale che non più di uno o due fotoelettroni riescano ad essere emessi da quest'ultimo. In occasione del test su fascio del contatore prototipo *AMS - 01* presso il *CERN* di Ginevra (condotto da alcuni membri del gruppo *AMS* di Bologna) sono state fatte misure di conteggio dei fotoelettroni nelle condizioni di luminosità descritte sopra, attenuando l'impulso inviato al *LED* di circa 14 db rispetto a quello delle misure in condizioni normali (vedi i parametri in altezza e larghezza specificati sopra).

Uno degli spettri di singolo fotoelettrone acquisiti è rappresentato in figura 3.2; la distribuzione degli eventi è stata approssimata con la funzione:

$$f(x) = C \left(\sum_{N=0}^{10} \frac{k_N}{\sqrt{N\sigma_S^2 + \sigma_P^2} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-NS+P)^2}{2(N\sigma_S^2 + \sigma_P^2)}} \right) \quad (3.5)$$

$$k_N = \frac{\mu^N e^{-\mu}}{N!} \quad (3.6)$$

C : costante di normalizzazione

P, σ_P : valor medio e deviazione standard del piedestallo, rispettivamente

S : posizione del primo picco della risposta di singolo fotoelettrone

σ_S^2 : varianza della risposta di singolo fotoelettrone

μ : numero medio di fotoelettroni emessi

La curva sovrapposta allo spettro di figura 3.2 è stata interpolata con 5 parametri, fra cui due sono noti (P e σ_P); il valore del rapporto $\frac{\sigma_S}{S}$ (ovvero la quantità che avevamo precedentemente chiamato δ_S) è inoltre vincolato dalla pendenza della retta 3.4, per cui si ha un solo parametro libero.

Il risultato finale è stato la determinazione di δ_S :

$$\delta_S = 0.87 \pm 0.15 \quad (3.7)$$

A Bologna è stata ripetuta una misura del genere; l'approssimazione della distribuzione degli eventi di singolo fotoelettrone è stata compiuta con la stessa funzione utilizzata per le misure di Ginevra (la 3.5) ma con soli 3 parametri (la costante moltiplicativa, il numero medio di fotoelettroni e la quantità σ_S), inserendo a parte i valori relativi al piedestallo precedentemente misurati.

I risultati sono visibili in figura 3.3; il valore ottenuto per la risoluzione della risposta di singolo fotoelettrone in questo caso è:

$$\delta_S = 0.80 \pm 0.06 \quad (3.8)$$

Tenendo conto della compatibilità delle misure e del fatto che i fotomoltiplicatori R5900 in uso sono stati selezionati con un'efficienza quantica simile fra loro (circa del 20%), il valore 3.7 per δ_S è stato usato nella determinazione del guadagno di tutti i fototubi calibrati.

Per la costruzione delle rette di risposta di ogni fotomoltiplicatore sono state fatte 7 misure in corrispondenza di 7 variazioni in larghezza dell'impulso inviato al

LED; nel corso di ogni misura sono stati acquisiti 10000 eventi di risposta tramite lettura software dei canali *ADC*. Ognuna di queste acquisizioni ha richiesto circa 7 minuti; tenendo conto che la procedura è stata ripetuta per 3 valori diversi di tensione di alimentazione, ogni ciclo di calibrazione completa ha avuta una durata media di circa 3 ore (considerando anche gli accorgimenti intermedi come la regolazione dell' alimentatore e del Led Driver), permettendo di caratterizzare i fototubi mantenendo una media di 12 al giorno.

In figura 3.4 vediamo una tipica retta di risposta ricavata nel corso della caratterizzazione di un *R5900* a 800 V. Dalla pendenza di questa retta (il parametro *P2* indicato nella figura 3.4) è possibile calcolare il fattore di guadagno del fototubo facendo la conversione da canali *ADC* a Coulomb e correggendo con la risoluzione della risposta di singolo fotoelettrone:

$$G = \frac{P2}{(1 + \delta_S^2)} \frac{A}{e} \quad (3.9)$$

A : fattore di conversione da canali *ADC* a *Coulomb* = 0.25×10^{-12}

e : carica dell'elettrone = 1.6×10^{-19}

δ_S : risoluzione della risposta di singolo fotoelettrone = 0.87 ± 0.15

Una volta calcolato il guadagno a ciascuna delle 3 tensioni (700, 800 e 900 V), è possibile ricavare la funzione di calibrazione vera e propria che mette in relazione il guadagno con la tensione di alimentazione:

Un esempio di curva di calibrazione è stata già vista nel capitolo precedente (figura 2.5); ne riproponiamo un'altra in figura 3.5.

I punti sperimentali raffigurati nella 3.5 si adattano bene alla funzione:

$$\ln G = P2(\ln HV) + P1 \quad (3.10)$$

HV: alta tensione del fototubo in Volt

da cui:

$$G = e^{P2(\ln HV) + P1} = C e^{P2(\ln HV)} \quad (3.11)$$

Da questa curva, noti i parametri, è possibile ricavare la tensione necessaria per far funzionare il fototubo con un guadagno qualsiasi:

$$HV = \exp\left(\frac{\ln G - P1}{P2}\right) \quad (3.12)$$

3.2 Risultati delle misure

Dalle calibrazioni di tutti i fotomoltiplicatori a disposizione di *AMS* sono risultati valori piuttosto compatibili con quelli che ci si aspettava dallo studio delle caratteristiche fornite dalla casa costruttrice. I fattori di guadagno nominali, rappresentano intrinsecamente una sottostima dei valori reali in quanto il rapporto fra la sensibilità anodica e catodica va corretto dividendo il tutto per l'efficienza di raccolta del primo dinodo (valore tipicamente minore di 1 a causa della fotostatistica) di cui si è spiegata l'importanza nel capitolo precedente; dalle misure ci si aspettavano quindi valori leggermente superiori.

Questo sembra confermato dalla distribuzione dei guadagni misurati a 800 V rappresentata in figura 3.7, nella quale viene confrontata con i guadagni nominali. Per quanto riguarda le misure di guadagno effettuate alle tre tensioni che hanno permesso di ricavare la curva di calibrazione, possiamo dire che l'ordine di grandezza 10^6 è stato notato non solo in tutte le misure fatte a 800 V, ma anche a 700 V e a meno. È stata inoltre osservata una buona linearità della risposta fino a 900 V per tutti i fotomoltiplicatori esaminati.

La figura 3.8 ci mostra un quadro sinottico dei risultati di tutte le misure condotte sui 380 fotomoltiplicatori predisposti per il montaggio sui contatori del sistema TOF (336 effettivi più un numero ragionevole di riserve).

Quanto si è detto riguardo all'alto fattore di guadagno in corrispondenza di tensioni di alimentazione basse (rispetto a quelle necessarie in un generico fotomoltiplicatore) trova conferma nella distribuzione delle tensioni di lavoro ricavate dalle curve di calibrazione dei singoli fototubi. Dalla figura 3.9 possiamo infatti notare che per avere un guadagno pari a 10^6 occorre alimentare con una tensione che va da un minimo di circa 650 V ad un massimo di 800 V.

3.3 Classificazione dei fotomoltiplicatori in triplete

Tenendo conto della funzione che svolgeranno i fotomoltiplicatori una volta pronti per funzionare sull'apparato *AMS*, si è pensato di suddividerli in gruppi di tre, in

3.3. Classificazione dei fotomoltiplicatori in triplette

vista del montaggio sui contatori a scintillazione del sistema per il tempo di volo, in grado di accoglierne 3 in ogni lato.

In prima approssimazione, prima delle misure di calibrazione, ci si è basati sui dati nominali cercando, a parità di guadagno, di scegliere fototubi con sensibilità luminosa del catodo differente ma tale da garantire una sensibilità media simile per ognuna delle triplette.

Per far questo è stato realizzato un grafico in cui è stato visualizzata la sensibilità di ciascun fotomoltiplicatore in funzione del guadagno nominale visibile in figura 3.10. Tracciando delle rette parallele all'asse delle ascisse è possibile selezionare fotomoltiplicatori di guadagno simile a varie sensibilità per poi sceglierne tre secondo il criterio grafico rappresentato in figura.

È particolarmente importante avere triplette di fototubi con tensioni di lavoro simili in quanto è stato osservato sperimentalmente che l'equalizzazione in tensione dei tre fotomoltiplicatori montati presso lo stesso lato di un contatore a scintillazione ottimizza la risoluzione temporale nelle misure di tempo di volo. Questo risultato è comprensibile dato che, a tensioni simili anche il tempo di transito dei fotoelettroni nei 3 fototubi è simile. Un'ulteriore conferma si è avuta adottando questo metodo per 6 contatori che sono stati montati sul piano prototipo allestito per il test vibrazionale condotto all' ALENIA SPAZIO alla fine del mese di Gennaio di quest'anno (vedi capitolo 4). Per ciascun contatore si sono scelti fotomoltiplicatori raggruppati secondo il criterio esposto.

In figura 3.11 possiamo vedere, per uno dei sei contatori, il picco dello spettro di carica fornito da ciascun fotomoltiplicatore in funzione della sensibilità luminosa del catodo. La buona correlazione tra carica raccolta e sensibilità del fototubo a parità di guadagno dimostra che il punto di lavoro è corretto. In figura 3.12 abbiamo lo stesso grafico per tutti e 6 i contatori.

Le misure di risoluzione temporale per il tempo di volo hanno fornito i seguenti risultati:

Contatore (n.crescente)	Risoluzione TOF (ps)
1	105 ± 3
2	121 ± 3
3	112 ± 4
4	160 ± 2
5	114 ± 3
6	133 ± 3

Si tratta di valori abbastanza vicini alla risoluzione che ci si propone di raggiungere (100 ps). Al fine di migliorare ulteriormente la risoluzione per i contatori che andranno a formare l'apparato definitivo, le triplette create prima della calibrazione dei nuovi fotomoltiplicatori sono state perfezionate in seguito alle misure; è stato infatti possibile basarsi sui valori della tensione di lavoro estrapolata dalle curve di calibrazione riorganizzando i raggruppamenti in modo da realizzare la maggior compatibilità possibile anche da questo punto di vista.

Il sistema di alimentazione che verrà utilizzato nell'esperimento è progettato per inviare a ciascun fotomoltiplicatore un valore definito di tensione ma, in caso di guasti, farà in modo che tutti e tre ricevano automaticamente un valore comune; anche da questo aspetto vediamo l'importanza di avere fototubi il più possibile bilanciati in tensione.

In base a quanto detto sono stati formati 112 gruppi di tre fototubi in corrispondenza dei 56 contatori di AMS.

Nelle figure 3.13 e 3.14 sono presentate per ciascuna tripletta, rispettivamente, la distribuzione delle tensioni di lavoro medie e la distribuzione di sensibilità medie del catodo. Quest'ultima, centrata su $80 \mu A/lm$, presenta una dispersione inferiore al 10 %, molto soddisfacente per assicurare una risposta uniforme dei contatori. Le tensioni di lavoro, distribuite attorno al valore medio di 774 V, non superano gli 850 V.

3.4 Simulazione degli effetti del partitore resistivo sulle misure di guadagno

Per tenere conto di tutte le condizioni di lavoro in cui sono state fatte le misure di calibrazione dei fotomoltiplicatori è stato realizzato un semplice programma di

3.4. Simulazione degli effetti del partitore resistivo sulle misure di guadagno

simulazione Montecarlo in cui si è inserita l'incertezza sulla tensione di alimentazione dovuta all'alimentatore utilizzato e, soprattutto, le tolleranze delle resistenze del partitore resistivo applicato a ciascun fototubo.

La dipendenza dei fattori di moltiplicazione secondaria di ciascun dinodo dalla tensione, come accennato anche nel capitolo precedente, è espressa dalla relazione 2.2 che riproponiamo:

$$\delta = aV^k \quad (3.13)$$

Siccome il parametro k assume valori nell'intervallo $0.7 \div 0.8$, è stato approssimato con la media aritmetica dei due valori; verrà perciò indicato con il simbolo $\langle k \rangle$. Il valore di a è stato invece stimato servendosi della seguente relazione ottenuta applicando la 3.13 per tutti e 10 i dinodi:

$$G = a^{10} HV^{10\langle k \rangle} \prod_{i=1}^{10} \left(\frac{R_i}{\sum_{i=1}^{10} R_i} \right)^{\langle k \rangle} \quad (3.14)$$

HV = tensione di alimentazione

R_i = valore nominale della i -esima resistenza del partitore resistivo.

Per un fotomoltiplicatore il cui fattore di guadagno a 800 V è 2×10^6 , il valore stimato per a dalla è circa 0.167.

Tenendo conto dell'incertezza dovuta all'alimentatore (circa 2 V sul valore selezionato) e delle tolleranze al 5% delle resistenze dei partitori resistivi usati, per un fotomoltiplicatore di guadagno nominale a 800 V pari a 2×10^6 sono stati simulati 100000 eventi di misura di guadagno alle tre tensioni 700, 800 e 900 V. Le distribuzioni dei valori ottenuti sono rappresentate nelle figure 3.15, 3.16 e 3.17 da cui possiamo notare che le fluttuazioni introdotte dalle condizioni di lavoro sulle misure di guadagno sono circa del 2.3%.

È stato cercato un riscontro sperimentale a queste stime; a questo scopo sono state fatte misure di guadagno di 6 fotomoltiplicatori variando in ogni ciclo di misure il partitore resistivo visto da ciascuno. Come si è già accennati, l'apparato sperimentale allestito per la calibrazione consente di caratterizzare contemporaneamente 6 fototubi, essendo dotato di una scheda elettronica su cui sono assemblati 6 circuiti partitori. Ognuno è interfacciato al fotomoltiplicatore con una struttura predisposta a ricevere i piedini di questi ultimi per collegarli al circuito (*zoccolo*).

Scambiando di posto a rotazione i 6 fototubi, e procedendo ogni volta ad una caratterizzazione completa è stato possibile confrontare le fluttuazioni di guadagno ottenute con quelle simulate. Il valore ricavato dalla simulazione si colloca all'interno dell'intervallo di fluttuazioni osservate nelle misure di scambio; la compatibilità è massima a 800 V alla quale abbiamo, mediamente, il 2.5% di dispersione.

