

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

Caratterizzazione in camera climatica dei
rivelatori a scintillazione in corso di
installazione a M.te Cimone per l'esperimento
Gamma-Flash

Relatore:
Prof. Giuseppe Baldazzi

Presentata da:
Tommaso Rondini

Correlatori:
Dott. Enrico Virgilli
Prof. Giuseppe Levi

Anno Accademico 2021/2022

Indice

Abstract	4
1 Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGFs)	6
2 Il progetto Gamma-Flash	9
2.1 Introduzione	9
2.2 Apparato sperimentale terrestre	11
2.2.1 Detector	11
2.2.2 Power Element (PE): il survoltore	17
2.2.3 DAM Redpitaya: Scheda di acquisizione	18
2.2.4 Ricevitore GPS	18
2.2.5 Weather station e switch di rete	19
3 Caratterizzazione termica dei componenti	20
3.1 Setup sperimentale	21
3.2 Test in temperatura del cristallo scintillatore e del fotomoltiplicatore . . .	24
3.2.1 Acquisizione	24
3.2.2 Presentazione dei risultati	25
3.3 Test in temperatura del survoltore	32
3.3.1 Acquisizione	32
4 Discussione dei risultati	38
4.1 Rivelatore	38
4.2 Survoltore	43
4.3 Correlazione carica-energia	43
Conclusioni	49
A Corrispondenza tra spettri di valori massimi e di valori integrali	53
B Dati per la calibrazione dei rivelatori già installati	56

Elenco delle figure

1.1	Curva di luce di un <i>TGF</i>	8
2.1	Cupola all'osservatorio <i>O. Vittori</i> e modello <i>CAD</i> del P/L aerotrasportabile	10
2.2	Schema del P/L terrestre con tutte le componenti	12
2.3	Schema e fotografia del rivelatore da 3 pollici	16
2.4	Immagine del rivelatore da 2 pollici	17
2.5	Immagine del survoltore	18
2.6	Immagine della scheda <i>STEMlab 125-14</i>	19
3.1	Spettro di radiazione tipico del ^{137}Cs (da letteratura).	22
3.2	Spettro di radiazione tipico del ^{22}Na (da letteratura).	22
3.3	Setup del test in temperatura del rivelatore	24
3.4	Picchi di forme d'onda: tensione in funzione del tempo	26
3.5	Spettro del cesio dai massimi nel test sul rivelatore	27
3.6	Spettro del cesio dai massimi di fit nel test sul rivelatore	27
3.7	Spettro del cesio dagli integrali nel test sul rivelatore	28
3.8	Spettro del cesio dagli integrali di fit nel test sul rivelatore	28
3.9	Spettro del sodio dai massimi nel test sul rivelatore	30
3.10	Spettro del sodio dai massimi di fit nel test sul rivelatore	30
3.11	Spettro del sodio dagli integrali nel test sul rivelatore	31
3.12	Spettro del sodio dagli integrali di fit nel test sul rivelatore	31
3.13	Setup del test in temperatura del survoltore	33
3.14	Spettro del cesio dai massimi nel test sul survoltore	33
3.15	Spettro del cesio dai massimi di fit nel test sul survoltore	34
3.16	Spettro del cesio dagli integrali nel test sul survoltore	34
3.17	Spettro del cesio dagli integrali di fit nel test sul survoltore	35
3.18	Spettro del sodio dai massimi nel test sul survoltore	35
3.19	Spettro del sodio dai massimi di fit nel test sul survoltore	36
3.20	Spettro del sodio dagli integrali nel test sul survoltore	36
3.21	Spettro del sodio dagli integrali di fit nel test sul survoltore	37

4.1	Ingrandimento dello spettro del cesio sul picco a 661 keV nel test del rivelatore con fit	39
4.2	Ingrandimento dello spettro del sodio sul picco a 511 keV nel test del rivelatore con fit	40
4.3	Ingrandimento dello spettro del sodio sul picco a 1274 keV nel test del rivelatore con fit	40
4.4	Andamento del valore medio e della deviazione standard del rivelatore attorno al picco a 661 keV	41
4.5	Andamento del valore medio e della deviazione standard del rivelatore attorno al picco a 511 keV	41
4.6	Andamento del valore medio e della deviazione standard del rivelatore attorno al picco a 1274 keV	42
4.7	Ingrandimento dello spettro del cesio sul picco a 661 keV nel test del survoltore con fit	44
4.8	Ingrandimento dello spettro del sodio sul picco a 511 keV nel test del survoltore con fit	44
4.9	Ingrandimento dello spettro del sodio sul picco a 1274 keV nel test del survoltore con fit	45
4.10	Andamento del valore medio e della deviazione standard del survoltore attorno al picco a 661 keV	45
4.11	Andamento del valore medio e della deviazione standard del survoltore attorno al picco a 511 keV	46
4.12	Andamento del valore medio e della deviazione standard del survoltore attorno al picco a 1274 keV	46
4.13	Fit della correlazione energia-carica alle varie temperature	47
4.14	Fit della correlazione energia-carica alle varie temperature	48
4.15	Pendenza per la calibrazione del rivelatore	51
4.16	Intercetta per la calibrazione del rivelatore	52
A.1	Correlazioni tra metodo a massimi e a integrali degli spettri del sodio del rivelatore	54
A.2	Correlazioni tra metodo a massimi e a integrali degli spettri del sodio del survoltore	55
B.1	Spettri del fondo e del potassio dai massimi	57
B.2	Spettri del fondo e del potassio dagli integrali	58

Abstract

Questa tesi di Laurea è legata agli aspetti tecnologici dell'esperimento *Gamma-Flash*, progetto coordinato dall'*Istituto Nazionale di Astrofisica* finanziato dall'*Agenzia Spaziale Italiana* che ha lo scopo di studiare eventi altamente energetici che avvengono in atmosfera denominati *Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGFs)*.

Questi eventi hanno uno stretto legame con i fulmini che avvengono durante episodi temporaleschi. I fulmini producono particelle ionizzate ed elettroni che per effetto *bremmstrahlung* emettono radiazione in un ampio intervallo di energie da centinaia di keV a decine di MeV. Questo tipo di eventi è stato rivelato da numerose missioni da satellite fin dagli anni '90 (*BATSE/CGRO*) e successivamente con i satelliti *RHESSI*, *AGILE*, *BeppoSAX* e *Fermi*. Molto più rare sono le osservazioni di questi eventi da terra o da rivelatori posti su velivoli. *Gamma-Flash* ha lo scopo di realizzare strumentazione per la rivelazione di questi eventi da un osservatorio posto su M.te Cimone (2165 m s.l.m.) e su un aereo in grado di raggiungere quote di 8 - 10 000 m.

L'esperimento viene effettuato attraverso rivelatori a scintillazione e con elettronica dedicata la cui risposta in energia dipende dalla temperatura di funzionamento. È quindi importante conoscere come il detector si comporta al variare della temperatura, che, soprattutto nell'esperimento terrestre, può variare di decine di gradi anche su tempi scala brevi. Scopo di questa tesi è stato quindi di caratterizzare uno dei rivelatori che saranno posti all'*Osservatorio Climatico Ottavio Vittori* di M.te Cimone utilizzando una camera climatica che simula le condizioni di temperatura variabili e riscontrabili durante l'esperimento.

Nel primo Capitolo della tesi viene descritto il fenomeno dei *TGFs* riportando lo stato attuale delle conoscenze di questi fenomeni, fornendo quindi attraverso un lavoro di ricerca in letteratura le basi scientifiche alla preparazione della tesi. Nel Capitolo 2 viene descritto il progetto *Gamma-Flash* fornendo una panoramica d'insieme e una discussione più approfondita sugli elementi sperimentali che costituiscono il lavoro di tesi che viene sviluppato nei capitoli successivi. Nel terzo capitolo viene riportata l'attività sperimentale effettuata presso l'istituto *INAF OAS* di Bologna. Per tale attività è stato fatto uso di sorgenti radioattive di calibrazione. Nel quarto Capitolo viene fatta la discussione dei risultati e viene riportata una lista di azioni che possono essere adottate per la calibra-

zione in sito e in tempo reale dei rivelatori. Nella tesi sono anche riportate due Appendici dedicate alla descrizione del tipo di calibrazione che è stata effettuata tramite un codice scritto in *LabVIEW* ed i risultati dell'impiego di una sorgente di calibrazione naturale ad alta densità di potassio (idrossido di potassio, KOH) che può essere liberamente trasportata e impiegata, utile per ridurre il tempo richiesto per effettuare una misura statisticamente significativa.

Parole chiave: raggi gamma dalla terra, tasso di fulminazione, rivelatori di radiazione, scintillatori, fotomoltiplicatori, analisi termiche, Gamma-Flash.

Capitolo 1

Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGFs)

Nonostante la relativamente alta frequenza dei fenomeni temporaleschi, dei fulmini e dei fenomeni elettrici correlati, molti importanti processi elettromagnetici nella nostra atmosfera sono poco conosciuti. Ad esempio, sono ancora poco conosciuti i meccanismi di carica e scarica delle nubi temporalesche, il meccanismo che innesca il fulmine, la sua propagazione in atmosfera, le scariche che avvengono fra nube e nube. Negli ultimi anni sono stati prodotti numerosi studi e relativi articoli scientifici riguardanti la produzione, il trasporto e l'interazione delle particelle con la radiazione in atmosfera. È ormai noto che all'interno delle scariche dei fulmini vengono liberati elettroni che emettono a loro volta radiazioni X e gamma. I lampi di raggi gamma terrestri (*Terrestrial Gamma-ray Flashes*, *TGFs*) sono esplosioni di radiazione di energia estremamente variabile da qualche centinaio di keV fino a decine o centinaia di MeV, rilevabili a centinaia di km di distanza, osservati per la prima volta da esperimenti spaziali e individuati successivamente anche da esperimenti terrestri o situati su velivoli. La presenza di questi elettroni aumenta notevolmente la conduttività dell'aria, influenzando la fisica delle nubi e quindi dei fulmini. Il campo della fisica delle particelle e delle radiazioni energetiche in atmosfera terrestre (ma anche più recentemente nelle atmosfere di altri pianeti) è chiamato *fisica atmosferica delle alte energie*. Questo campo è multidisciplinare e coinvolge lo studio tradizionale dell'atmosfera e dell'elettricità atmosferica, la fisica degli sciami atmosferici prodotti dai raggi cosmici, la fisica spaziale, la fisica dei plasmi, fino all'inaspettato legame con il campo della sicurezza aerea.

La connessione fra la regione in cui avviene un fenomeno temporalesco e i *TGFs* venne per la prima volta individuata dallo strumento *BATSE* a bordo dell'esperimento *CGRO* (*Compton Gamma-ray Observatory*) [7], una missione della *NASA*. *BATSE* consisteva di otto elementi di materiale scintillatore con una area efficace complessiva di 2000 cm² sensibile alle energie da 25 keV ad 1 MeV, montati agli angoli di *CGRO* come agli angoli di un cubo. In questo modo *BATSE* poteva individuare rozzamente la direzione di incidenza della radiazione, confrontando il livello di radiazione da differenti elementi rivelatori. Sorprendentemente, venne individuato che una parte degli eventi gamma erano

più brevi dei lampi di raggi gamma di origine cosmica e che provenivano da Terra, cioè che i rivelatori affacciati verso la Terra contavano un flusso maggiore dimostrando quindi l'origine terrestre di questi eventi. Venne anche osservato che tali eventi erano concomitanti alla presenza di temporali in corrispondenza della zona terrestre da cui provenivano i *TGFs*. Una tipica curva di luce ottenuta dai dati *BATSE* - cioè l'integrazione del numero di conteggi misurati in una certa banda spettrale o nell'intera banda di lavoro di uno strumento in funzione del tempo di osservazione - è mostrata in Fig. 1.1.

I *TGFs* vennero anche osservati successivamente con il satellite *RHESSI*, un piccolo osservatorio dedicato allo studio dei *flares* solari. Il rivelatore è costituito da nove unità al germanio divisi ciascuno in segmenti anteriore e posteriore. Il segmento anteriore era utilizzato per realizzare immagini dei *flares* solari nella banda di energia 3 keV - 2.7 MeV. La parte posteriore era invece sensibile nella banda di energia 30 keV - 17 MeV. *RHESSI* era quindi in grado di individuare eventi fino a circa 20 MeV. Nei primi 183 giorni di osservazione *RHESSI* misurò 83 *TGFs* e tale numero portò ad una stima di 50 *TGFs*/giorno. Queste misure mostrarono che il fenomeno dei *TGFs* era molto più comune rispetto a quanto era precedentemente assunto.

Nel 2008 venne lanciato il satellite *Fermi Gamma Ray Space Telescope* che consiste di due strumenti, il *LAT* (*Large Area Telescope*) e il *GBM* (*Gamma-ray Burst Monitor*). Soltanto il secondo strumento, costituito da 12 scintillatori allo NaI viene impiegato per misurare i *TGFs*. Analogamente a *BATSE*, il sistema di trigger per l'identificazione di un *TGF* si basa sul fatto che il rate di conteggio cresce al di sopra del fondo. Facendo una ricerca degli eventi provenienti da Terra 234 *TGFs* vennero identificati in 591.8 ore di integrazione.

AGILE, lanciato nel 2007 e sensibile a fotoni nel range di energie 0.35 - 100 MeV mostrò, grazie allo strumento *MCAL*, la capacità di individuare un rate di 10 *TGFs* al mese con energie misurate fino a 40 MeV [10]. Successive misure hanno dimostrato l'esistenza di eventi fino a 100 MeV. *AGILE MCAL* ha localizzato 8 *TGFs* con fotoni gamma sopra i 20 MeV con una accuratezza migliore di 10 gradi. L'orbita quasi perfettamente equatoriale di *AGILE* fa sì che gli strumenti osservino sempre la stessa zona terrestre ad ogni orbita nella fascia equatoriale in cui il rate di fulminazione è massimo. Grazie ad *AGILE* la stima globale di *TGFs* è stata corretta in 220 - 570 *TGF* al giorno. *TGFs* sono stati identificati anche all'interno dei dati d'archivio di *BeppoSAX* [17] e, più recentemente dell'esperimento *ASIM* a bordo della *ISS* [12], fra i primi esperimenti sviluppati e appositamente dedicati all'individuazione dei *TGFs*, mentre i precedenti strumenti avevano misurato emissione di *TGFs* come obiettivo secondario ad altri casi scientifici (ad esempio la localizzazione e la misura della distanza dei lampi di raggi gamma, *GRBs*). Per gli eventi misurati da strumenti spaziali, la durata tipica dei *TGFs* è di 100 - 400 μ s, mentre solo in qualche caso la durata è considerevolmente più lunga o più breve, benché sia ipotizzato che i più lunghi eventi siano l'effetto di una sovrapposizione di eventi della durata tipica di 100 - 200 μ s.

Dato che i *TGFs* vennero inizialmente individuati da satellite, visto il significativo

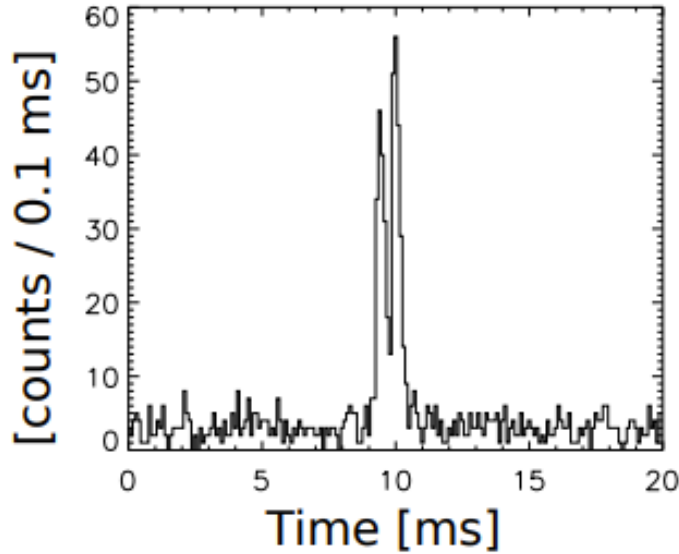


Figura 1.1: La tipica curva di luce di un *TGF* osservato da *BATSE* a bordo di *CGRO* (immagine di archivio *NASA*).

numero di eventi con energia < 50 keV e dato l'alto assorbimento atmosferico, tali eventi vennero dapprima classificati come segnali prodotti in alta atmosfera (> 30 km) poiché soltanto così essi avrebbero potuto essere individuati alla distanza degli strumenti spaziali. Successivi studi hanno invece mostrato che lo spettro cumulativo era consistente con la produzione degli eventi ad una quota di $\sim 10 - 15$ km, in associazione con la propagazione del fulmine intranube [1]. Altri studi sull'attenuazione della radiazione con la quota, tenendo conto della forma spettrale e del massimo che è ad una energia di circa 20 MeV o superiore, è ora largamente riconosciuto che i *TGFs* sono prodotti attraverso il fenomeno della radiazione di *bremstrahlung* da elettroni di alta energia accelerati nel campo elettrico presente all'interno delle nubi temporalesche.

Sebbene con un tasso di osservazione molto basso, negli anni recenti alcuni *TGFs* sono stati rilevati anche da terra. Due casi sono stati rivelati attraverso rivelatori a scintillazione di NaI(Tl) in associazione con fulmini indotti artificialmente lungo un filo di terra portato in atmosfera da un razzo [3]. Due casi di *TGFs* osservati da terra sono stati individuati in correlazione con fulmini nube-terra, misurati in Florida dall'osservatorio di fulmini *Lightning Observatory in Gainesville (LOG)* [15] e dal *Thunderstorm Energetic Radiation Array (TERA)* [2]. *TGFs* sono stati osservati anche da terra durante temporali autunnali in Giappone dai rivelatori di radiazione alla centrale nucleare *Kashiwazaki-Kariwa* in Niigata [4]. Un *TGF* è stato individuato da aereo attraverso l'esperimento *Airborne Detector for Energetic Lightning Emissions (ADELE)* [13].

Capitolo 2

Il progetto Gamma-Flash

2.1 Introduzione

Gamma-Flash è un programma italiano dedicato allo studio delle proprietà delle radiazioni e delle particelle associate ai flash di raggi-gamma terrestri. L'obiettivo del programma è sviluppare un sistema di rivelazione customizzato (*payload*, P/L) contenente rivelatori di raggi gamma e neutroni, posizionati a terra e su velivoli, per effettuare misure di emissioni di fotoni e particelle ad alta energia. Gli obiettivi principali di *Gamma-Flash* sono l'indagine delle emissioni ad alta energia nei temporali, che possono avere un impatto sostanziale in molti campi, come il cambiamento climatico locale e globale, e la fisica del plasma atmosferico. Il sistema di rivelazione dell'esperimento *Gamma-Flash* è stato progettata per rilevare sia i fenomeni transienti della durata di poche centinaia di μs , sia le emissioni di raggi gamma più prolungate e più frequenti denominate *gamma-ray glows* che possono avere una durata di minuti, sia le emissioni di particelle ad alta energia associate alla presenza dei fulmini (ad esempio i neutroni).

Il team *Gamma-Flash* è un gruppo in cui si intrecciano molteplici competenze quali lo studio teorico e tramite simulazioni dei *TGFs*, le capacità di analisi dati proveniente da molteplici anni di attività di sviluppo nel progetto *AGILE*, le tecnologie di rivelazione, la scienza dell'atmosfera, l'astrofisica delle alte energie e l'avionica. Questo connubio di esperienze e competenze rende il progetto altamente multidisciplinare.