Nelle seguenti tabelle riportiamo il valore medio e la dispersione (scarto quadratico medio) dei valori misurati nel corso delle 6 misure fatte per ognuno fotomoltiplicatore a ciascuna delle tre tensioni di alimentazione applicate:

700 V	PM (NUMERO INTERNO)	GUADAGNO MEDIO (E+05)	DISPERSIONE (E+05)	DISPERSIONE PERCENTUALE
	H130	6.8	0.1	1.5
	H135	6.8	0.3	4.4
	H408	8.3	0.1	1.2
	H480	7.0	0.3	4.3
	H236	6.9	0.2	2.9
	H245	6.2	0.2	3.2

800 V	PM (NUMERO INTERNO)	GUADAGNO MEDIO (E+06)	DISPERSIONE (E+06)	DISPERSIONE PERCENTUALE
	H130	2.08	0.061	2.8
	H135	2.18	0.06	2.8
	H408	2.59	0.05	1.9
	H480	2.34	0.06	2.6
	H236	2.17	0.06	2.8
	H245	1.93	0.04	2.1

3.4. Simulazione degli effetti del partitore resistivo sulle misure di guadagno

	PM (NUMERO INTERNO)	GUADAGNO MEDIO (E+06)	DISPERSIONE (E+06)	DISPERSIONE PERCENTUALE
900 V	H130	5.8	0.1	1.7
	H135	5.9	0.2	3.4
	H408	6.8	0.1	1.5
	H480	6.4	0.3	4.7
	H236	6.0	0.1	1.7
	H245	5.0	0.1	2.0

I partitori resistivi che verranno abbinati ai fotomoltiplicatori sul sistema TOF di *AMS* sono costituiti di resistenze la cui tolleranza è del 10%; tenendo conto di questo è stata ripetuta la simulazione degli effetti sulle misure di guadagno in queste condizioni di lavoro; la fluttuazione stimata è del 3.5%, leggermente superiore al caso precedente.

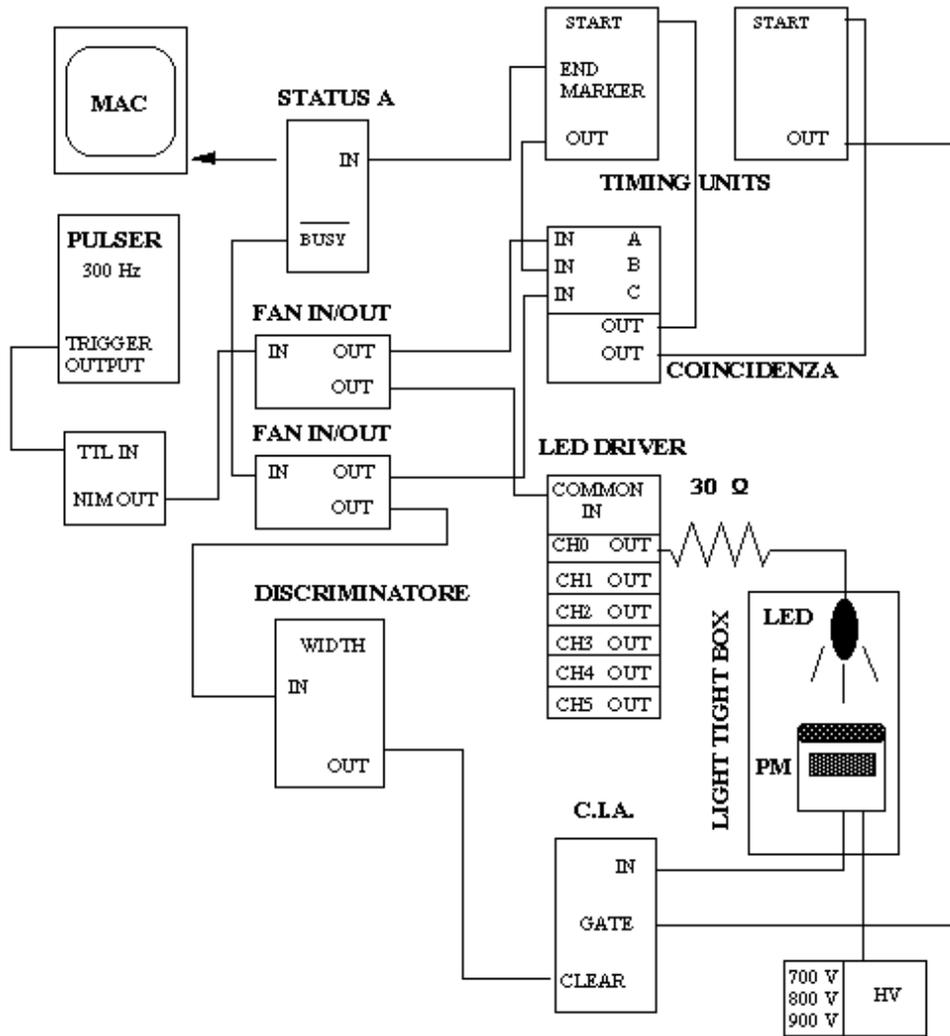


Figura 3.1: Apparato sperimentale utilizzato per le misure di guadagno dei fototubi R5900.

3.4. Simulazione degli effetti del partitore resistivo sulle misure di guadagno

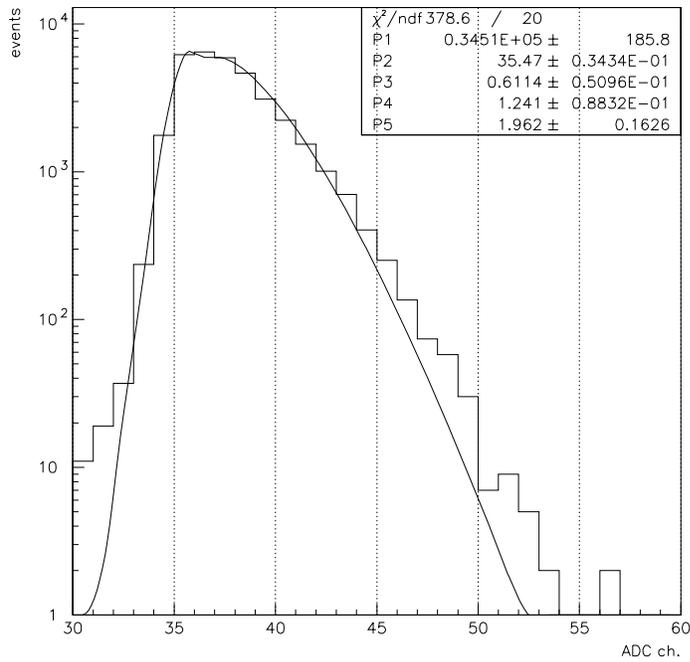


Figure ??

Figura 3.2: Spettro di singolo fotoelettrone di un fotomoltiplicatore *R5900* acquisito nelle misure fatte al *CERN* ad una tensione di alimentazione di 800 V.

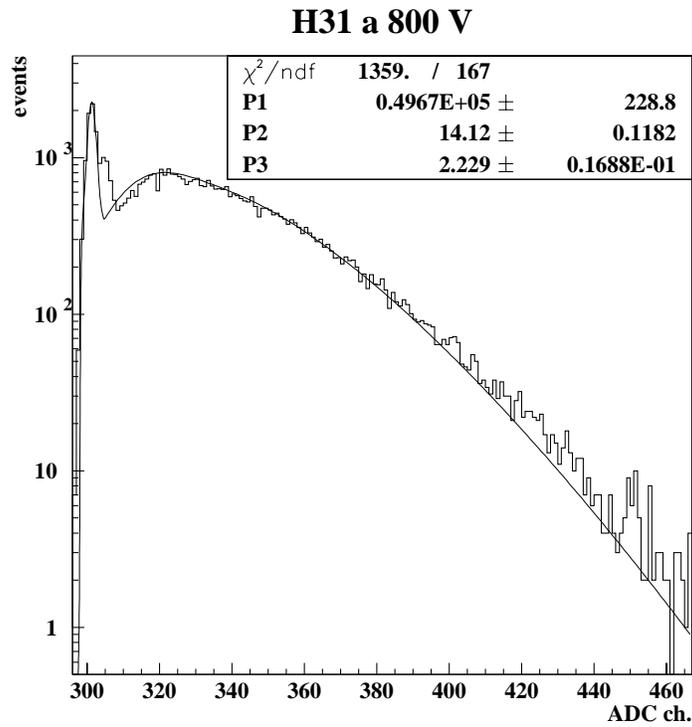


Figura 3.3: Spettro di singolo fotoelettrone acquisito a Bologna ad una tensione di alimentazione di 800 V. È stata utilizzata la scala espansa del *CIA*, per cui, in ascissa, la carica risulta amplificata di un fattore 7.5.

3.4. Simulazione degli effetti del partitore resistivo sulle misure di guadagno

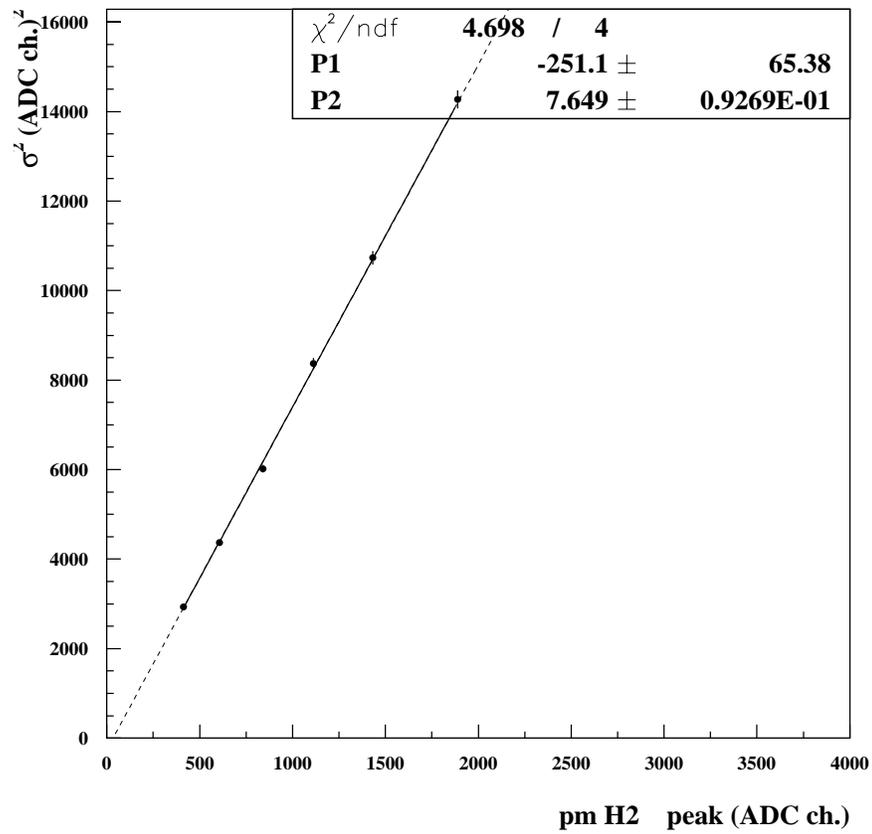


Figura 3.4: Curva di risposta di un fotomoltiplicatore a 900 V.

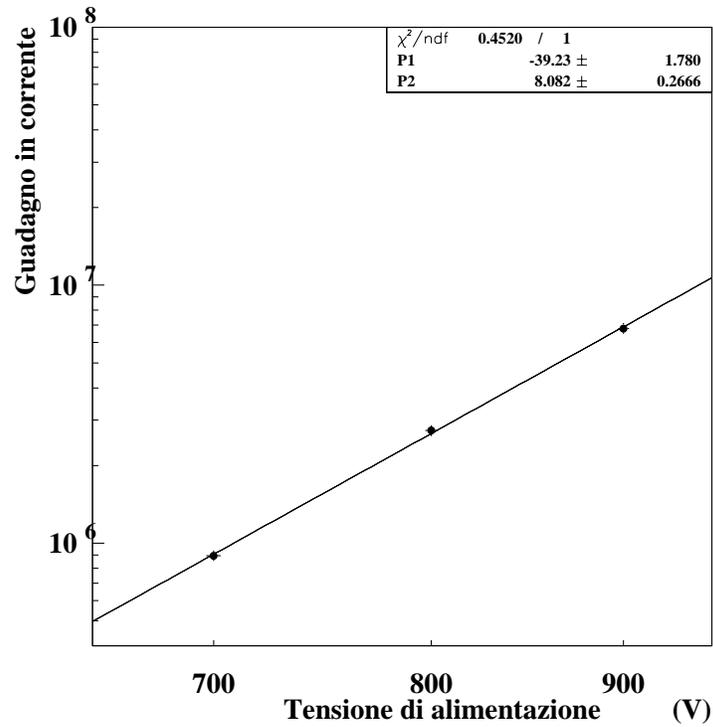


Figura 3.5: Curva di calibrazione di un fototubo R5900; sono indicati i valori dei due parametri della funzione interpolante.

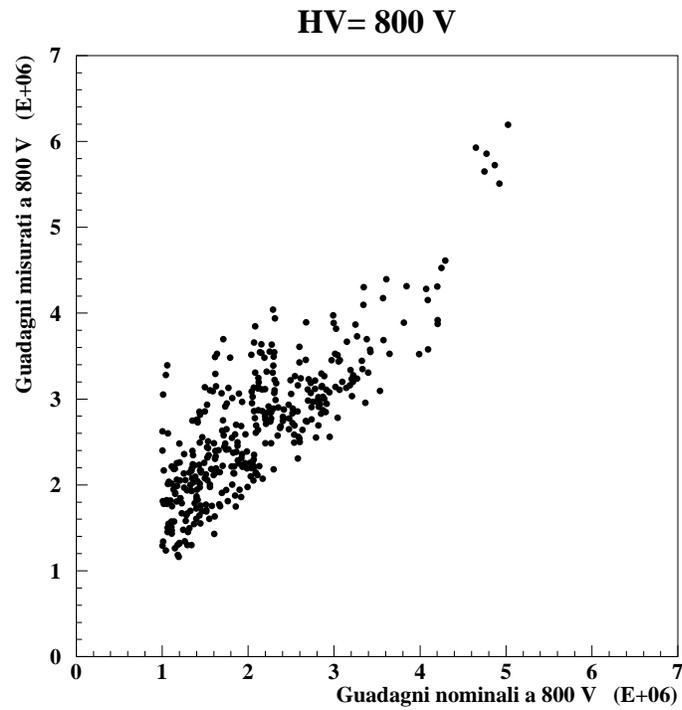


Figura 3.6: Confronto tra il guadagno dei singoli fototubi misurato a 800 V e quello fornito dalla casa costruttrice (guadagno nominale).