L'esperimento *Gamma-Flash* è fondamentalmente suddiviso in due principali obiettivi. Una suite di detector è stata installata presso l'osservatorio *O. Vittori* sulla cima del Monte Cimone (2165 m s.l.m., Italia centro-settentrionale) (si veda Fig. 2.1). Recenti studi [18] hanno dimostrato che tale osservatorio, per le sue caratteristiche orografiche rappresenta un luogo ideale per l'alta frequenza dei temporali (in particolare estivi) e quindi per la potenziale rivelazione delle emissioni di radiazione e particelle di alta energia associate. L'intera suite di detector è installata all'interno di una cupola per antenna satellitare di tipo marino, presente sulla terrazza dell'osservatorio e non più utilizzata

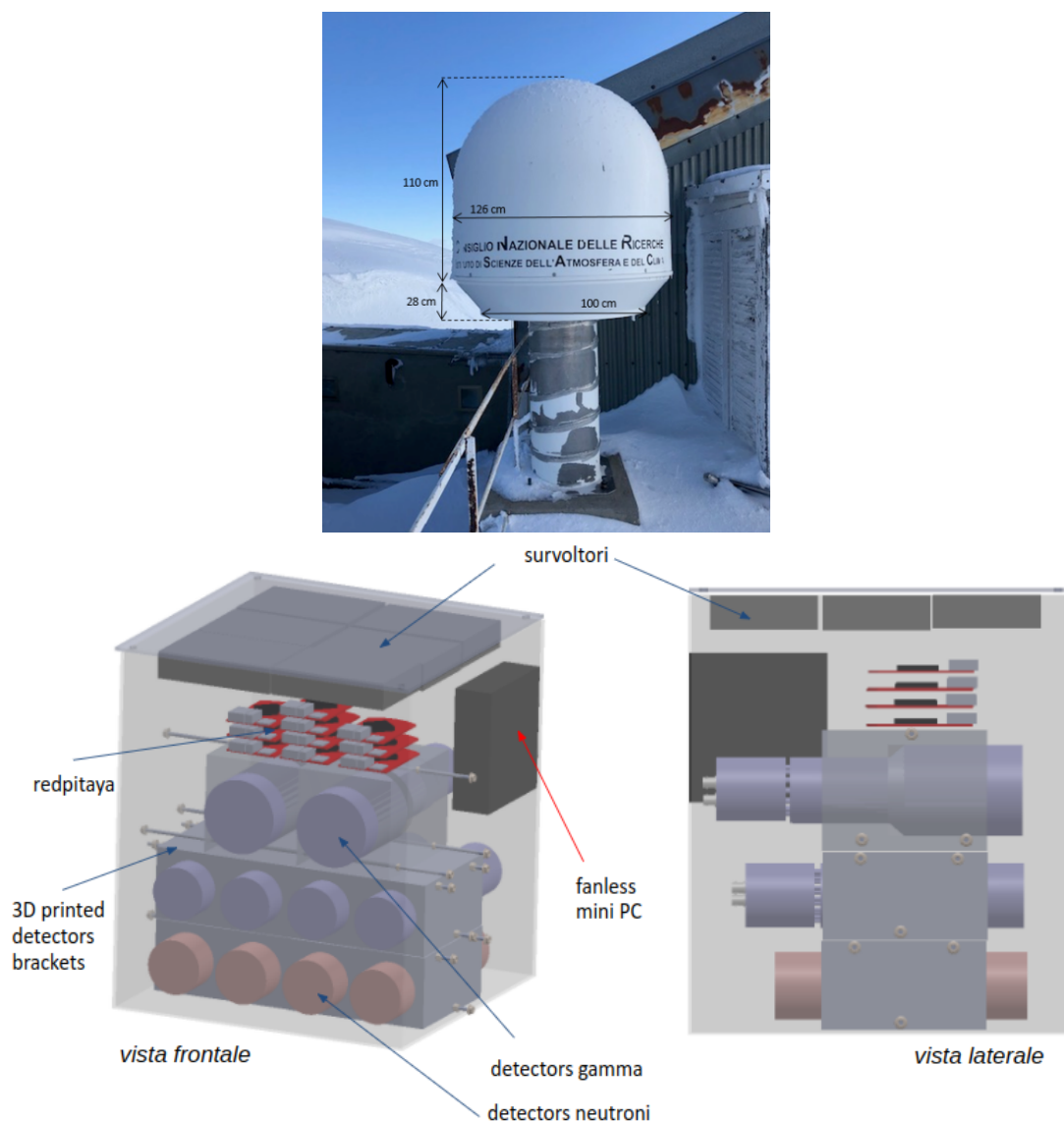


Figura 2.1: In alto: cupola presente all'osservatorio *O. Vittori* contenente il P/L terrestre dell'esperimento *Gamma-Flash*. In basso: due vedute del modello *CAD* realizzato per il P/L aerotrasportabile.

per un precedente esperimento. La cupola di materiale trasparente alla radiazione e alle particelle di nostro interesse, è un contenitore ideale perché permette di mantenere la strumentazione sollevata da terra e al riparo dagli agenti meteorologici (pioggia, vento, neve). Un secondo P/L (Fig. 2.1 in basso) è in corso di realizzazione e verrà installato su un velivolo con l'obiettivo di effettuare delle campagne scientifiche di rivelazione in prossimità di eventi temporaleschi. Le campagne di misura aeree, che saranno precedute

da una attività di test e calibrazione a terra e in volo, verranno effettuate nell'autunno 2022.

L'esperimento *Gamma-Flash* è finanziato dall'*Agenzia Spaziale Italiana (ASI)* ed è guidato dall'*Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF)*, con la collaborazione di vari enti di ricerca scientifici-tecnologici ed Università italiane. *INAF*, grazie anche all'esperienza acquisita negli anni, oltre ad avere il ruolo di coordinamento dell'intero progetto ha sia il compito dell'interpretazione scientifica dei dati acquisiti, sia il compito di realizzare e gestire la suite di detector per la rivelazione della radiazione X e gamma utilizzati per il P/L terrestre e per il P/L di volo. L'*Università di Roma Tor Vergata* ha il ruolo di fornire e installare rivelatori per neutroni termici e neutroni veloci in entrambi i P/L di terra e di volo. L'*Università di Padova* si occupa di determinare se la radiazione e le particelle prodotte da un *TGF* possa avere effetti negativi su componenti e strumentazione elettronica. L'*Istituto della Scienza dell'Atmosfera e del Clima (ISAC)* ha il ruolo di valutare la componente meteorologica nell'esperimento, di organizzare la logistica per l'accesso all'esperimento di M.te Cimone che si trova all'interno di una area di competenza della Aeronautica Militare italiana e di preparare la logistica per il trasporto aereo del sistema di rivelazione.

2.2 Apparato sperimentale terrestre

In questa tesi ci si è occupati esclusivamente del P/L terrestre dell'esperimento *Gamma-Flash* pertanto verrà descritta soltanto la strumentazione installata in questo apparato. L'esperimento con tutti i componenti principali viene schematizzato come mostrato in Fig. 2.2. Nelle prossime sezioni verranno descritte le principali componenti. Il P/L di volo è realizzato con una architettura e un sistema di rivelazione molto simili al P/L di terra pertanto le considerazioni che verranno fatte nei capitoli successivi potranno essere adattate anche per il rivelatore da installare su aereo.

2.2.1 Detector

Ogni unità di rivelazione è composta da un cristallo scintillatore e da un fotomoltiplicatore.

Cristalli scintillatori

Per la rivelazione dei raggi gamma si sono utilizzati degli scintillatori allo ioduro di sodio (NaI) attivati al tallio. Questo cristallo inorganico è tra i più diffusi per la rivelazione di particelle ionizzate e fotoni.

Il meccanismo degli scintillatori inorganici cristallinici dipende dalle loro bande di legame: il passaggio di una particella carica porta alla formazione di una coppia elettrone-

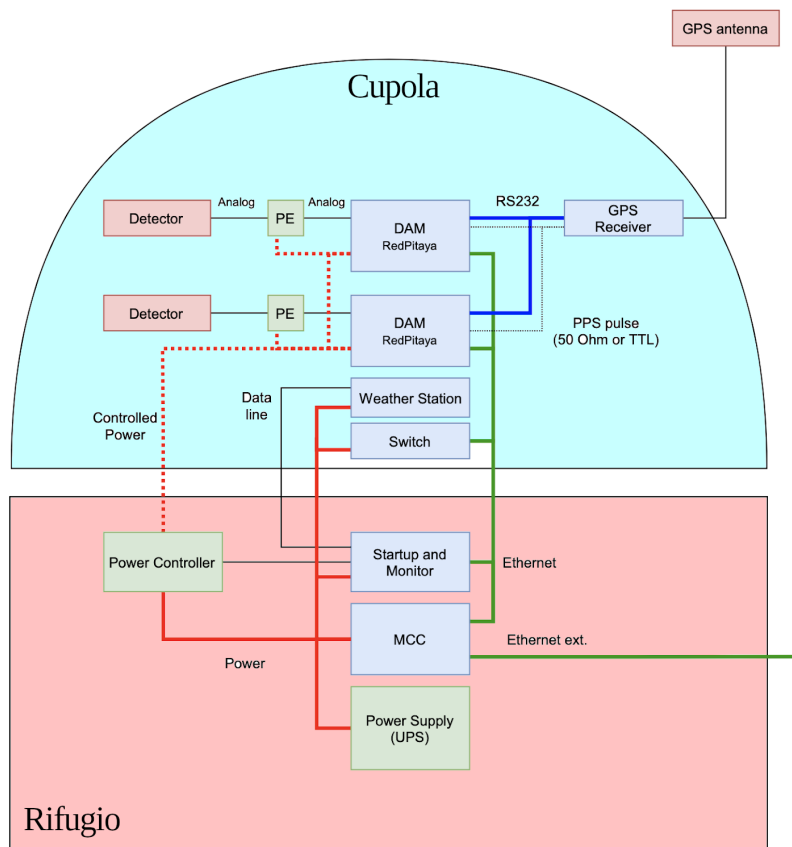


Figura 2.2: Schema del P/L terrestre con tutte le componenti che rappresentano il sistema installato nella cupola presente sulla terrazza del laboratorio *O. Vittori* di M.te Cimone (componenti racchiusi nell'area colorata in azzurro) e le componenti installata all'interno del rifugio (area colorata in rosso).

lacuna rispettivamente nella banda di conduzione e di valenza; la diseccitazione, ovvero la loro ricombinazione è il fenomeno poi osservato. Questo processo è diverso da quello che accade negli scintillatori organici: in essi ad eccitarsi sono le singole molecole, quindi questi materiali fungono da scintillatori in qualunque fase (solida, liquida e gassosa), solitamente modificando un legame molecolare π . Gli scintillatori inorganici invece, sfruttando le bande elettroniche, funzionano solo allo stato solido in condizioni di alta regolarità, come nei cristalli.

Nei cristalli puri, tuttavia, l'energia di gap è tale da sfavorire la ricombinazione attraverso un'emissione fotonica; inoltre, tale fotone non sarebbe in banda ottica. Si "attiva" perciò il cristallo con un altro elemento che riduce la separazione tra le bande, creando dei livelli intermedi fra la banda di conduzione e la banda di valenza. Il passaggio di una

particella carica crea un elevato numero di coppie elettrone-lacuna. Le lacune traslano velocemente nel sito di un attivatore, ionizzandolo, mentre l'elettrone viaggia nella banda di conduzione finché non si ricombina con la lacuna, emettendo un fotone. Questo fenomeno è chiamato *fluorescenza* e la vita media di questi stati eccitati è compresa tra 30 e 500 ns. Esiste anche un altro fondamentale motivo per cui si preferiscono cristalli attivati piuttosto che puri. Nei cristalli puri il fotone emesso per fluorescenza ha la stessa energia di quello assorbito per eccitare il cristallo, quindi potrebbe a sua volta creare un'altra coppia elettrone-lacuna. Questo processo è detto *auto-assorbimento*. In quelli attivati l'energia emessa è inferiore a quella necessaria per eccitare il cristallo, perciò l'auto-assorbimento non è possibile e ogni fotone emesso è stato generato dalla radiazione incidente senza possibilità di essere riassorbito.

La ricombinazione attraverso fluorescenza è il fenomeno che si vuole massimizzare per la rivelazione, tuttavia altri fenomeni competono con essa per la ricombinazione. Lo stato eccitato in cui si trova l'elettrone potrebbe non permettere la transizione per emissione fotonica con lo stato fondamentale. Se da questo livello transita al livello fondamentale senza emissione di fotoni si parla di *fosforescenza* ed essendo meno probabile e liberando meno energia produce un segnale ritardato e a lunghezza d'onda maggiore. Altrimenti, invece di decadere direttamente allo stato fondamentale potrebbe acquisire energia non radiativa, giungere allo stato eccitato della banda di valenza e decadere per foto-emissione. Il tal caso occorre fornire energia (solitamente termica) e il fenomeno che si verifica è la *fluorescenza ritardata*: la radiazione emessa ha la stessa lunghezza d'onda della fluorescenza ma tale emissione avviene successivamente. Altre volte la transizione avviene senza l'emissione di fotoni ma da uno stato che consentirebbe la fluorescenza, perdendo quindi la rivelazione di tale energia. Tale fenomeno viene chiamato di *quenching*.

Un buon scintillatore è quello che riesce a trasmettere il maggior numero possibile di fotoni. Oltre al rapporto fotoni creati su energia entrante è rilevante anche come questi fotoni vengano trasmessi. I fenomeni principali che possono ridurre la quantità di luce trasmessa sono due: l'auto-assorbimento e la perdita ai bordi. Siccome nei cristalli attivati il primo fenomeno è pressoché inesistente, occorre minimizzare il secondo.

Poiché i fotoni vengono prodotti in tutte le direzioni, solo una parte dei fotoni prodotti attraversa la superficie di contatto con il tubo fotomoltiplicatore (PMT) e viene effettivamente raccolta, amplificata e misurata. Tutti gli altri fotoni per essere raccolti devono essere il più possibile riflessi verso il PMT. Si osserva che il processo più fruttuoso è quello di sfruttare una *riflessione diffusa* applicando un materiale bianco diffondente su tutte le superfici, ovviamente ad esclusione della parte a contatto con il fotomoltiplicatore. Solitamente all'interfaccia fra cristallo scintillatore e PMT avvengono effetti di riflessione indesiderati che portano alla perdita di segnale. Per limitare questo effetto occorre ridurre la differenza fra gli indici di rifrazione dei due materiali, togliendo anche la rifrazione con l'aria ricoprendo la giunzione o con grasso ottico o con silicone. Questo tipo di accoppiamento permette di limitare anche la possibile separazione fra PMT e cristallo

scintillatore nel caso in cui l'escursione termica sia tale da provocare effetti di dilatazione termica dei componenti. Ogni scintillatore deve essere isolato dalla luce circostante per evitare effetti di contaminazione della luce di scintillazione. Per cristalli non igroscopici è sufficiente ricoprire la superficie con una carta nera; se si usano materiali igroscopici occorre invece inserire il cristallo all'interno di una struttura metallica che deve avere uno spessore sufficientemente sottile per permettere il passaggio della radiazione e quindi permetterne la rivelazione senza essere assorbito dalle pareti esterne.

La dimostrazione che lo ioduro di sodio attivato al tallio (con una concentrazione di circa 1×10^{-3} mol per mole di NaI) sia uno scintillatore fu compiuta nel 1948 da Robert Hofstadter. Tale cristallo ha una resa di fotoni creati molto alta rispetto agli scintillatori dell'epoca e la facilità di crearne di grandi dimensioni a basso costo lo rese molto utilizzato. La luce ceduta per eccitazione da raggi γ è di 38 000 fotoni per MeV, con un'efficienza massima del 12%. Il tempo di decadimento per un impulso di scintillazione è 230 ns, mentre la fosforescenza ha un ritardo caratteristico di 0.15 s con un contributo del 9% di tutta la luce ceduta [9].

I principali svantaggi dello NaI(Tl) sono il suo essere igroscopico, la sua fragilità per shock meccanici o termici e la sua sensibilità a una prolungata esposizione a radiazioni energetiche (sono sufficienti 10 Gy per danneggiarlo [8]). Tuttavia, sono sufficienti alcune ore a temperatura ambiente e senza sorgenti per tornare a un corretto funzionamento. Altre volte questo trattamento non è sufficiente per rendere il cristallo di nuovo funzionante, specie se il problema è dovuto a infiltrazioni d'acqua (per le quali non c'è rimedio); quando danneggiato il cristallo perde il suo naturale colore bianco e diventa giallognolo.

I cristalli utilizzati nell'esperimento *Gamma-Flash* sono composti da NaI(Tl) ed hanno dimensioni 2" e 3". Si tratta quindi di cristalli cilindrici di spessore e diametro pari a 51 mm e 76 mm, rispettivamente. Ulteriori dettagli verranno dati nell'ultimo paragrafo della sez. 2.2.1.

Fotomoltiplicatore

Una volta che il passaggio di particelle cariche o di raggi γ è stato rivelato occorre convertire i fotoni emessi dallo scintillatore in una corrente per poter analizzare il segnale in ingresso. Uno degli strumenti più utilizzati per questa procedura è il fotomoltiplicatore, il quale converte un segnale luminoso in un impulso di corrente misurabile, senza aggiungere una quantità eccessiva di rumore e amplificando il segnale in ingresso.

Un fotomoltiplicatore è costituito da un tubo in cui è stato creato il vuoto che contiene due elementi: il *fotocatodo*, che converte i fotoni ricevuti in elettroni, e il *moltiplicatore di elettroni*, il quale moltiplica il numero di elettroni prodotti dal fotocatodo per amplificare il segnale. Il fattore di moltiplicazione è pressoché costante e le informazioni temporali del segnale luminoso sono ben conservate. La conversione del segnale di fotoni in un

segnale di elettroni è un processo che avviene nel fotocatodo: può essere suddiviso in tre passaggi:

1. trasferimento di energia dal fotone a un elettrone del fotocatodo;
2. transizione dell'elettrone fino alla superficie;
3. emissione dell'elettrone dalla superficie del fotocatodo.

L'energia di solito posseduta da un fotone prodotto da uno scintillatore è di circa 3 eV e si può considerare che tutta quanta passi all'elettrone; ma per quando l'elettrone è arrivato sulla superficie ne avrà persa in parte, a causa degli urti elettrone-elettrone. Inoltre, per lasciare il fotodiodo dovrà avere sufficiente energia per compiere il *lavoro di estrazione*. A causa di quanto appena detto, un fotocatodo avrà un *cut-off* per fotoni con lunghezze d'onda maggiori di un certo valore, poiché questi fotoni non forniscono sufficiente energia per compiere il lavoro di estrazione. In più bisogna fare in modo che gli elettroni vengano a formarsi a una distanza dalla superficie inferiore a un certo limite (detto *profondità di fuga*), altrimenti perderanno troppa energia negli urti. Nel caso in cui il fotocatodo sia formato da un semiconduttore piuttosto che da un metallo, il lavoro di estrazione è minore; di conseguenza la profondità di fuga aumenta, anche per la maggiore facilità dell'elettrone di spostarsi lungo la banda di conduzione.

Nel caso di un fotocatodo semiconduttore, affinché un fotone sia assorbito da un elettrone deve fornire a quest'ultimo un'energia maggiore dell'energia di gap. Una volta giunto a uno stato della banda di conduzione, attraverso l'emissione di fononi si disecciterà velocemente allo stato più basso di tale banda; questa energia nei semiconduttori è minore al lavoro di estrazione (la differenza fra i due livelli è l'*affinità elettronica*), quindi l'elettrone può lasciare il fotocatodo solo prima di emettere fononi. Un altro svantaggio dei semiconduttori è il maggior rumore termico rispetto ai metalli, ovvero elettroni eccitati tramite l'energia termica sufficientemente da lasciare il fotocatodo.