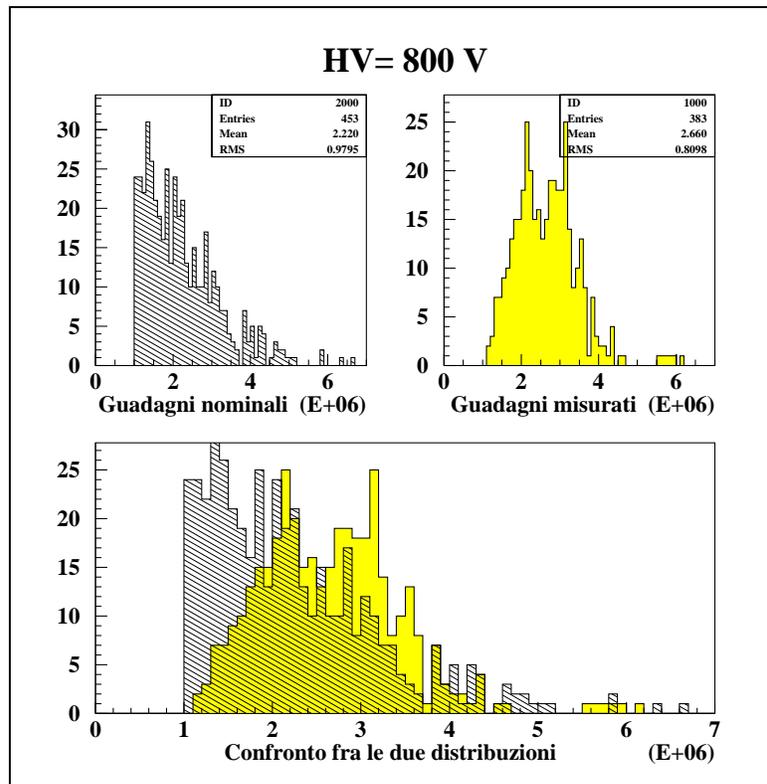


Figura 3.7: Rappresentazione grafica delle misure di guadagno fatte a 800 V. La distribuzione ottenuta è confrontata con quella dei valori nominali.

3.4. Simulazione degli effetti del partitore resistivo sulle misure di guadagno

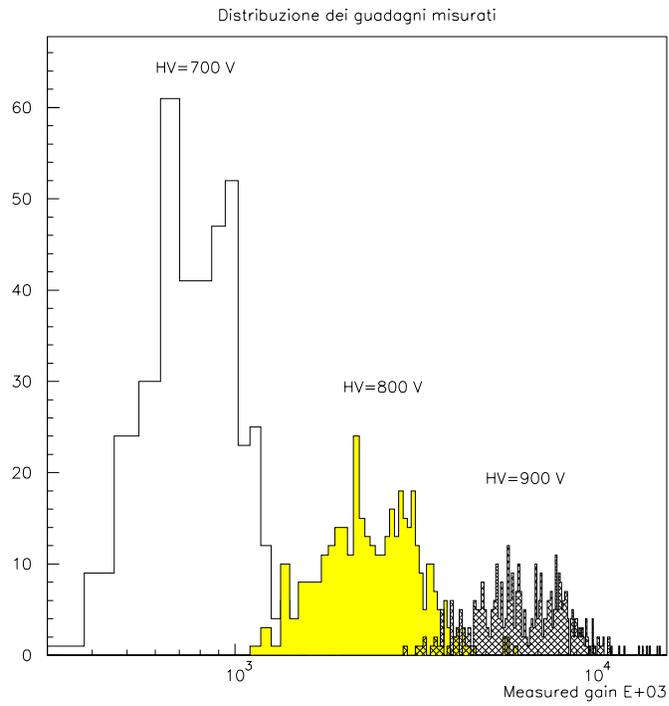


Figura 3.8: Veduta sintetica dei risultati delle misure di guadagno fatte alle tre tensioni di lavoro.

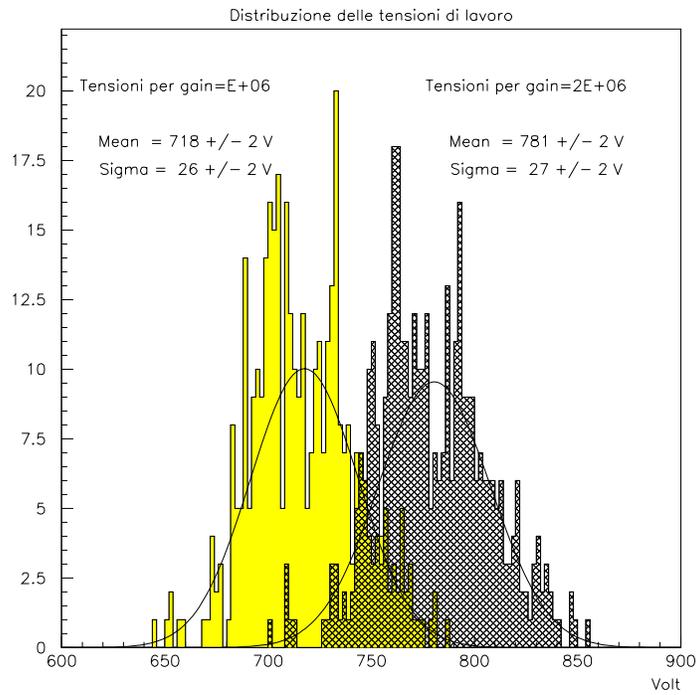


Figura 3.9: Distribuzione delle tensioni di lavoro estrapolate dalla curva di calibrazione costruita per ogni fotomoltiplicatore. Sono rappresentate le tensioni necessarie per ottenere un guadagno rispettivamente di 10^6 e di 2×10^6 .

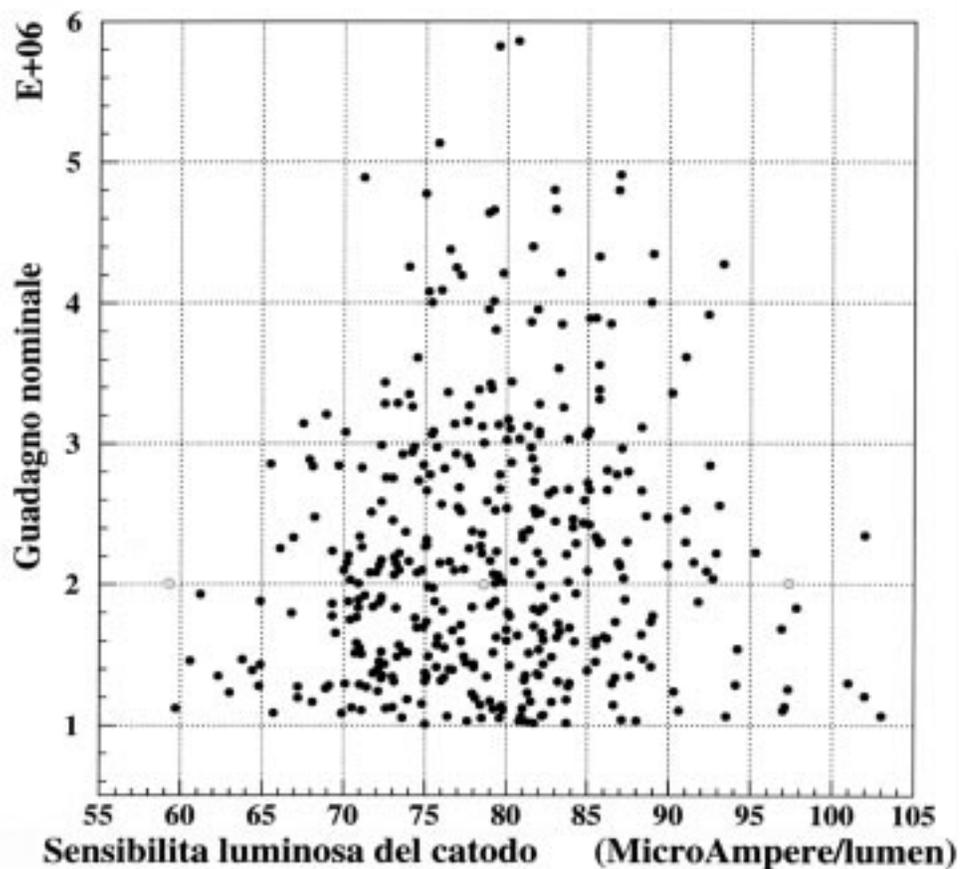


Figura 3.10: Il guadagno nominale dei 400 fotomoltiplicatori di *AMS* è graficato in funzione della sensibilità luminosa del catodo. I punti grigi corrispondono ad una tripletta selezionata per il sistema TOF.

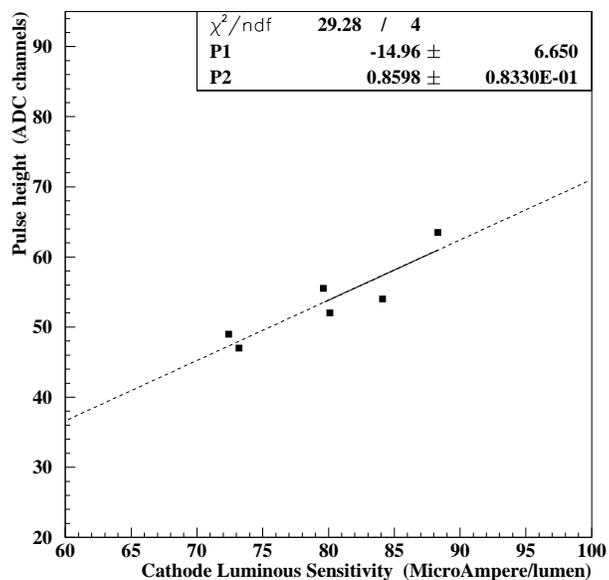
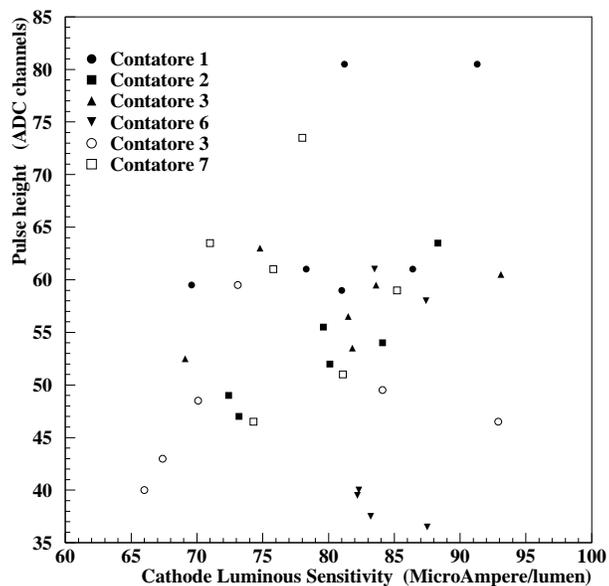


Figura 3.11: Risposta anodica dei 6 fotomoltiplicatori di un contatore in funzione della sensibilità luminosa del catodo, indicativa dell'efficienza quantica.



58

Figura 3.12: Lo stesso grafico precedente è mostrato per i fototubi di tutti e 6 i contatori.

3.4. Simulazione degli effetti del partitore resistivo sulle misure di guadagno

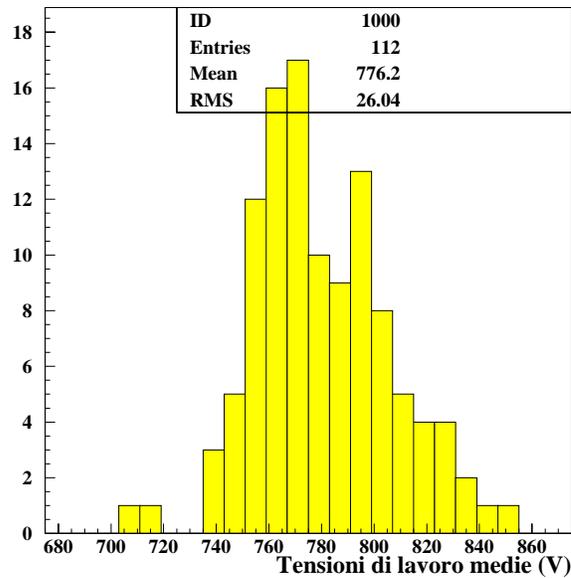


Figura 3.13: Distribuzione delle tensioni di lavoro medie delle 112 triplette che verranno montate sul sistema TOF di AMS. Le tensioni dei fotomoltiplicatori corrispondono ad un guadagno di 10^6 .

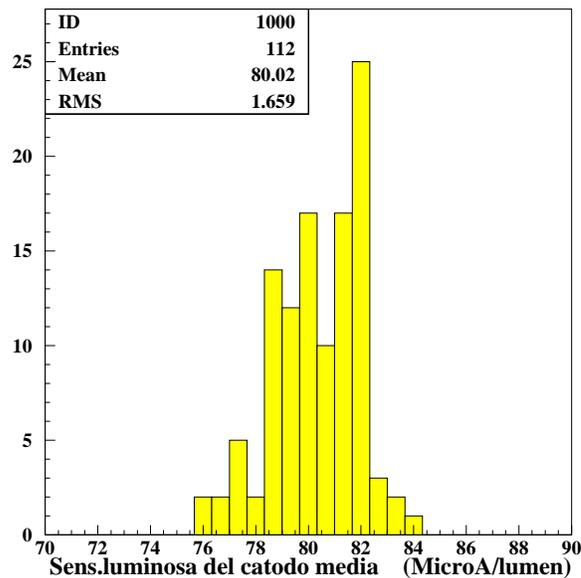


Figura 3.14: Distribuzione delle sensibilità medie del catodo delle 112 triplette di fototubi che verranno montate sul sistema TOF di AMS.