La moltiplicazione degli elettroni avviene attraverso *emissione secondaria*. L'emissione secondaria è il fenomeno fisico per cui delle particelle primarie incidenti con sufficiente energia, quando colpiscono una superficie o passano attraverso un qualche materiale, inducono l'emissione di particelle secondarie. Gli elettroni che lasciano il fotocatodo sono accelerati da una differenza di potenziale tra catodo e *dinodo*; l'energia cinetica nell'urto si trasmette ad altri elettroni che si libereranno dal dinodo stesso.

Gli elettroni emessi dal fotocatodo sono in generale pochi e poco energetici (circa 1 eV), quindi la maggior parte dell'energia viene loro fornita dall'accelerazione dovuta alla differenza di potenziale. Con un potenziale di 100 V si formano in media 30 elettroni da 2-3 eV per elettrone incidente, ma solo una piccola parte di questi riesce a scappare dal dinodo a causa della direzione e del lavoro di fuga.

Costruendo dinodi di materiali con *affinità elettronica negativa (NEA)*, allo stato più basso della banda di conduzione l'energia è superiore al lavoro di fuga: questi elettroni

(oltre a quelli negli stati eccitati della banda di conduzione) hanno energia sufficiente per essere emessi e possono farlo per un tempo molto più lungo dato che rimangono in questo stato per un periodo di 100 ps (mentre gli stati eccitati della banda di conduzione perdono energia molto più velocemente per emissione di fononi). Un esempio di *NEA* è il fosforo di gallio GaP drogato con un materiale di tipo P (ad esempio lo zinco), con un sottilissimo stato di un materiale elettropositivo (come il cesio). Questi materiali, oltre ad aumentare il guadagno di elettroni per dinodo, consentono anche una minore dispersione temporale del segnale dato che la quasi totalità degli elettroni emessi avrà la stessa energia - il minimo della banda di conduzione.

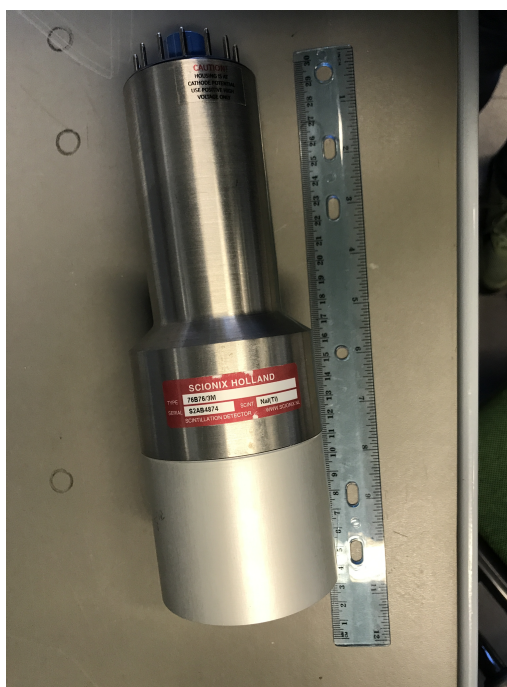
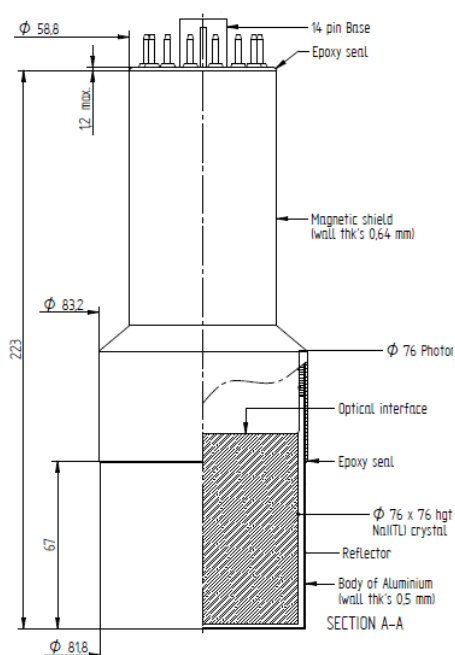


Figura 2.3: Schema e fotografia del rivelatore da 3 pollici (76 mm) della *SCIONIX Holland*, codice *76B76/3M*. Schema estratto dal sito SCIONIX.

Ogni fotomoltiplicatore è formato da più di uno stadio tra fotocatodo e anodo, cioè con una serie di dinodi posti a potenziali crescenti, per aumentare il guadagno totale. Siccome gli elettroni creati dall'emissione secondaria sono poco energetici come i fotoelettroni, il comportamento tra un dinodo e il successivo equivale a quello tra fotocatodo e il primo dinodo. Il guadagno totale con N stadi equivale a

$$\text{guadagno} = \alpha \delta^N \quad (2.1)$$

dove α è la frazione dei fotoelettroni convogliati dalla struttura (solitamente approssi-

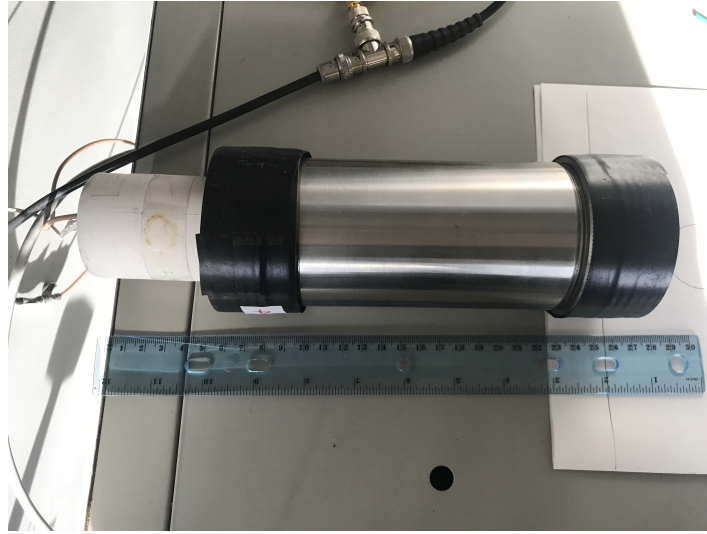


Figura 2.4: Immagine del rivelatore da 2 pollici (51 mm di diametro e di lunghezza del cristalli scintillatore) che è stato caratterizzato in questa tesi.

mabile con 1) e δ è il guadagno per singolo stadio

$$\delta = \frac{\text{elettroni secondari}}{\text{elettroni incidenti}} \quad (2.2)$$

che vale circa 5 per i dinodi normali e circa 55 per quelli costituiti da *NEA*. Per ottenere un guadagno di 1×10^7 occorrono dunque 10 e 4 stadi, rispettivamente.

I due scintillatori da 76 mm sono prodotti dalla *SCIONIX Holland*, codice *76B76/3M* e sono contenuti dentro un involucro di alluminio insieme al loro fotomoltiplicatore, come si osserva in Fig. 2.3. I tre cristalli da 51 mm riportati in Fig. 2.4 sono invece stati presi da un esperimento precedente; la giunzione con il fotomoltiplicatore è stata fatta interponendo del grasso ottico.

2.2.2 Power Element (PE): il survoltore

Un survoltore di tensione è un dispositivo funzionante in corrente continua che permette di passare da una bassa tensione ad una tensione più alta e regolabile. Per fare ciò, si converte la corrente continua in alternata amplificando le oscillazioni e poi filtrando una particolare frequenza; attraverso un trasformatore si aumenta la tensione e poi, attraverso un ponte di diodi, si ritorna a corrente continua.

Nel caso dei survoltori impiegati nel progetto *Gamma-Flash* la tensione in ingresso è di 24 V e attraverso un survoltore positivo si ottiene una tensione di uscita di diverse centinaia/migliaia di volt. Una tensione di circa 1000 V è quella necessaria per il fun-

zionamento del fotomoltiplicatore. Infatti, maggiore è la differenza di potenziale tra i dinodi, maggiore sarà il guadagno.

I survoltori usati sono *MSS2000* positivi della *EMI-GENCOM inc* (si veda Fig. 2.5). Questi dispositivi possono essere alimentati con una tensione in ingresso variabile da 24 a 30 V assorbendo una corrente massima di 350 mA. Possono fornire in uscita fino a 2000 V. Il monitoraggio della tensione in uscita può essere effettuato attraverso un pin di controllo (pin 11) attraverso il quale è possibile misurare una tensione per la quale ogni volt misurato corrisponde a 1 kV. Attraverso un trimmer aggiustabile con un cacciavite è possibile regolare la tensione di uscita. Nel nostro caso la tensione in uscita è di 1.12 kV.



Figura 2.5: Immagine del survoltore *MSS2000* della *EMI-GENCOM inc* utilizzato per questa tesi.

2.2.3 DAM Redpitaya: Scheda di acquisizione

I dati prodotti dal rivelatore vengono raccolti da una scheda *STEMlab 125-14*, prodotta da *Red Pitaya*, attraverso un connettore RF a 125 Msps a 14 bit. La tensione massima in ingresso è di 1 V e l'impedenza di 1 M Ω . I 14 bit sono distribuiti sull'intervallo da -1 V a 1 V: i valori interi da 0 a 8191 descrivono la tensione da 0 a 1 V ($0\text{V} \rightarrow 0$ in bit e $1\text{V} \rightarrow 8191$ in bit) e da 8193 a 16384 descrivono la tensione da -1 a $\lesseqgtr 0$ V ($-1\text{V} \rightarrow 8193$ in bit e $0\text{V} \rightarrow 16384$ in bit). Il valore 8192 in bit corrisponde al valore di saturazione per -1 e 1 V. In Fig. 2.6 è possibile vedere la scheda utilizzata.