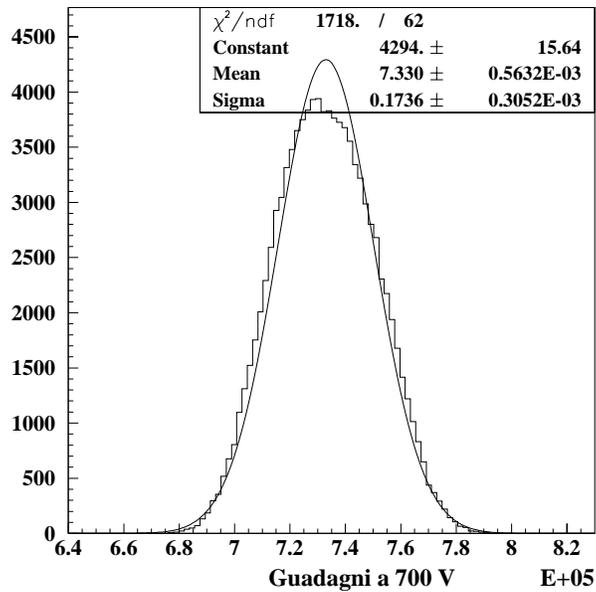


Figura 3.15: Distribuzione dei guadagni a 700 V secondo la simulazione Monte-carlo di 100000 misure ripetitive utilizzando resistenze al 5% per il partitore resistivo.

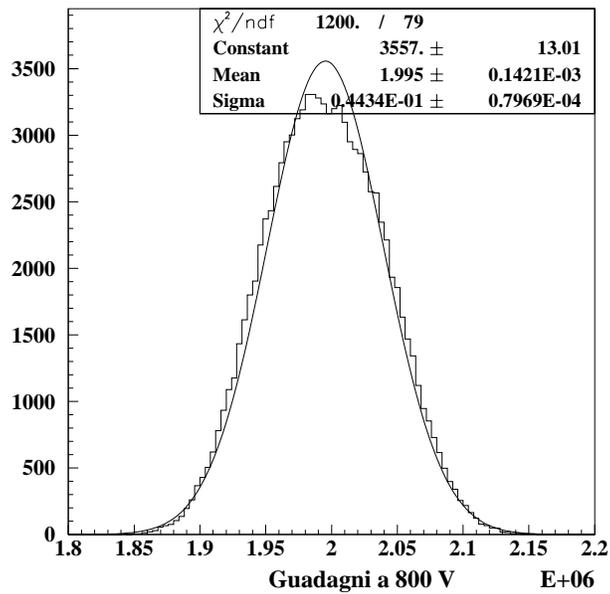


Figura 3.16: Distribuzione dei guadagni a 800 V.

3.4. Simulazione degli effetti del partitore resistivo sulle misure di guadagno

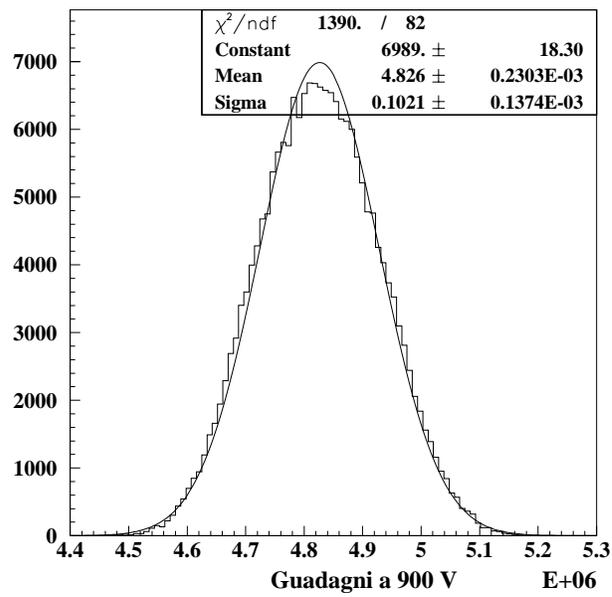


Figura 3.17: Distribuzione dei guadagni a 900 V.

Capitolo 4

Trattamenti di spazializzazione dei fotomoltiplicatori R5900 per l'esperimento AMS

La particolarità dell'ambiente di lavoro in cui si troverà a lavorare lo spettrometro AMS e, di conseguenza, i fotomoltiplicatori R5900, hanno richiesto alcuni trattamenti particolari; questi hanno riguardato soprattutto la preparazione al funzionamento nello spazio a partire dal problema delle scariche alle bassissime pressioni per arrivare a quello delle vibrazioni meccaniche correlate alla messa in orbita con lo Space Shuttle.

Si parlerà inoltre del problema del campo magnetico benché questo non sia dovuto al funzionamento nello spazio quanto al magnete permanente su cui poggia il sistema TOF.

4.1 Il problema delle scariche dei conduttori in gas a bassa pressione

Quando dei conduttori alimentati con alta tensione si trovano immersi in gas di bassa pressione, sono soggetti a fenomeni di scarica elettrica come scintille, bagliore ed effetto corona. Per l'apparato *AMS* che si troverà a funzionare nello spazio e, quindi, a pressioni dell'ordine di 10^{-6} mmHg si tratta di un problema fondamentale,

in particolare per i fotomoltiplicatori del sistema di tempo di volo che richiedono un'alimentazione di circa 800 V per svolgere la loro funzione.

Per capire la necessità dei trattamenti speciali di protezione che sono stati fatti sui fototubi può essere utile una breve introduzione sulla fenomenologia dei tipi più comuni di scarica elettrica nei gas.

4.1.1 Scarica a scintilla

La scarica a scintilla si può definire come un evento instabile correlato alla transizione tra due stati stabili di corrente fra due elettrodi immersi in un gas; è solitamente di breve durata ma può evolversi in una forma stabile di scarica come quella a bagliore, a corona, l'arco o l'effluvio. Il fenomeno è stato trattato in dettaglio da J.S. Townsend che, sulla base di studi sulla conduzione di elettricità nei gas, formulò una teoria specifica nel 1902 secondo cui la scintilla compare in seguito al raggiungimento di un valore di soglia del potenziale elettrico applicato tra gli elettrodi; L'esistenza di questo minimo è stata osservata sperimentalmente per tutti i gas conosciuti.

Nel caso semplificato di elettrodi piani, il suo valore dipende dal prodotto hp , dove h è la distanza fra gli elettrodi e p è la pressione del gas; questo è il contenuto della *legge di Paschen*, formulata sperimentalmente nel 1889 e confermata dalla teoria di Townsend.

L'andamento funzionale della legge di Paschen è visibile in figura 4.1; abbiamo una curva che raggiunge un minimo per poi salire pressochè linearmente per grandi valori di hp .

In condizioni di pressione molto bassa ci si aspetta che il fenomeno di scintilla non si verifichi; il gas è talmente rarefatto che la probabilità di avere ionizzazione per collisione e, quindi, scarica a scintilla è trascurabile (il prodotto hp è infatti molto piccolo). Tuttavia, se il potenziale è sufficientemente alto si osservano scariche anche a pressioni dell'ordine di $10^{-6} \div 10^{-7}$ mmHg, in particolare quando l'elettrodo negativo è appuntito.

Il fenomeno si spiega all'interno della teoria elettronica dei metalli sviluppata da Sommerfeld; secondo questa teoria, quando il campo elettrico applicato è sufficientemente alto da abbassare la barriera di potenziale che ostacola la fuga degli elettroni dalla superficie del metallo, tutti gli elettroni (e non solo quelli degli orbitali più esterni) sono in grado di sfuggire. La probabilità di fuga dipende da

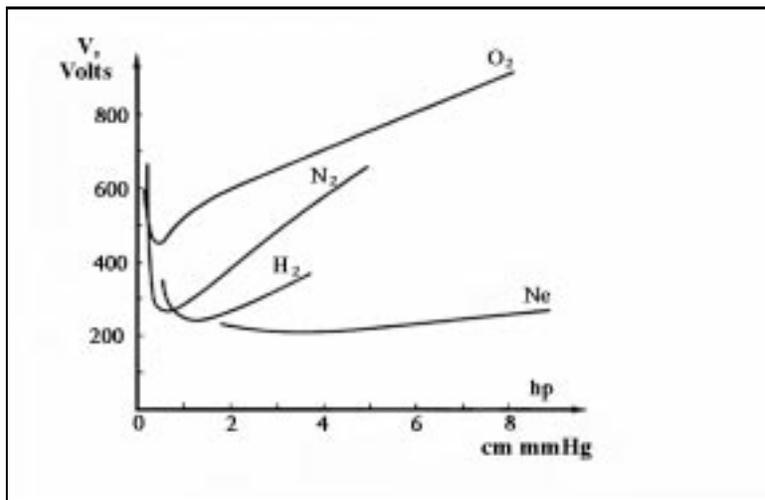


Figura 4.1: Andamento della tensione di soglia per avere scintilla in aria e in altri gas comuni in funzione del prodotto $h(cm)p(mmHg)$.

quanto il campo elettrico riesce ad abbassare la barriera di potenziale ed è perciò un fenomeno indipendente dalla temperatura.

Le correnti che si generano sono generalmente piccole anche in presenza di campi elettrici molto intensi, ma sono sufficienti a provocare il fenomeno della scintilla anche in gas a basse pressioni fino a 10^{-7} mmHg.

4.1.2 Scariche distruttive: bagliore ed effetto corona

Questo tipo di scarica è tipicamente localizzata agli elettrodi, specialmente nelle zone appuntite o filiformi; si presenta in generale come un'emissione luminosa spesso accompagnata da rumore acustico (crepitio) e interferenze radio.

Il fenomeno può manifestarsi in diverse forme; le più comuni sono il *bagliore* e l'*effetto corona* e sono entrambe caratterizzate da un potenziale di innesco dipendente dalla pressione a cui si trova il gas.

Alle basse pressioni (sotto i 760 mmHg), la luminosità è diffusa uniformemente sulla superficie degli elettrodi a causa dell'elevata mobilità degli elettroni che è, in-

fatti, inversamente proporzionale alla densità del gas; in queste condizioni la scarica che si manifesta è il bagliore.

Per pressioni confrontabili con quella atmosferica, un campo elettrico di intensità dell'ordine di $3 \times 10^6 \frac{V}{m}$ è sufficiente a ionizzare il gas rendendolo conduttore (anche l'aria). Gli elettrodi producono una scarica che si manifesta solitamente come una luce bluastra; la luminosità si localizza presso le zone appuntite dell'elettrodo negativo (ulteriori dettagli sono contenuti nel paragrafo successivo, che tratta del potere delle punte) mentre, sull'elettrodo positivo, tende ad accumularsi nelle regioni di conduttore dove il campo è più intenso.

Questa è una tipica scarica di tipo *corona* un cui esempio è quella che si verifica lungo le linee di trasmissione dell'energia elettrica, nei punti in cui i fili conduttori si incontrano o nei punti di sospensione ai pali; l'effetto è accentuato in presenza di umidità in quanto la soglia di potenziale elettrico che innesca la scarica si abbassa, ed è infatti sfruttato dai parafulmini.

Analogamente al caso della scintilla anche in questo caso il potenziale di soglia ha una dipendenza ben definita dalla pressione del gas, visibile in figura 4.2

4.1.3 Potere delle punte: effluvio

La forte curvatura di uno degli elettrodi, come una punta, una sfera di piccolo raggio o anche un filo sottile può provocare una scarica persistente di intensità ridotta localizzata intorno all'elettrodo chiamata *effluvio*, correlata all'elevata intensità del campo raggiunta in queste zone e alla conseguente possibilità che avvenga ionizzazione per urto da parte degli elettroni.

Il fenomeno è differenziato a seconda che l'elettrodo in questione sia il catodo o l'anodo; nel primo caso il meccanismo di mantenimento della scarica è ancora sostanzialmente quello di una scarica a bagliore; nel secondo caso, soprattutto se il catodo è lontano o materialmente assente (per esempio coincide con la terra o con le pareti del laboratorio), il processo che interviene è la fotoionizzazione del gas circostante alla regione della scarica. La particolarità di questi processi determina un carattere intermittente della scarica nota con il nome di *effluvio*.

All'effluvio si riconduce il cosiddetto *potere delle punte* di disperdere la carica elettrica, strettamente correlato alla presenza di gas nello spazio circostante.

Tutti i tipi di scarica descritti possono essere prevenuti cercando di smussare le parti appuntite dei conduttori funzionanti a contatto con gas di bassa pressione

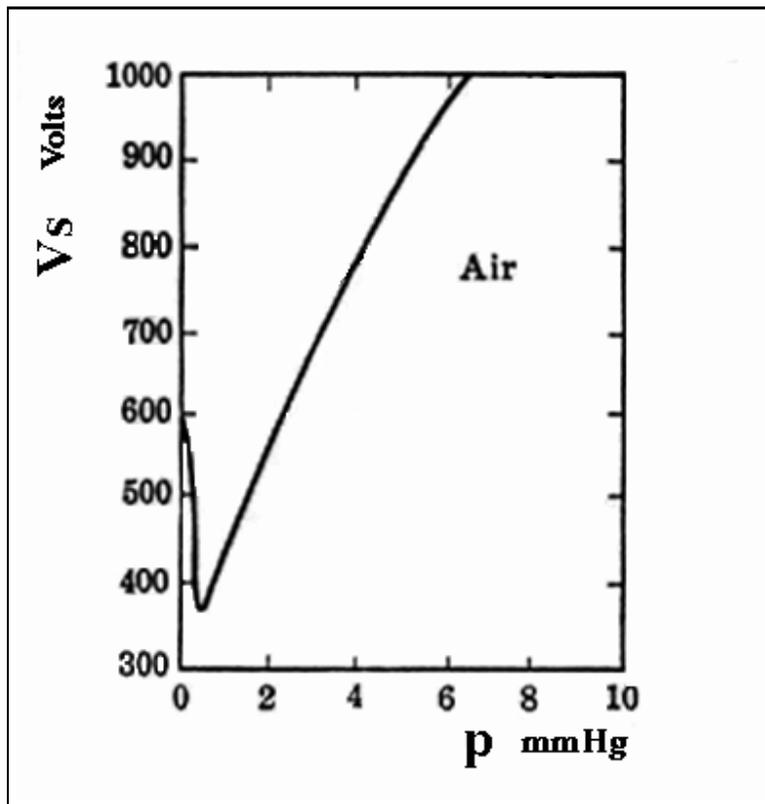


Figura 4.2: Andamento funzionale del potenziale di innesco della scarica corona in funzione del prodotto hp , dove p è la pressione.

oppure, quando non fosse possibile, riempiendo opportunamente tutti gli spazi in cui il gas potrebbe diffondersi. Questo è alla base dei trattamenti a cui sono stati sottoposti i fotomoltiplicatori *R5900* di *AMS*, ovvero l'incapsulamento (“*Potting*”) ed il rivestimento (“*Coating*”).

4.2 L'incapsulamento (“*Potting*”)

Con questo termine viene indicato uno dei trattamenti necessari per proteggere dispositivi come i fotomoltiplicatori dai fenomeni tipici dell'ambiente spaziale co-

4.2. L'incapsulamento ("Potting")

me gli sbalzi di temperatura e, soprattutto, le scariche correlate al funzionamento di componenti sotto tensione in condizioni di bassissima pressione, alle quali si è accennato precedentemente.

Questo metodo protettivo si basa sulla realizzazione di una camera ("POT") in grado di racchiudere interamente il dispositivo in questione o la parte di esso che si intende isolare; questa camera verrà poi riempita con un polimero liquido (elastomero) con buone proprietà dielettriche che, indurendosi, sarà in grado di svolgere la sua funzione.

Nel caso dei fotomoltiplicatori di *AMS*, l'incapsulamento è stato praticato in corrispondenza dei piedini, estremamente sottili (il diametro è di 0.45 mm) e fragili e, quindi più soggetti a danneggiamenti; lo scopo del trattamento, oltre ad isolare e a riempire tutti gli spazi in cui potrebbe circolare del gas residuo, è anche quello di fornire un mezzo in grado di ammortizzare il più possibile le vibrazioni meccaniche che potrebbero intervenire nel corso dell' esperimento, in particolare durante la fase di lancio dell'apparato *AMS* sulla navetta spaziale.

L'intera procedura di incapsulamento dei fototubi *R5900* è stata svolta durante le prime settimane di Giugno presso i laboratori specializzati nel trattamento dei polimeri del *CERN* di Ginevra, facendo precedere il lavoro vero e proprio da una fase di preparazione nel corso della quale è stato applicato a ciascun fotomoltiplicatore il circuito stampato partitore di tensione; lo spazio compreso fra i piedini ed il circuito è stato racchiuso in una camera in policarbonato frapposta ai due componenti in modo da permettere l'iniezione dell'elastomero al suo interno riempiendo completamente tutto lo spazio a disposizione.

I contatti sono stati sigillati con un tipo speciale di silicone nero autorizzato dalla *NASA* per l'uso in esperimenti spaziali (*SILASTIC RTV*) alla scopo di creare una piccola camera stagna nella regione di spazio contenente i piedini del fotomoltiplicatore. Sulla superficie esterna, in corrispondenza di due spigoli opposti, sono stati praticati due fori per permettere l'operazione di iniezione del prodotto.

Il materiale scelto per effettuare il trattamento è il *DOW CORNING 53-900*; si tratta di un polimero inorganico a due componenti di silicone caratterizzato da un ampio intervallo di temperature di lavoro (da $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$), buone capacità isolanti e una bassa viscosità che gli permette di pervadere facilmente anche regioni di spazio strette e contenenti strutture complesse ed intricate.

Questo elastomero, abbinato ad un adeguato agente indurente, è stato pensato appositamente per applicazioni di tipo aereospaziale in quanto, alle proprietà

menzionate si aggiunge la capacità di fornire un'ottima protezione nei confronti di umidità, radiazioni, shock termici e vibrazioni meccaniche.

La soluzione da iniettare all'interno della camera in policarbonato è stata preparata unendo l'indurente al 53-900 nelle proporzioni di nove parti su dieci; il prodotto della miscela è stato poi degassato a bassa pressione (inferiore ad 1 mmHg) allo scopo di eliminare la maggior parte delle bolle d'aria intrappolate.

L'iniezione del preparato è avvenuta attraverso uno dei due fori praticati esternamente alla camera di cui si è parlato prima, mentre nel foro sullo spigolo opposto si è inserito un piccolo imbuto trasparente con la doppia funzione di espellere le bolle d'aria dovute all'iniezione e di segnalare l'avvenuto riempimento della camera (essendo trasparente è infatti possibile vedere quando il liquido inizia a fuoriuscire).

A iniezione terminata, il foro è stato sigillato lasciando il fotomoltiplicatore così trattato a riposo per qualche minuto per assicurarsi dell'assenza di perdite e, nel caso, intervenire tempestivamente con il silicone nero.

La procedura è terminata sottoponendo i fototubi ad una temperatura in grado di accelerare il processo di polimerizzazione dell'elastomero; dopo qualche tentativo si è deciso per una temperatura di $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (compatibile con la temperatura massima tollerabile dai fotomoltiplicatori, cioè $55\text{ }^{\circ}\text{C}$) mantenuta per circa 16 ore, raggiungendo uno stato di polimerizzazione soddisfacente. Questo tempo è poco più della metà di quello che richiederebbe la polimerizzazione del prodotto a temperatura ambiente.

4.2.1 Confronto delle misure di guadagno su un fotomoltiplicatore R5900 prima e dopo il trattamento di incapsulamento

Allo scopo di verificare l'influenza dell'incapsulamento sulle prestazioni dei fotomoltiplicatori è stata ripetuta la calibrazione di uno precedentemente caratterizzato. Le misure di guadagno, prima e dopo il trattamento, sono riportate nella tabella che segue:

4.3. Il rivestimento (“Coating”)

Prima	Dopo
-------	------

HV (V)	Guadagno (10^6)	Errore (10^6)	Guadagno (10^6)	Errore (10^6)
700	1.56	0.08	1.41	0.05
800	4.5	0.2	4.3	0.2
900	11.0	0.6	10.7	0.4

Possiamo notare che i valori misurati sono compatibili tra loro al 3%; questo si può visualizzare graficamente in figura 4.3.

4.3 Il rivestimento (“Coating”)

Il processo di spazializzazione dei fotomoltiplicatori è completato dalla procedura di rivestimento in materiale isolante dei componenti elettrici che costituiscono il partitore resistivo collegato ai piedini tramite circuito stampato.

Per questo trattamento è stato scelto il rivestimento *DOW CORNING RTV3140* diluito in trielina; si tratta di un elastomero silconico ad una componente che, a contatto con l’umidità dell’aria diventa robusto ed elastico. Il suo meccanismo di polimerizzazione è non corrosivo ed è quindi impiegabile anche per apparecchiature elettroniche sensibili alla corrosione senza alcuna controindicazione; avviene inoltre a temperatura ambiente. Le sue caratteristiche principali sono la buona adesione su un’ampia gamma di materiali (plastici, vetri e metallici), l’elevata flessibilità in grado di ridurre le sollecitazioni esercitate sui componenti rivestiti durante le oscillazioni termiche, la resistenza all’umidità, all’effetto corona, all’ozono ed agli agenti atmosferici e, infine, la tolleranza a temperature fino a $250^{\circ}C$.

La proposta operativa riguardo la procedura di rivestimento compilata per la ditta *CAEN Engineering* di Viareggio, responsabile del lavoro sui fotomoltiplicatori di *AMS*, prevede vari passi.

Prima di tutto i circuiti da rivestire vengono puliti con alcool e trattato con un prodotto la cui funzione è quella di facilitare la rimozione del RTV3140 qualora ciò si rendesse necessario.

L’applicazione del prodotto di rivestimento sui componenti elettrici è preceduta dal degassamento di questo, diluito al 70% in trielina per diminuirne la viscosità; lo

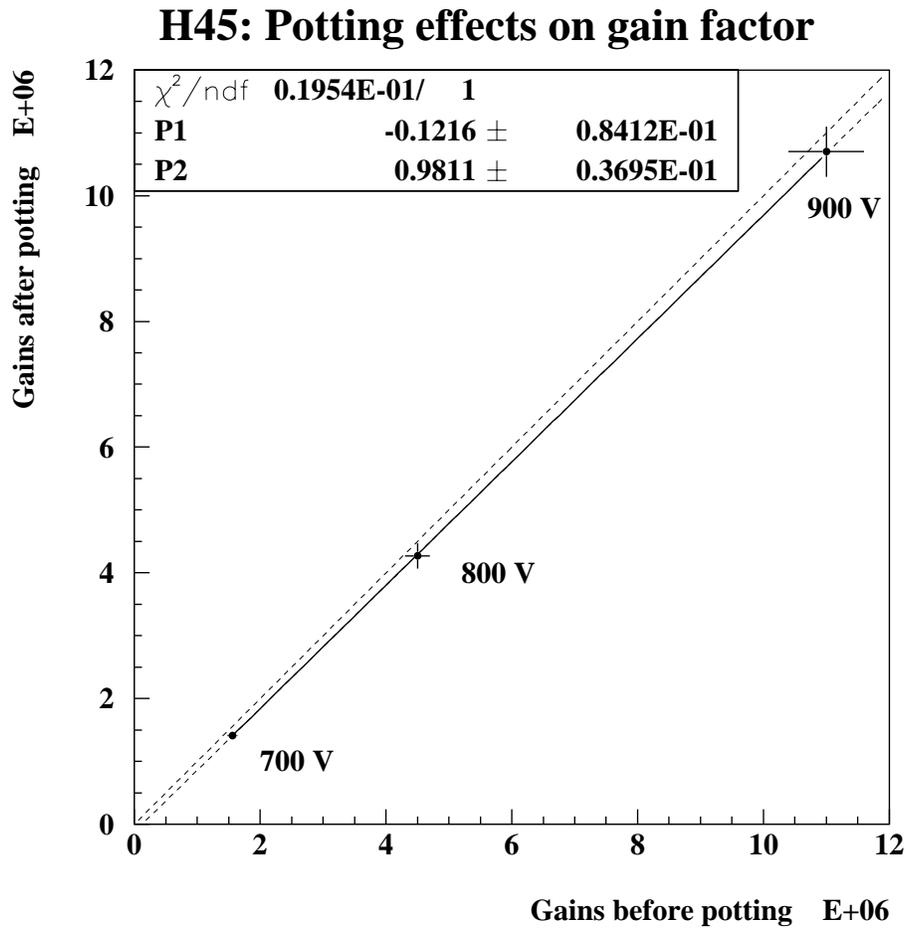


Figura 4.3: Studio degli effetti dell'incapsulamento sui guadagni misurati per il fotomoltiplicatore H45 (numero interno). La retta tratteggiata è la bisettrice, mentre quella in nero è la retta estrapolata dai punti sperimentali.

scopo, analogamente al caso dell'incapsulamento è quello di eliminare l'eccesso di bolle d'aria.

A questo punto è possibile immergere i circuiti stampati nel rivestimento e sot-

toporre il tutto ad una prima polimerizzazione per circa 2 ore in camera pulita a temperatura ambiente. Seguirà una seconda polimerizzazione della durata di una settimana in seguito ad eventuali ritocchi con RTV3140 non diluito dove fosse necessario. Il rivestimento forma una pellicola dopo circa 25 minuti, dopo i quali non è più colabile; dopo 90 minuti diventa infatti asciutto al tatto e permette una manipolazione limitata fino al completamento della polimerizzazione.

La polimerizzazione procede a partire dalla superficie esterna verso l'interno ad una velocità dipendente dall'umidità relativa e dallo spessore del rivestimento; una scarsa umidità o un'applicazione troppo spessa allungano il tempo di polimerizzazione.

La procedura viene conclusa sottoponendo i fotomoltiplicatori ormai completi ad un ultimo degassamento alla pressione di 10^{-4} *mmHg* ad una temperatura di $45^{\circ}C$ per la durata di 3 giorni, che li renderà definitivamente pronti per funzionare nello spazio.

4.4 Prove di vibrazione meccanica

Secondo le direttive della NASA, AMS dovrà essere in grado di sopportare le vibrazioni dovute alle forti accelerazioni correlate al lancio nello spazio; è stata richiesta una sopportazione di accelerazioni dell'ordine di 22 g di carico statico (che è comunque molto maggiore di quelle a cui l'apparato dovrà effettivamente far fronte); ricordiamo inoltre che il sistema TOF è la parte più esterna di tutto lo spettrometro, per cui è anche la parte più soggetta alle vibrazioni.

Per verificare il grado di sopportazione agli shock dei materiali utilizzati, è stata fatta una simulazione Montecarlo inserendo i dati relativi alla geometria dell'oggetto ed alle caratteristiche delle singole parti. Simulando le condizioni di carico precedentemente citate è stato possibile modificare le parti risultate non adatte, raffinando l'analisi nel corso della progettazione e della costruzione. Alla fine di Gennaio di quest'anno è stata fatta una prova sperimentale di vibrazione presso l'ALENIA SPAZIO, ditta specializzata nel settore dell'ingegneria aerospaziale; AMS ha presentato una buona sopportazione degli shock vibrazionali sia dal punto di vista meccanico che del funzionamento. Per sei contatori a scintillazione con i relativi fotomoltiplicatori, sono state ripetute le calibrazioni al ritorno dal test; sono state osservate, globalmente, risposte compatibili con quelle viste durante le calibrazioni effettuate prima della prova. In particolare è stato fatto un confronto fra gli spettri

di carica visti dai fotomoltiplicatori singolarmente prima e dopo la vibrazione, nelle stesse condizioni di lavoro; dalla figura 4.4 possiamo vedere che, con l'eccezione di uno solo dei 36 fototubi sottoposti alla prova, le risposte sono compatibili e ci danno motivo di ritenere il sistema TOF idoneo a condizioni estreme di accelerazione.