2.2.4 Ricevitore GPS

Una antenna e un ricevitore GPS vengono utilizzati per fornire un *flag* temporale molto accurato ad ogni evento misurato da ciascun rivelatore. In questo modo è possibile as-

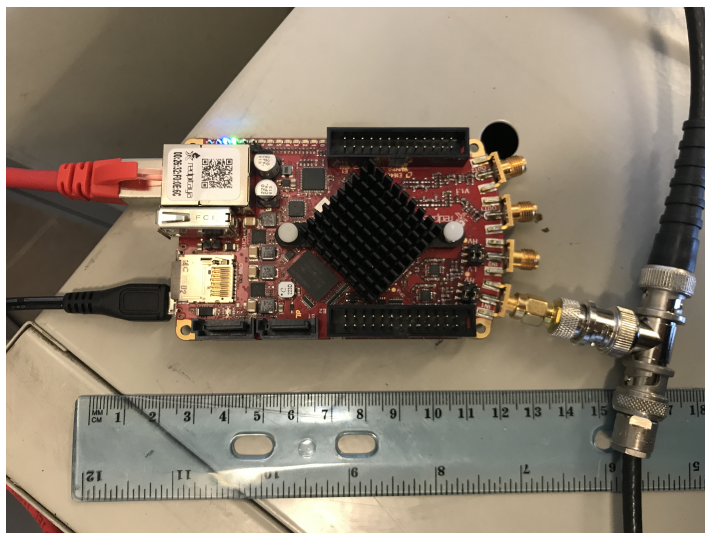


Figura 2.6: Immagine della scheda *STEMlab 125-14* della *Red Pitaya* utilizzata per questa tesi.

sociare il tempo di rivelazione della radiazione ed è quindi possibile generare delle curve di luce. Tale componente ha da specifiche tecniche un range operativo da -10 a 70 °C pertanto non si ritiene che la catena di acquisizione possa essere influenzata da variazioni di funzionamento di questo dispositivo.

2.2.5 Weather station e switch di rete

Nella cupola è anche installata una *weather station*, cioè un termometro/igrometro ad alto rate di misura regolabile e accessibile da remoto. Per sua natura tale componente permette di misurare condizioni di temperatura e umidità molto variabili (-10 - 80 °C) pertanto non si ritiene sia un componente critico durante la variazione delle condizioni ambientali. Uno switch di rete *POE* (*Power Over Ethernet*) anch'esso installato nella cupola permette una continua connessione con uno switch ethernet presente all'interno del rifugio che serve per la connessione remota verso i laboratori di Bologna dove i dati vengono acquisiti e salvati. Anche questo componente non risulta critico per il corretto funzionamento a temperatura variabile del sistema.

Capitolo 3

Caratterizzazione termica dei componenti

L'apparato sperimentale installato all'osservatorio *O. Vittori* di M.te Cimone opera da molti mesi e quindi a diverse condizioni meteorologiche e a diverse temperature. Le escursioni termiche a cui sono soggette le componenti del setup sperimentale possono modificare le condizioni di misura e performance degli strumenti. Lo scopo di questa tesi è quello di valutare come le variazioni di temperatura possano influire sulle prestazioni della strumentazione e di valutare quale componente sia il più critico per la stabilità della risposta dell'intero sistema. Per fare ciò ci si è avvalsi di una camera climatica presente ad *INAF OAS* di Bologna ed abbiamo simulato escursioni termiche di diverse decine di gradi per analizzare quale dei componenti fosse più sensibile a queste variazioni. A partire da dati di temperatura acquisiti nello scorso anni di preparazione del progetto, il team di *Gamma-Flash* ha valutato che l'escursione termica a cui sono soggetti i componenti è nell'intervallo di temperatura da -10°C a 30°C . Come già anticipato nel Capitolo precedente, i componenti dell'esperimento sono i seguenti:

- rivelatore: cristallo scintillatore e fotomoltiplicatore;
- survoltore;
- modulo scheda di acquisizione (DAM);
- *weather station*;
- switch di rete;
- ricevitore GPS.

Osserviamo che soltanto i primi tre, se soggetti a evoluzioni termiche, possono fornire una risposta variabile in termini di variazione dell'energia misurata dei fotoni e di efficienza di rivelazione. Secondo le caratteristiche date da *Red Pitaya*, la scheda *STEMlab*

125-14 funziona normalmente fino a temperature di $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [14]. Con queste premesse e considerando che non sono riportati limiti inferiori di temperatura per un corretto funzionamento, si è deciso di non testare la scheda *STEMlab 125-14* e di supporre che il maggior contributo provenisse dall'effetto che la temperatura ha sui primi due componenti.

Ulteriori componenti del setup certamente non hanno effetti sull'acquisizione o perché si tratta di oggetti di mero monitoraggio, o perché non sono situati nella cupola ma sono posti nel rifugio in cui l'escursione termica è evidentemente molto più limitata:

- computer;
- hard disk di storage dei dati;
- oscilloscopio.

Secondo quanto detto in precedenza l'attività di tesi si è concentrata sulla caratterizzazione in temperatura del rivelatore come corpo unico e del survoltore. Occorre precisare che i risultati riportati fanno riferimento ai test termici effettuati separatamente sui due componenti mentre non è stato effettuato un test finale con tutti i componenti sollecitati termicamente simultaneamente per simulare completamente le condizioni climatiche di M.te Cimone ed è sicuramente un test da effettuare in una successiva implementazione.

3.1 Setup sperimentale

La camera climatica utilizzata per tutte le misurazioni è la *CHALLENGE CH250* della *Angelantoni Industrie S.p.A.* Il suo campo di temperatura in celsius è da -40 a 180 , con una precisione in celsius di $0.25-0.3$. I gradienti massimi applicabili sono $+3.9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Il suo funzionamento è stato controllato attraverso il sistema di controllo *WINKRATOS™ 4.00*, il programma creato da *Angelantoni Industrie S.p.A.* per gestire la camera climatica da computer. Il collegamento è stato fatto attraverso cavo seriale e per ogni acquisizione è stato anche salvato l'andamento della temperatura, per verificare che essa fosse costante durante tutto l'intervallo di acquisizione.

Si è scelto di posizionare nella camera climatica una componente dell'apparato per volta (cristallo scintillatore e fotomoltiplicatore, survoltore) e di acquisire le forme d'onda dei segnali rilevati a temperature da $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a intervalli di $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sono state impiegate radiosorgenti di righe mono-energetiche di ^{137}Cs e il ^{22}Na per calibrazione. Infatti questi due radionuclidi hanno rispettivamente dei picchi di emissione a 661.7 keV (si veda Fig. 3.1), a 511 keV e a 1.27 MeV (si veda Fig. 3.2). Tali valori di energie benché non coprendo l'intero intervallo di energia per il progetto ($400\text{ keV} - 6\text{ MeV}$) rappresentano un intervallo sufficientemente ampio per effettuare una calibrazione soddisfacente.

Per la raccolta dei dati è stato usato lo stesso sistema di acquisizione *Red Pitaya* dell'Osservatorio al Cimone. La scheda è in parallelo a un oscilloscopio digitale e ad

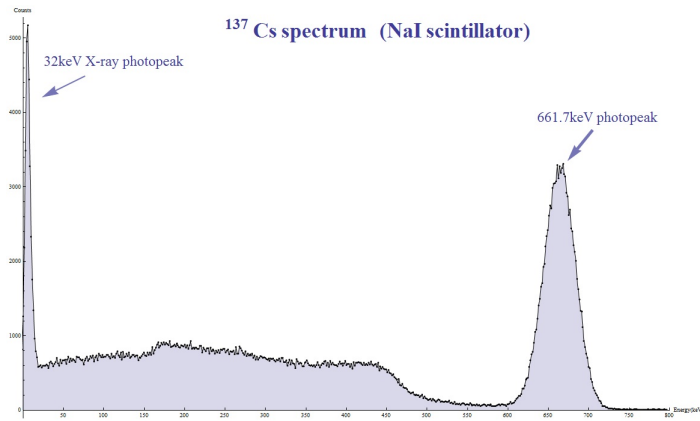


Figura 3.1: Spettro di radiazione tipico del ¹³⁷Cs (da letteratura).

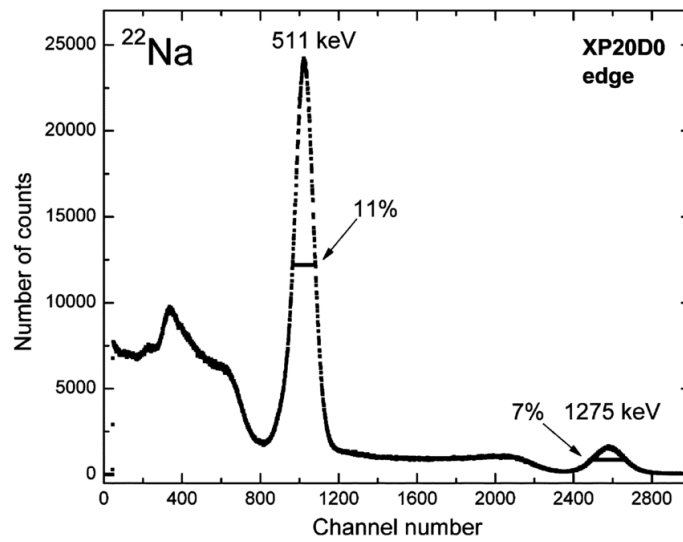


Figura 3.2: Spettro di radiazione tipico del ²²Na (da letteratura).

una impedenza di carico di $50\ \Omega$. Attraverso un programma scritto in *Python* si salvano 1000 acquisizioni per file (estensione *.h5*). Il segnale in input alla scheda è negativo, ma il programma *Python* lo converte in positivo prima di salvarlo in formato *hdf5*. Per le specifiche della scheda, ogni acquisizione è formata da 16 384 campionamenti; ogni campionamento avviene a intervalli di 8 ns. La durata di ogni acquisizione è dunque di 131.072 μ s. Dopo ogni acquisizione la scheda ha un *delay* di 3 ms. Ogni acquisizione inizia con il primo segnale inferiore alla soglia di trigger impostata a $-36.99\ \text{mV}$ (ovvero al valore in bit di 16 081) successivo al tempo di *delay*. L'acquisizione dati dura il tempo necessario per salvare 49 000 forme d'onda e su questo periodo vengono eseguiti gli spettri integrati.