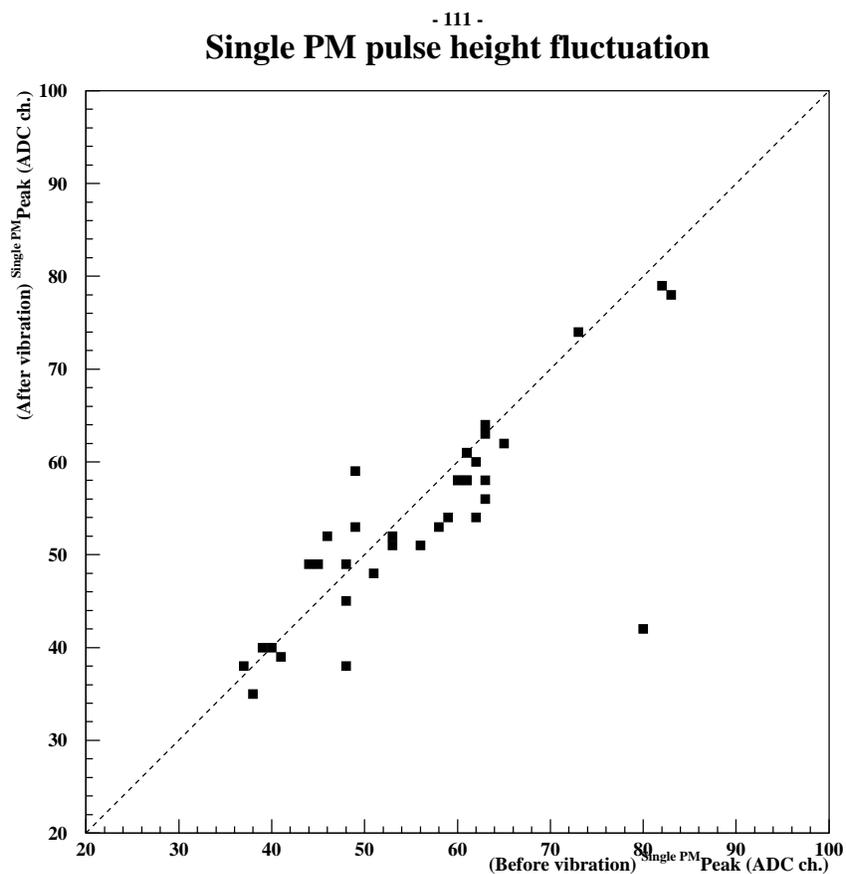


Figura 4.4: Confronto degli spettri di carica forniti dai 36 fotomoltiplicatori prima e dopo il test di vibrazione.

4.5 Schermatura dal campo magnetico

La risposta di un fotomoltiplicatore è altamente influenzata dalla presenza di un campo magnetico anche di piccola entità come quello terrestre; l'effetto si manifesta in termini di diminuzione della sensibilità luminosa dell'anodo, dovuta principalmente all'influenza del campo magnetico sulla traiettoria dei fotoelettroni dal catodo verso il primo dinodo che, come già accennato nel secondo capitolo, è l'elettrodo più determinante per quanto riguarda il fattore di moltiplicazione finale. L'effetto è accentuato quando il fotocatodo è molto distanziato dal primo dinodo in quanto gli elettroni in transito si trovano esposti all'azione del campo magnetico per un tempo maggiore aumentando la probabilità di subire deviazioni dalla traiettoria più favorevole per essere intercettati dal dinodo.

L'influenza delle varie componenti di campo magnetico sulla corrente anodica è rappresentata in figura 4.5; si è osservato che un campo di induzione dell'ordine dei 70 Gauss può ridurre la sensibilità dell'anodo anche del 50%.

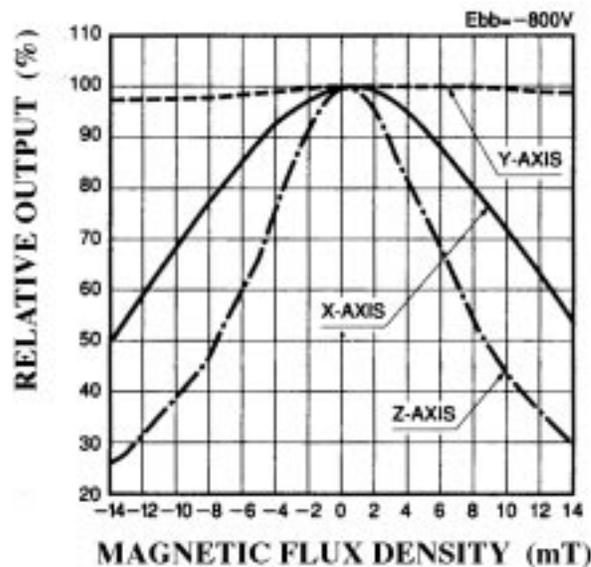


Figura 4.5: Caratteristiche magnetiche di un fotomoltiplicatore *R5900*. Il piano xy è quello parallelo alla superficie del fotocatodo; la direzione dei fotoelettroni è z .

Considerando che, una volta nello spazio, l'apparato *AMS* sarà esposto ad un

campo magnetico di circa 200 Gauss, si pone dunque la necessità di un involucro schermante per i fotomoltiplicatori; esso dovrà essere in grado di assorbire le linee di campo trattenendole sulle sue pareti salvaguardando i dispositivi interni. Si fa generalmente uso di materiali ferromagnetici la cui azione è schematizzata in figura 4.6. Uno schermo magnetico ha infatti la funzione di deflettere le linee di forza del campo fornendo loro un percorso alternativo che aggiri il dispositivo da proteggere; questo ruolo viene svolto da materiali ad alta permeabilità e quindi in grado di assorbire facilmente ogni tipo di interferenza magnetica, inclusa quella prodotta dal dispositivo stesso.

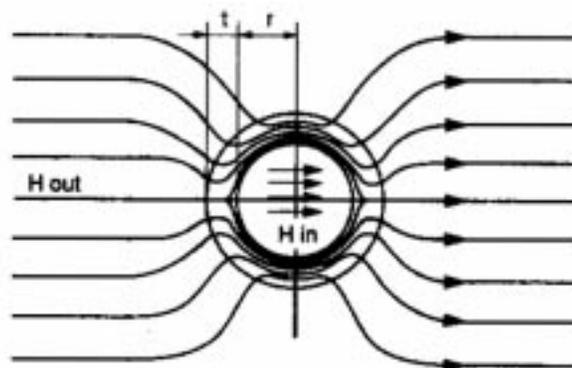


Figura 4.6: Effetto di un involucro schermante sulle linee di campo magnetico esterno.

Prima di essere pronto per esercitare la sua funzione protettiva, il materiale deve subire un trattamento in grado di rendere nulla la sua magnetizzazione propria pur conservando, anzi potenziando, la permeabilità; si ricorre generalmente ad un processo termico che ha l'effetto di orientare casualmente i domini coerenti rendendo mediamente nullo il vettore di magnetizzazione.

Ad un tale trattamento è stato sottoposto il materiale utilizzato per la schermatura dei fotomoltiplicatori di AMS, chiamato tecnicamente *mu-metal*.

Come si può notare dalla figura 4.7, è stata realizzata una scatola con questo materiale la cui forma si adegua alla configurazione finale in cui i fotomoltiplicatori saranno montati presso le guide di luce dei contatori a scintillazione. La scatola presenta infatti tre sottili pareti interne (lo spessore è di 0.5 mm) per accogliere separatamente i tre fotomoltiplicatori ed è dotata di due coperchi; uno è provvisto

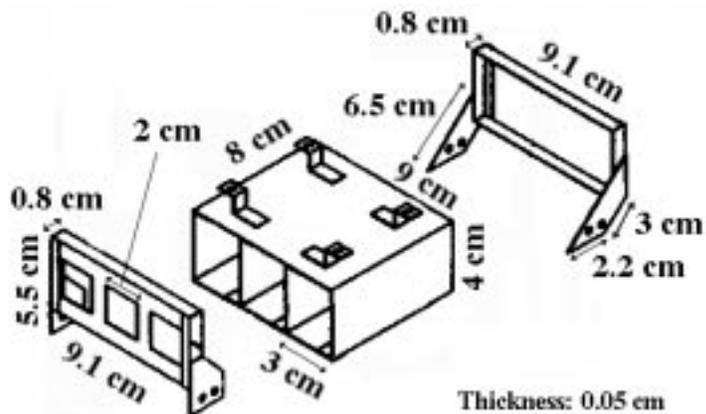


Figura 4.7: Particolare delle scatole montate presso ogni lato dei contatori a scintillazione del sistema TOF per la schermatura dei fotomoltiplicatori dai campi magnetici.

di tre aperture quadrate per permettere l'ingresso delle guide di luce (nella figura è quello sulla sinistra) mentre l'altro chiude completamente il lato opposto.

In laboratorio è stata fatta una prova di caratterizzazione di uno scintillatore immergendolo in un campo magnetico di 200 Gauss diretto parallelamente alla sua lunghezza; si è ottenuta una risoluzione temporale sul tempo di volo dei muoni dei raggi cosmici confrontabile (entro gli errori sperimentali) con quella valutata in condizioni normali; si è infatti passati da (150 ± 6) ps a (165 ± 7) ps. La stessa cosa si può dire per le risposte dei singoli fotomoltiplicatori che hanno subito variazioni superiori che vanno dal 2% al 10%; questo dimostra che le scatole di mu-metal offrono buone prestazioni dal punto di vista della schermatura.

Internamente è stato valutata l'intensità di campo magnetico presso il punto centrale delle tre aperture e per un campo esterno di 200 Gauss si è misurato, nel peggiore dei casi, il valore (5.50 ± 0.01) Gauss; in figura 4.8 possiamo vedere tutti i punti sperimentali.

markright

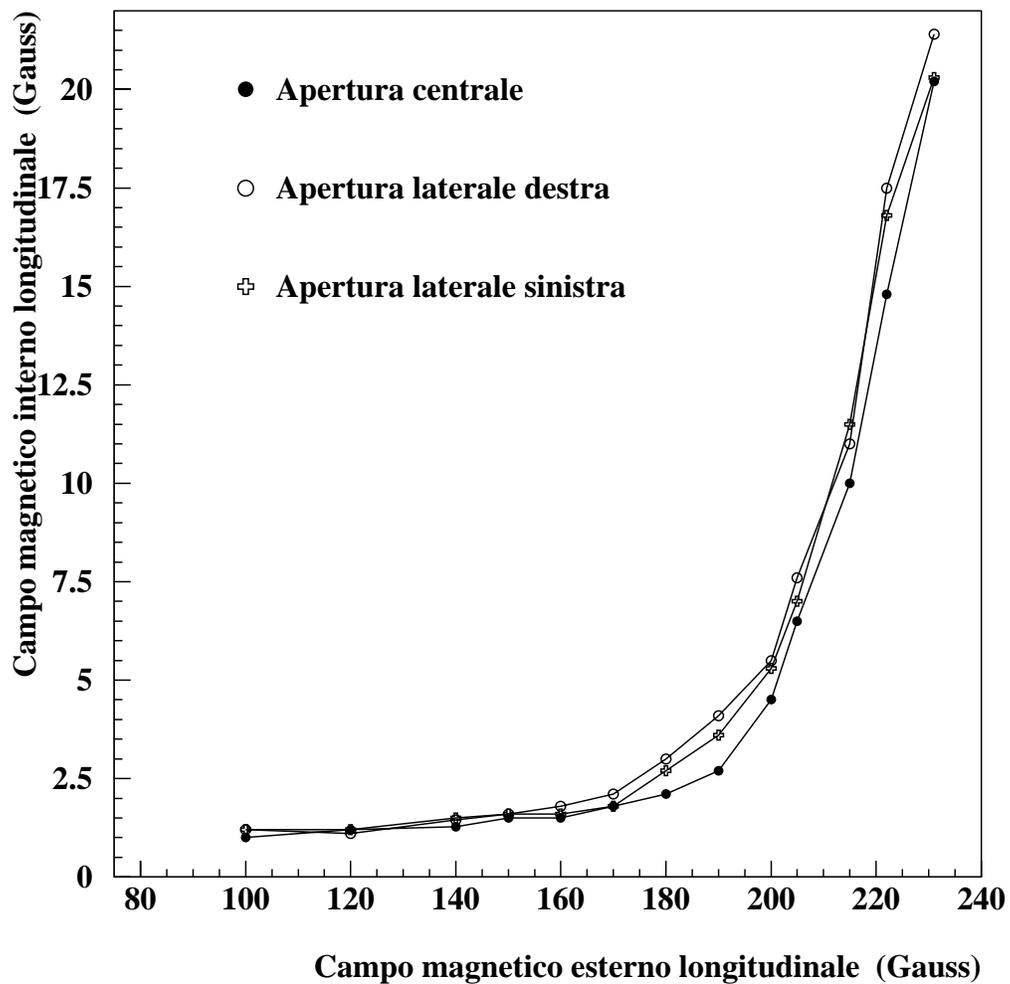


Figura 4.8: Campo magnetico esterno alle scatole di mu-metal in funzione del campo interno. È considerato il campo calcolato nel punto centrale di ciascuna delle tre cavità che accoglieranno i fototubi. Sono stati analizzati anche altri punti interni alla scatola ottenendo risultati confrontabili.

Conclusioni

Il contenuto essenziale del lavoro sperimentale presentato in questa tesi è la caratterizzazione dei fotomoltiplicatori che andranno montati sui plastici scintillatori che costituiscono i quattro piani del sistema per la misura del tempo di volo dello spettrometro AMS. Sono due i motivi principali che ci hanno condotto ad effettuare questo tipo di misura per ognuno dei 380 fototubi a disposizione per il montaggio finale:

- la verifica del funzionamento di ogni singola unità
- l'interpolazione della funzione che lega il fattore di guadagno dei fotomoltiplicatori alla tensione di alimentazione, servendosi di tre punti sperimentali.

La conoscenza della funzione di risposta è particolarmente importante perchè, una volta deciso il guadagno che si vuole ottenere in fase di funzionamento, è possibile determinare la tensione necessaria a ciascun dispositivo con una precisione di 2 Volts. Nota la tensione di lavoro è possibile selezionare triplette di fototubi con tensione di lavoro simile per ciascuna delle estremità degli scintillatori. Ricordiamo che la necessità dell'equalizzazione in tensione deriva dall'ottimizzazione della risoluzione temporale che si otterrà dai contatori per il tempo di volo (dato di fatto osservato sperimentalmente).

Dalle misure di calibrazione e dalle varie prove fatte in laboratorio sono emersi alcuni aspetti interessanti:

- Tutti i fotomoltiplicatori forniscono un alto fattore di guadagno con una tensione di alimentazione relativamente bassa. La casa costruttrice aveva assicurato un fattore almeno 10^6 ; le misure hanno confermato che riusciamo ad avere questo guadagno a partire da 650 V.

-
- L'incapsulamento dei piedini del fotomoltiplicatore con DOW CORNING 53-900, oltre a fornire l'isolamento elettrico necessario per il funzionamento in condizioni di bassissima pressione non modifica sensibilmente il fattore di guadagno. Neppure il test vibrazionale subito dal piano prototipo completo di scintillatori e fotomoltiplicatori sembra averne danneggiato in modo apprezzabile la risposta.
 - La sopportazione del campo magnetico è ottima. Un generico fotomoltiplicatore riduce la corrente anodica di circa il 20% in presenza di campi magnetici di induzione di pochi Gauss; considerando che le scatole schermanti in mu-metal sono tali da ridurre il campo esterno da 200 a 5 Gauss e che le variazioni riscontrate in termini di risposta sono vanno dal 2% al 10%, possiamo senz'altro concludere che le prestazioni in questo senso sono effettivamente superiori alla norma.

Il primo dei punti sopra elencati ci permette di collegarci alle limitazioni in potenza elettrica a cui si era accennato nel primo capitolo. Considerando che le tensioni di lavoro dei fotomoltiplicatori variano da 750 a 800 V, e che la somma delle resistenze del circuito partitore è circa $26 \text{ M}\Omega$, la corrente consumata da ciascun dispositivo sarà non superiore ai 30 mW. Per 336 fototubi avremo quindi un totale inferiore ai 12 W; il valore è più che accettabile considerando che AMS avrà a disposizione 1000 W.

Appendice 1: il database dei fotomoltiplicatori R5900 a disposizione per il montaggio del sistema TOF

In questa appendice viene presentata una parte della banca-dati dei fotomoltiplicatori ad uso di AMS; i dati si riferiscono alle unità scelte per il montaggio sui contatori del sistema TOF, comprese le riserve.

Come aiuto alla lettura, introduciamo una legenda per le abbreviazioni e gli inglesismi utilizzati nella tabella:

- **PM ident.number**: numero di identificazione assegnato a ciascun fotomoltiplicatore.
- **Nom. gain at 800 V**: guadagno nominale a 800 V.
- **Measured gain at 800 V**: guadagno misurato a 800 V.
- **Cathode Lum.Sens.**: sensibilità luminosa del catodo.
- **HV($g=2 \times 10^6$)**: tensione di alimentazione necessaria per ottenere un guadagno di 2×10^6 .
- **Id. tripletta**: numero di identificazione della tripletta di cui fa parte il fototubo.

PM ident. number	Nom. gain at 800 V(E+06)	Measured gain at 800 V(E+06)	Cathode Lum. Sens. ($\mu\text{A/lm}$)	HV($g=2 \times 10^6$) ± 2 (V)	Ident. Tripletta
200	4.89	5.8 ± 0.3	71.2	711	1
195	4.80	5.8 ± 0.3	86.9	709	1
241	4.91	5.6 ± 0.2	87.0	709	1
152	3.61	4.3 ± 0.2	74.5	732	2
405	2.29	4.1 ± 0.2	85.7	733	2
342	3.56	4.2 ± 0.2	85.7	736	2
364	2.75	3.1 ± 0.1	73.0	741	3
167	4.26	3.8 ± 0.2	74.0	741	3
361	3.36	4.1 ± 0.2	90.2	738	3
484	3.27	3.8 ± 0.2	77.7	743	4
240	2.21	3.6 ± 0.2	83.7	743	4
318	3.03	3.9 ± 0.2	83.8	743	4
259	3.81	3.9 ± 0.2	79.3	744	5
183	2.97	3.9 ± 0.2	81.5	744	5
517	2.96	4.0 ± 0.2	87.1	742	5
164	3.26	3.7 ± 0.2	74.2	744	6
168	4.25	3.9 ± 0.2	76.9	745	6
325	2.22	3.5 ± 0.2	92.9	745	6
203	3.09	3.6 ± 0.2	75.5	747	7
464	2.27	3.4 ± 0.2	78.4	747	7
406	2.13	3.5 ± 0.2	87.0	747	7
334	2.59	3.7 ± 0.2	78.8	747	8
188	3.95	3.6 ± 0.2	78.9	747	8
336	3.09	3.6 ± 0.2	82.0	748	8
418	1.70	3.5 ± 0.2	74.9	748	9
169	4.01	3.6 ± 0.2	75.4	748	9
174	2.15	3.5 ± 0.2	91.5	747	9
423	2.22	3.6 ± 0.2	73.4	748	10
518	2.09	3.6 ± 0.2	85.0	748	10
320	3.31	3.7 ± 0.2	85.7	749	10
145	3.03	3.5 ± 0.2	80.0	749	11
386	3.17	3.6 ± 0.2	80.1	750	11
339	2.15	3.4 ± 0.2	82.2	750	11
372	3.36	3.5 ± 0.2	76.4	751	12
321	3.44	3.5 ± 0.2	80.3	751	12
194	3.06	3.5 ± 0.2	84.9	751	12

PM ident. number	Nom. gain at 800 V(E+06)	Measured gain at 800 V(E+06)	Cathode Lum. Sens. ($\mu\text{A}/\text{lm}$)	HV($g=2 \times 10^6$) ± 2 (V)	Ident. Tripletta
254	3.43	3.5 \pm 0.2	79.0	752	13
374	2.23	3.4 \pm 0.2	79.4	752	13
419	1.77	3.4 \pm 0.2	80.2	752	13
125	3.35	3.3 \pm 0.2	74.0	751	14
332	3.10	3.4 \pm 0.2	80.2	750	14
114	1.79	3.7 \pm 0.2	88.7	750	14
345	2.20	3.4 \pm 0.2	70.3	752	15
288	2.89	3.2 \pm 0.2	81.6	756	15
289	2.84	3.3 \pm 0.2	92.5	753	15
387	3.29	3.3 \pm 0.2	73.3	753	16
267	3.38	3.3 \pm 0.2	78.3	753	16
285	2.53	3.4 \pm 0.2	91.0	753	16
354	2.32	3.2 \pm 0.2	75.1	755	17
199	3.28	3.3 \pm 0.2	82.0	755	17
173	2.67	3.5 \pm 0.2	85.1	752	17
368	2.24	2.7 \pm 0.1	69.3	772	18
182	2.37	3.2 \pm 0.2	73.8	756	18
316	2.59	3.2 \pm 0.2	84.8	756	18
353	2.78	3.3 \pm 0.2	79.6	757	19
340	2.49	3.2 \pm 0.2	81.8	757	19
223	2.67	3.3 \pm 0.2	82.9	757	19
191	2.92	3.4 \pm 0.2	73.6	757	20
407	2.15	3.1 \pm 0.2	75.9	758	20
459	3.11	3.2 \pm 0.2	88.3	758	20
142	2.14	3.2 \pm 0.2	73.2	758	21
150	2.73	3.2 \pm 0.2	81.7	758	21
171	1.69	3.2 \pm 0.2	83.9	758	21
156	2.83	3.1 \pm 0.1	71.1	759	22
400	2.16	3.1 \pm 0.2	79.0	758	22
380	2.15	3.2 \pm 0.2	86.9	758	22
377	2.08	3.2 \pm 0.1	74.5	759	23
331	1.44	3.2 \pm 0.2	78.0	759	23
94	1.06	3.3 \pm 0.1	92.8	759	23
396	2.99	3.2 \pm 0.2	72.3	760	24
133	2.68	3.2 \pm 0.2	77.1	760	24
467	2.14	3.2 \pm 0.2	89.9	760	24

PM ident. number	Nom. gain at 800 V(E+06)	Measured gain at 800 V(E+06)	Cathode Lum. Sens. ($\mu\text{A/lm}$)	HV($g=2 \times 10^6$) ± 2 (V)	Ident. Tripletta
209	3.08	3.1 ± 0.1	70.1	760	25
243	3.26	3.1 ± 0.1	83.5	760	25
499	1.73	3.2 ± 0.2	88.9	760	25
335	3.39	4.4 ± 0.2	79.1	731	26
212	4.21	4.3 ± 0.2	83.3	730	26
220	3.89	4.4 ± 0.2	85.5	731	26
411	2.55	3.1 ± 0.2	77.0	761	27
351	1.51	3.0 ± 0.1	81.4	761	27
438	1.59	3.1 ± 0.1	84.2	761	27
448	2.85	3.1 ± 0.1	77.8	763	28
399	1.64	3.2 ± 0.2	80.7	763	28
356	1.57	3.0 ± 0.1	85.5	762	28
410	2.07	3.1 ± 0.1	73.1	762	29
202	2.86	3.1 ± 0.1	80.3	763	29
244	2.30	2.9 ± 0.1	91.0	762	29
166	2.78	2.9 ± 0.1	75.3	763	30
239	3.06	3.1 ± 0.1	82.0	762	30
280	1.64	2.5 ± 0.1	88.3	781	30
121	2.78	3.1 ± 0.1	76.5	763	31
333	2.90	2.9 ± 0.1	77.6	763	31
422	2.34	3.0 ± 0.1	85.5	764	31
187	2.97	3.1 ± 0.1	74.3	763	32
509	1.71	2.9 ± 0.1	77.2	763	32
498	1.87	3.0 ± 0.1	91.8	764	32
519	2.93	3.0 ± 0.1	76.9	763	33
205	2.52	3.0 ± 0.1	79.3	763	33
303	1.73	2.3 ± 0.1	86.7	782	33
323	2.22	3.0 ± 0.1	78.5	763	34
501	1.05	3.0 ± 0.1	79.6	764	34
444	2.46	3.0 ± 0.1	84.1	764	34
394	1.69	3.0 ± 0.1	74.5	763	35
443	2.81	3.0 ± 0.1	81.8	764	35
216	2.81	3.0 ± 0.1	86.2	764	35
362	2.08	2.9 ± 0.1	72.0	766	36
151	2.54	2.8 ± 0.1	80.0	765	36
186	2.80	2.9 ± 0.1	87.5	765	36

PM ident. number	Nom. gain at 800 V(E+06)	Measured gain at 800 V(E+06)	Cathode Lum. Sens. ($\mu\text{A}/\text{lm}$)	HV($g=2 \times 10^6$) ± 2 (V)	Ident. Tripletta
522	2.84	2.9 ± 0.1	69.7	766	37
337	1.49	2.9 ± 0.1	82.8	766	37
162	3.38	2.9 ± 0.1	85.7	765	37
132	2.83	3.0 ± 0.1	68.1	764	38
301	2.31	2.9 ± 0.1	85.6	766	38
95	1.97	3.0 ± 0.1	91.8	766	38
371	2.34	3.0 ± 0.1	71.0	767	39
206	1.45	2.9 ± 0.1	85.5	767	39
389	1.78	2.9 ± 0.1	89.0	765	39
246	1.49	2.9 ± 0.1	73.3	767	40
376	2.73	2.9 ± 0.1	74.6	767	40
281	2.56	2.9 ± 0.1	93.1	766	40
256	2.89	2.9 ± 0.1	67.9	768	41
189	2.54	2.9 ± 0.1	80.0	768	41
328	2.22	2.9 ± 0.1	95.3	765	41
363	2.85	2.9 ± 0.1	65.5	769	42
287	2.29	2.8 ± 0.1	84.3	769	42
282	2.47	2.8 ± 0.1	89.9	769	42
391	2.17	2.8 ± 0.1	72.3	768	43
420	2.25	2.8 ± 0.1	77.7	770	43
270	2.66	2.8 ± 0.1	88.3	770	43
233	2.16	2.8 ± 0.1	74.0	769	44
450	2.72	2.7 ± 0.1	85.0	770	44
307	2.67	2.9 ± 0.1	86.2	769	44
201	2.94	2.8 ± 0.1	74.2	770	45
255	1.32	2.8 ± 0.1	76.0	771	45
96	1.42	2.7 ± 0.1	92.9	770	45
456	2.33	2.7 ± 0.1	66.9	771	46
472	2.16	2.8 ± 0.1	76.5	770	46
93	1.38	2.7 ± 0.1	97.7	770	46
457	2.07	2.8 ± 0.1	79.2	770	47
226	2.06	2.8 ± 0.1	79.5	771	47
268	2.22	2.8 ± 0.1	81.9	771	47
425	3.00	2.7 ± 0.1	78.6	771	48
234	2.68	2.8 ± 0.1	79.6	772	48
235	1.42	2.5 ± 0.1	80.2	774	48