Per analizzare le forme d'onda si è usato un programma scritto appositamente in *LabVIEW21*. Ogni acquisizione della scheda *Red Pitaya* che viene letta è usata per fare due spettri degli eventi: uno considerando solo il valore del picco massimo, l'altro integrando la forma d'onda sul tempo. Affinché il programma consideri un segnale come picco esso deve avere tensione maggiore di 20 mV (valore di trigger dell'analisi, minore in modulo dal valore di trigger dell'acquisizione); l'integrale viene calcolato finché il segnale è maggiore del valore di trigger. Inoltre viene anche eseguito il fit con due esponenziali e calcolati gli spettri di massimo e integrale anche di quest'ultimi. Si verifica poi che la corrispondenza tra valore integrale e di massimo di ogni singola acquisizione sia lineare (per approfondire si veda App. A). Gli spettri graficati non sono in funzione dell'energia, bensì della tensione (spettro dei massimi) e della carica (spettro dei valori integrali).

L'*hdf5* fornisce un valore intero che deve essere convertito in tensione. Avendo 13 bit per il segnale (uno è per il segno) la conversione in mV è

$$\frac{1\text{V}}{2^{13} - 1} \simeq 0.122\text{mV} \quad (3.1)$$

dato che i 13 bit sono usati per descrivere un intervallo di tensione di 1 V. Quando occorre fare lo spettro integrale bisogna integrare la tensione sull'intervallo temporale del segnale. Siccome il binnaggio temporale è di 8 ns e l'impedenza di carico è di $50\ \Omega$ risulta che la grandezza di integrazione è

$$\frac{1\text{mV}}{50\ \Omega} 8\text{ns} = 0.16\text{fC} \quad (3.2)$$

Da *LabVIEW* vengono raccolti i dati per poi essere utilizzati da diverse macro di *ROOT* realizzate appositamente per questa tesi (al contrario dei programmi in *Python* e *LabVIEW*, creati per il progetto *Gamma-Flash*).

3.2 Test in temperatura del cristallo scintillatore e del fotomoltiplicatore

3.2.1 Acquisizione

Le misure in temperatura sono state eseguite su un detector da 2 pollici, 51 mm di diametro e di spessore. Posto il cristallo e il fotomoltiplicatore da 2 pollici dentro la camera climatica (si veda Fig. 3.3) sono state prese 49 000 acquisizioni per sorgente per ogni temperatura. In Tab. 3.1 sono riportati i valori di temperatura impiegati nelle misure, il tempo di mantenimento prima di effettuare la misura e il gradiente per giungerci. La procedura per effettuare una misura a una data temperatura è la seguente:

1. la prima misura è stata acquisita alla temperatura ambiente di 20°C . Successivamente la temperatura è stata innalzata a 25°C e sono state fatte le acquisizioni utilizzando le due sorgenti di Cesio-137 e Sodio-22;
2. durante la notte si è portata la temperatura a 30°C - sfruttando il tempo a disposizione per allungare il tempo di salita e di mantenimento della temperatura - per poi scendere fino a 15°C . Per giungere a 10°C si è preferito un gradiente più piccolo, dato che si giunge a temperature basse e si vuole evitare uno shock termico;
3. durante la notte la temperatura è scesa a 5°C . Durante la giornata si sono prese le misure a $5, 0, -5$ e -10°C , per cesio e sodio. Poi durante la notte il rivelatore è stato riportato a temperatura ambiente.



Figura 3.3: Setup dell'esperimento ponendo il rivelatore dentro la camera climatica (sinistra) mentre il servoltore e la scheda rimangono a temperatura ambiente (destra).

Quando la temperatura interna differisce particolarmente da quella esterna, tra una presa dati e l'altra, dopo aver aperto la camera per sostituire la sorgente, si sono aspettati 10 min per evitare fluttuazioni eccessive di temperatura.

Tabella 3.1: Tempo aspettato e gradiente di temperatura programmato prima dell'acquisizione per le varie temperature nel test in temperatura del rivelatore mentre il survoltore e la scheda rimangono a temperatura ambiente.

Temperatura	Mantenimento	Gradiente
-10°C	30min	0.04°C/min
-5°C	30min	0.04°C/min
0°C	30min	0.03°C/min
5°C	>5h	0.02°C/min
10°C	30min	0.17°C/min
15°C	30min	0.25°C/min
20°C	>5h	
25°C	30min	0.25°C/min
30°C	>5h	0.04°C/min

3.2.2 Presentazione dei risultati

Ciascuna misura produce un numero di forme d'onda che rappresentano il segnale elettrico prodotto dal passaggio di un fotone. L'aspetto di ciascuna forma d'onda è quello di una crescita esponenziale e di una discesa più lenta, come si vede in Fig. 3.4 nella quale sono visibili 5 forme d'onda, (4 più intense e una di minore ampiezza) la cui forma è quella descritta. In funzione dell'attività della sorgente più o meno intensa, il numero di forme d'onda presenti in ogni finestra di acquisizione è altamente variabile. Ad esempio, misurando il fondo ambientale, sempre presente in ogni acquisizione, il rate di conteggi è dell'ordine di 100 Hz (1 conteggio rivelato al secondo) mentre se viene impiegata una sorgente di Cesio-137 il rate risulta sensibilmente più alto così come se è presente una sorgente di Sodio-22. Un effetto frequente è quello del *pile-up* cioè la sovrapposizione di più picchi che vengono individuati in modo ravvicinato.

La singola forma d'onda contiene l'informazione sul fotone che l'ha prodotta. L'integrale o l'ampiezza massima di tale forma d'onda è direttamente correlato all'energia della radiazione incidente. Attraverso un codice scritto in *LabVIEW* è stato possibile leggere ogni singola forma d'onda e ottenere quindi uno spettro integrato nel tempo. Abbiamo prodotto lo spettro integrato sul tempo necessario a ottenere 49 000 acquisizioni utilizzando sia il massimo di ogni forma d'onda sia utilizzando l'integrale. In aggiunta, ciascuna forma d'onda è stata trattata eseguendo un fit sui punti attraverso una funzione del tipo:

$$f(x) = B_1 e^{-t/\tau_1} - B_2 e^{-t/\tau_2} \quad (3.3)$$

Il best fit è stato utilizzato di nuovo per la stima del massimo e dell'integrale, ottenendo quindi 4 spettri, due ottenuti direttamente dai punti e due dalla funzione di best fit. In tutti e quattro gli spettri si osserva l'andamento tipico del picco di fluorescenza delle

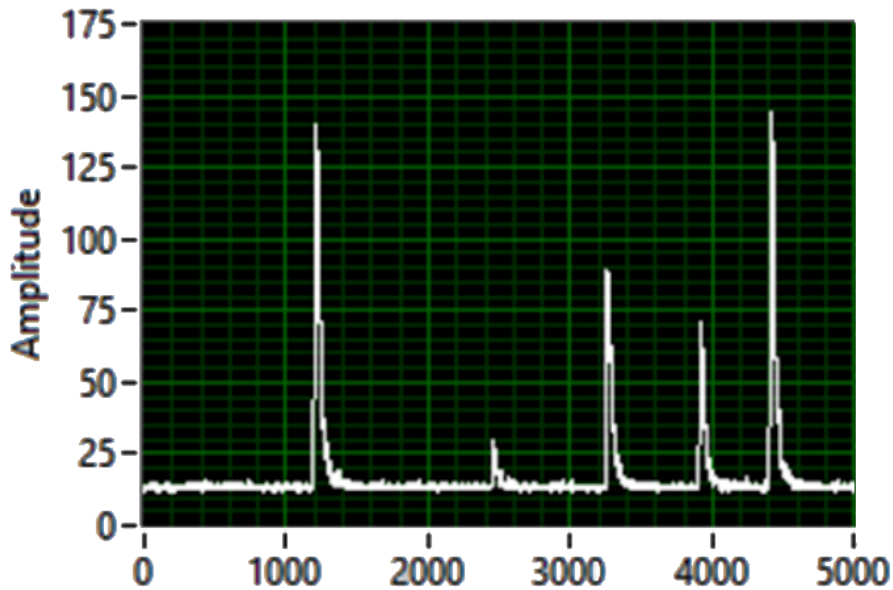


Figura 3.4: Ingrandimento su alcuni picchi di una forma d'onda acquisita: tensione in funzione del tempo. Immagine presa dal programma *LabVIEW*.

righe monocromatiche assorbite dal detector e in aggiunta una evidente spalla Compton prodotta dal non completo assorbimento dei fotoni nel cristallo. La spalla Compton viene meglio evidenziata nei grafici in cui viene utilizzata la funzione di fit. Si nota anche un picco a bassa tensione o carica più o meno marcato in tutti i grafici, il cui rate di conteggi cresce al diminuire della temperatura.

Con la sorgente di Cesio-137 viene evidenziato il picco all'energia di 661 keV. Negli spettri ottenuti attraverso l'utilizzo del valore del massimo di ciascuna forma d'onda le differenze fra la posizione del picco a 661 keV del cesio al variare della temperatura è abbastanza limitata ma è ben visibile (si vedano le Fig. 3.5 e Fig. 3.6 rispettivamente usando il picco di ogni waveform e il picco della funzione di best fit di ogni waveform). L'ampiezza del picco di fluorescenza è anch'essa variabile ma tale variazione non è in correlazione con la variazione della temperatura. È invece più chiara la dipendenza dalla temperatura della spalla Compton per la quale si osserva un valore di conteggi più alto a basse temperature e una diminuzione dei conteggi nel passaggio a temperature più alte (questa caratteristica è più evidente nello spettro ottenuto dai massimi delle forme d'onda fittate).