PM ident. number	Nom. gain at 800 V(E+06)	Measured gain at 800 V(E+06)	Cathode Lum. Sens. ($\mu\text{A}/\text{lm}$)	HV($g=2 \times 10^6$) ± 2 (V)	Ident. Tripleta
395	2.28	2.8 ± 0.1	75.1	771	49
309	2.16	2.7 ± 0.1	80.5	773	49
283	1.50	2.7 ± 0.1	87.5	772	49
512	2.25	2.7 ± 0.1	66.1	774	50
495	2.40	2.7 ± 0.1	84.1	773	50
310	2.48	2.7 ± 0.1	88.6	772	50
136	2.45	2.6 ± 0.1	73.0	774	51
154	2.51	2.8 ± 0.1	82.1	773	51
179	2.64	2.6 ± 0.1	82.6	774	51
521	2.26	2.7 ± 0.1	71.1	773	52
478	2.51	2.5 ± 0.1	71.7	778	52
293	2.07	2.7 ± 0.1	97.3	774	52
269	2.59	2.6 ± 0.1	72.3	776	53
155	2.36	2.6 ± 0.1	81.0	774	53
230	1.63	2.7 ± 0.1	86.0	775	53
366	1.76	2.7 ± 0.1	74.4	774	54
388	2.37	2.6 ± 0.1	77.9	776	54
452	2.42	2.7 ± 0.1	85.1	776	54
124	2.66	2.6 ± 0.1	75.1	777	55
413	1.98	2.7 ± 0.1	75.2	776	55
505	1.06	2.4 ± 0.1	93.5	786	55
271	1.51	2.3 ± 0.1	70.7	788	56
369	1.92	2.5 ± 0.1	71.3	780	56
330	1.68	2.4 ± 0.1	96.9	781	56
392	1.50	2.4 ± 0.1	71.1	782	57
218	2.30	2.5 ± 0.1	85.8	781	57
493	2.30	2.5 ± 0.1	87.4	781	57
348	1.75	2.5 ± 0.1	70.4	782	58
475	1.35	2.3 ± 0.1	82.0	783	58
86	2.55	2.5 ± 0.1	84.0	782	58
489	1.77	2.4 ± 0.1	70.8	783	59
297	1.70	2.4 ± 0.1	81.7	784	59
294	2.04	2.3 ± 0.1	92.7	786	59
504	1.45	2.4 ± 0.1	77.5	833	60
237	1.22	2.3 ± 0.1	77.9	785	60
480	1.90	2.3 ± 0.1	83.0	786	60

PM ident. number	Nom. gain at 800 V(E+06)	Measured gain at 800 V(E+06)	Cathode Lum. Sens. ($\mu\text{A}/\text{lm}$)	HV($g=2 \times 10^6$) ± 2 (V)	Ident. Tripletta
221	2.51	2.3 ± 0.1	77.2	785	61
455	1.80	2.5 ± 0.1	80.1	785	61
514	1.82	2.4 ± 0.1	81.7	786	61
375	1.55	2.4 ± 0.1	71.0	786	62
490	1.99	2.4 ± 0.1	82.1	786	62
253	1.66	2.3 ± 0.1	83.3	786	62
462	1.83	2.4 ± 0.1	73.2	787	63
465	1.62	2.3 ± 0.1	75.8	788	63
476	1.47	2.3 ± 0.1	88.4	790	63
148	2.10	2.3 ± 0.1	73.4	787	64
441	1.19	2.3 ± 0.1	78.1	789	64
430	1.62	2.3 ± 0.1	83.1	789	64
468	1.84	2.3 ± 0.1	71.8	789	65
516	1.17	2.18 ± 0.10	81.5	791	65
428	1.34	2.4 ± 0.1	86.7	787	65
463	1.31	2.2 ± 0.1	73.1	789	66
482	2.10	2.2 ± 0.1	74.8	791	66
217	2.04	2.2 ± 0.1	87.2	791	66
344	1.88	2.2 ± 0.1	75.6	792	67
360	1.34	2.11 ± 0.10	76.2	795	67
252	2.02	2.2 ± 0.1	83.8	793	67
74	1.44	2.2 ± 0.1	72.1	792	68
449	2.01	2.2 ± 0.1	79.3	793	68
477	1.60	2.2 ± 0.1	85.5	794	68
170	2.00	2.2 ± 0.1	70.9	792	69
497	2.19	2.2 ± 0.1	73.1	793	69
291	1.54	2.13 ± 0.10	94.2	793	69
229	1.52	2.2 ± 0.1	73.7	793	70
390	1.12	2.2 ± 0.1	79.2	794	70
453	1.43	2.1 ± 0.1	82.3	793	70
385	2.10	2.3 ± 0.1	76.8	791	71
487	1.49	2.14 ± 0.10	77.4	794	71
424	1.80	2.2 ± 0.1	82.0	794	71
135	1.86	2.2 ± 0.1	69.3	794	72
461	1.55	2.16 ± 0.10	76.2	794	72
429	1.24	2.09 ± 0.09	90.3	794	72

PM ident. number	Nom. gain at 800 V(E+06)	Measured gain at 800 V(E+06)	Cathode Lum. Sens. ($\mu\text{A}/\text{lm}$)	HV($g=2 \times 10^6$) ± 2 (V)	Ident. Tripletta
471	1.83	2.05 \pm 0.10	70.9	795	73
469	1.31	2.09 \pm 0.09	75.0	796	73
292	1.25	2.2 \pm 0.1	97.3	796	73
264	1.35	2.16 \pm 0.10	78.8	796	74
357	1.02	2.1 \pm 0.1	81.3	796	74
215	1.31	2.16 \pm 0.10	83.2	795	74
515	1.06	2.05 \pm 0.09	76.4	896	75
447	1.12	2.08 \pm 0.09	81.0	797	75
70	1.51	2.06 \pm 0.09	87.4	797	75
426	1.57	2.02 \pm 0.09	73.4	799	76
500	1.40	2.0 \pm 0.1	76.7	797	76
454	1.72	1.94 \pm 0.10	83.2	798	76
276	1.40	1.91 \pm 0.09	76.5	800	77
279	1.32	2.01 \pm 0.09	81.1	800	77
311	1.28	2.00 \pm 0.10	83.8	799	77
434	1.43	1.92 \pm 0.10	64.9	801	78
439	1.18	2.03 \pm 0.10	83.7	802	78
327	1.13	1.91 \pm 0.09	97.1	802	78
458	1.89	1.79 \pm 0.09	72.3	808	79
245	1.97	1.89 \pm 0.09	75.5	807	79
445	1.83	1.89 \pm 0.09	82.3	804	79
115	1.43	2.0 \pm 0.1	65.4	803	80
85	1.90	1.95 \pm 0.1	85	802	80
300	1.29	1.96 \pm 0.10	94.1	802	80
347	1.12	1.94 \pm 0.09	59.7	804	81
382	1.29	1.94 \pm 0.09	86.5	804	81
329	1.83	1.98 \pm 0.10	97.8	804	81
231	1.33	1.92 \pm 0.09	72.3	806	82
437	1.07	1.85 \pm 0.08	82.2	807	82
225	1.10	1.86 \pm 0.08	90.6	807	82
431	1.05	1.80 \pm 0.08	78.5	808	83
306	1.67	1.93 \pm 0.09	80.0	805	83
474	1.39	1.81 \pm 0.08	85.0	808	83
481	1.52	1.75 \pm 0.08	73.8	813	84
266	1.37	1.73 \pm 0.08	75.0	812	84
383	1.61	1.76 \pm 0.08	86.2	813	84

PM ident. number	Nom. gain at 800 V(E+06)	Measured gain at 800 V(E+06)	Cathode Lum. Sens. ($\mu\text{A}/\text{lm}$)	HV($g=2 \times 10^6$) ± 2 (V)	Ident. Tripletta
511	1.09	1.80 ± 0.08	65.7	811	85
370	1.20	1.80 ± 0.09	67.2	812	85
314	1.07	1.77 ± 0.08	103.0	812	85
436	1.52	1.78 ± 0.09	73.9	810	86
451	1.60	1.77 ± 0.08	82.3	811	86
284	1.42	1.84 ± 0.09	88.9	810	86
352	1.39	1.72 ± 0.08	64.4	813	87
248	1.23	1.76 ± 0.09	81.3	814	87
249	1.07	1.73 ± 0.08	82.3	815	87
232	1.45	1.58 ± 0.08	72.2	821	88
350	1.02	1.60 ± 0.08	81.7	820	88
273	1.30	1.63 ± 0.08	83.9	820	88
263	1.34	1.63 ± 0.07	75.1	819	89
412	1.14	1.53 ± 0.07	78.4	825	89
381	1.06	1.57 ± 0.08	80.9	821	89
435	1.19	1.56 ± 0.07	73.9	825	90
224	1.62	1.49 ± 0.07	79.4	829	90
379	1.37	1.58 ± 0.08	81.9	823	90
177	1.11	1.40 ± 0.07	71.1	831	91
384	1.06	1.41 ± 0.07	73.6	830	91
290	1.10	1.53 ± 0.07	97.0	830	91
140	1.35	1.40 ± 0.07	72.4	833	92
277	1.17	1.44 ± 0.07	79.0	831	92
326	1.14	1.40 ± 0.07	86.6	833	92
274	1.37	1.40 ± 0.07	71.8	834	93
129	1.24	1.36 ± 0.07	72.1	836	93
296	1.30	1.43 ± 0.07	101.0	836	93
105	3.52	3.7 ± 0.2	60.8	749	94
247	1.65	3.5 ± 0.2	82.2	750	94
359	2.09	3.3 ± 0.1	92.3	750	94
251	1.58	1.97 ± 0.09	70.8	802	95
479	1.12	2.00 ± 0.09	72.6	800	95
302	1.21	1.89 ± 0.09	102.0	803	95
433	1.17	1.19 ± 0.06	68.1	847	96
305	1.03	1.22 ± 0.06	80.8	848	96
312	1.03	1.23 ± 0.06	88.0	849	96

PM ident. number	Nom. gain at 800 V(E+06)	Measured gain at 800 V(E+06)	Cathode Lum. Sens. ($\mu\text{A/lm}$)	HV($g=2 \times 10^6$) ± 2 (V)	Ident. Tripletta
402	4.09	4.2 ± 0.2	76.0	732	97
417	2.32	4.0 ± 0.2	81.0	737	97
485	4.00	4.2 ± 0.2	88.9	735	97
257	3.21	3.2 ± 0.2	68.9	759	98
398	2.08	3.0 ± 0.1	71.6	760	98
83	2.87	3.1 ± 0.1	107.0	760	98
157	3.12	3.1 ± 0.2	81.3	760	99
178	3.53	3.1 ± 0.1	83.2	761	99
180	3.06	3.2 ± 0.2	85.0	760	99
415	2.84	3.1 ± 0.1	74.9	760	100
473	2.78	3.1 ± 0.1	86.8	760	100
397	1.89	3.1 ± 0.1	87.3	762	100
466	2.75	2.6 ± 0.1	72.6	777	101
147	1.85	2.6 ± 0.1	79.0	777	101
408	1.88	2.6 ± 0.1	79.3	777	101
404	2.10	2.6 ± 0.1	74.8	779	102
213	1.73	2.5 ± 0.1	75.1	778	102
491	2.53	2.6 ± 0.1	81.7	777	102
131	1.77	2.7 ± 0.1	69.3	779	103
510	1.11	2.4 ± 0.1	79.8	779	103
442	1.54	2.5 ± 0.1	82.0	780	103
483	1.84	2.5 ± 0.1	77.9	787	104
338	1.41	2.3 ± 0.1	78.0	786	104
128	2.00	2.4 ± 0.1	78.6	786	104
219	1.27	1.38 ± 0.07	71.4	829	105
295	1.49	1.64 ± 0.08	75.2	821	105
298	1.35	1.63 ± 0.08	87.6	821	105
236	1.91	2.3 ± 0.1	72.3	790	106
104	5.03	6.1 ± 0.3	78.6	701	106
204	4.66	6.0 ± 0.3	79.2	709	106
460	1.57	2.3 ± 0.1	75.7	788	107
262	1.81	2.4 ± 0.1	76.1	790	107
358	1.16	2.3 ± 0.1	82.8	791	107
130	1.88	2.2 ± 0.1	70.3	793	108
494	1.60	2.2 ± 0.1	80.0	791	108
324	1.93	2.2 ± 0.1	84.3	791	108

PM ident. number	Nom. gain at 800 V(E+06)	Measured gain at 800 V(E+06)	Cathode Lum. Sens. ($\mu\text{A}/\text{lm}$)	HV($g=2 \times 10^6$) ± 2 (V)	Ident. Tripletta
513	2.11	3.6 ± 0.2	77.4	744	109
106	2.09	3.8 ± 0.2	80.4	742	109
76	2.62	3.8 ± 0.2	92.4	742	109
138	2.15	3.3 ± 0.2	70.2	757	110
143	3.28	3.3 ± 0.2	72.5	757	110
286	3.62	3.6 ± 0.2	91.0	751	110
496	1.52	1.74 ± 0.08	72.3	815	111
488	1.59	1.68 ± 0.08	77.2	818	111
508	1.52	1.69 ± 0.08	79.2	817	111
238	2.97	2.5 ± 0.1	75.7	777	112
427	2.57	2.6 ± 0.1	76.0	778	112
520	2.82	2.7 ± 0.1	76.2	774	112

Bibliografia

- [1] ALPHA MAGNETIC SPECTROMETER (AMS) Proposal (1995)
- [2] A. Yamamoto et al., Search for Antihelium of Cosmic Origin, BESS collaboration, Preprint 1996.
- [3] R. A. Alpher, H. Bethe, G. Gamow, "The origin of chemical elements". Physical Review, volume 73, number 7. 1/4/1948.
- [4] S. Hawking, "Dal Big Bang ai buchi neri". Rizzoli,1988.
- [5] Yu.Galaktionov and V.Shoutko,"Proton and antiproton spectra and rates during Shuttle Flight".AMS Note, 10/5/1997
- [6] M. S. Longair "High Energy Astrophysics".Volume 2. Cambridge University Press.
- [7] National research council board on Physics and Astronomy, "COSMOLOGY, a Research Briefing". Commission on Physical Sciences, Mathematics and Applications. National Academy Press, Washington, D.C. 1995.
- [8] A. Contin, "Results of a simulation of the AMS TOF counters". AMS Note, 01/12/1996
- [9] A. Contin, "Test results on the AMS-01 Prototype TOF counter".AMS Note 08/01/1996.
- [10] HAMAMATSU PHOTONICS K. K.,Photomultiplier tube: principle to application. Data process Laboratory K. K.

BIBLIOGRAFIA

- [11] W.R. Leo, Techniques for Nuclear and Physics experiment, Springer-Verlag, 1987.
- [12] HAMAMATSU PHOTONICS K. K., R5900:technical note (preliminary) . August 1996
- [13] L. B. Loeb, Fundamental processes of electrical discharge in gases, John Wiley & Sons, Inc. U.S.A.
- [14] DOW CORNING, “Dow Corning 93-500 Space-grade encapsulant”. Information Sheet. 19/11/1996
- [15] DOW CORNING, “Dow Corning 3140 RTV Coating”.Information Sheet. 19/3/1997