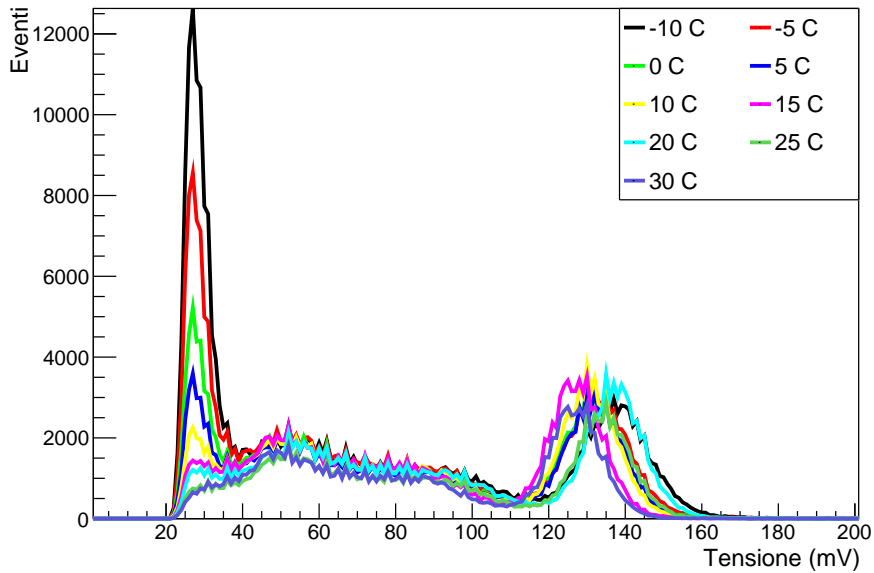


Figura 3.5: Spettro del ^{137}Cs integrato ottenuto a partire dai massimi delle forme d'onda al variare della temperatura del rivelatore.

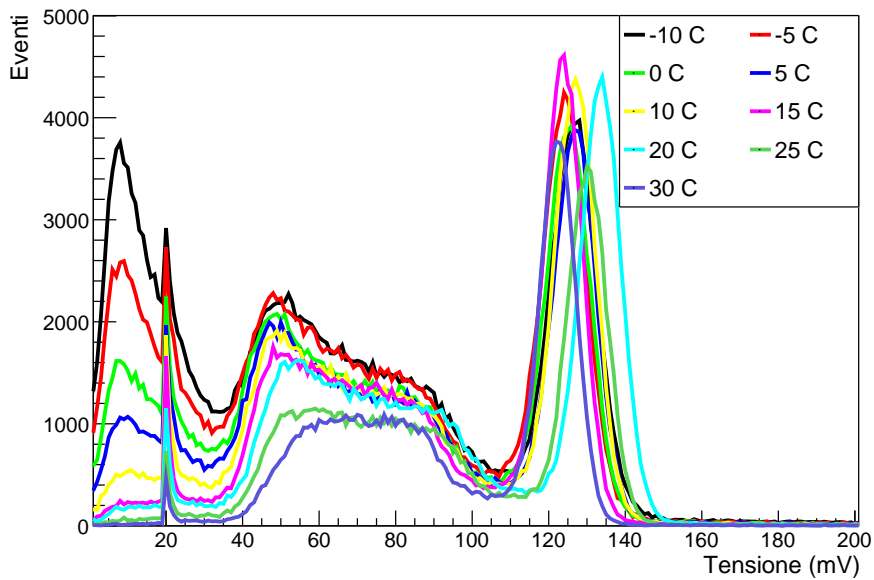


Figura 3.6: Spettro del ^{137}Cs integrato ottenuto a partire dai massimi delle forme d'onda fittate con la funzione riportata in Eq. 3.3 al variare della temperatura del rivelatore.

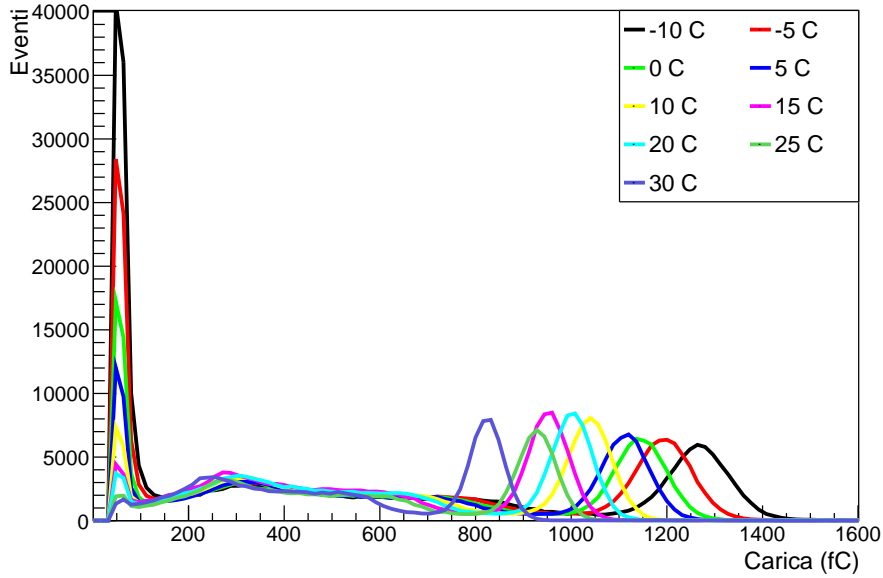


Figura 3.7: Spettro del ^{137}Cs integrato ottenuto a partire dai valori integrali delle forme d'onda al variare della temperatura del rivelatore.

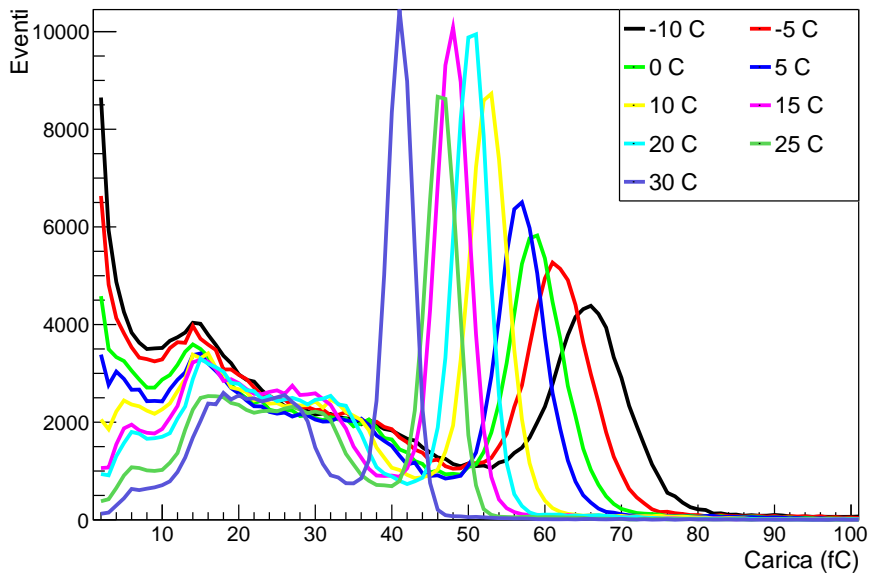


Figura 3.8: Spettro del ^{137}Cs integrato ottenuto a partire dai valori integrali delle forme d'onda fittate con la funzione riportata in Eq. 3.3 al variare della temperatura del rivelatore.

Negli spettri ottenuti dall'integrale delle waveform è molto più evidente la differenza fra gli spettri ottenuti a diverse temperature. Tale differenza si osserva sia nell'utilizzo dell'integrale della waveform, sia nell'integrale della funzione di best fit di ciascuna waveform (si vedano Fig. 3.7 e Fig. 3.8). All'aumentare della temperatura il valore del picco del Cesio-137 trasla a valori nettamente più bassi rispetto allo stesso picco misurato a più alte temperature. Si osserva, in particolare nello spettro ottenuto dall'integrale delle waveforms, che alle più alte temperature l'efficienza di rivelazione del fotopicco risulta più alta rispetto alle basse temperature.

In analogia a quanto descritto in precedenza è stato eseguito lo stesso processo di integrazione e di fit delle waveform anche utilizzando una sorgente di Sodio-22 che, come detto in precedenza presenta due righe di emissione monocromatiche a 511 keV e a 1274 keV. Dato che l'attività della sorgente è nettamente più bassa rispetto a quella del cesio, per ogni finestra di acquisizione si registra solitamente una sola forma d'onda provocata da un fotone rivelato. Questo riduce drasticamente anche il numero di eventi in *pile-up*. Similmente a quanto visto con l'utilizzo della sorgente di cesio, negli spettri ottenuti dal massimo dei picchi delle waveform si osserva una correlazione fra la temperatura e lo spostamento dei picchi di fluorescenza (si vedano Fig. 3.9 e Fig. 3.10 rispettivamente per gli spettri ottenuti dal massimo delle waveform e dal massimo della funzione di best fit). Si noti che i due picchi fotoelettrici corrispondenti alle due righe monocromatiche si trovano in corrispondenza a 100 e 210 mV rispettivamente per le energie 511 keV e 1274 keV. Osserviamo che l'ampiezza del segnale è invece molto meno dipendente dalla variazioni termiche.

Negli spettri integrali (si vedano Fig. 3.11 e Fig. 3.12) si nota una più netta variazione della posizione dei picchi di fluorescenza in funzione della temperatura. Si osserva anche una maggiore raccolta di carica a temperature minori, oltre a una maggiore larghezza del picco fotoelettrico, indice che la risoluzione energetica è migliore con l'aumento della temperatura. Si osserva anche che il picco a 511 keV è molto più intenso rispetto a quello a 1274 keV poiché il fotone a più alte energie ha una probabilità di sfuggire dal rivelatore molto più alta rispetto a quella di fuga del fotone da 511 keV, prodotto dall'annichilazione del positrone, prodotto dal decadimento β^+ del Na-22 in Ne-22.

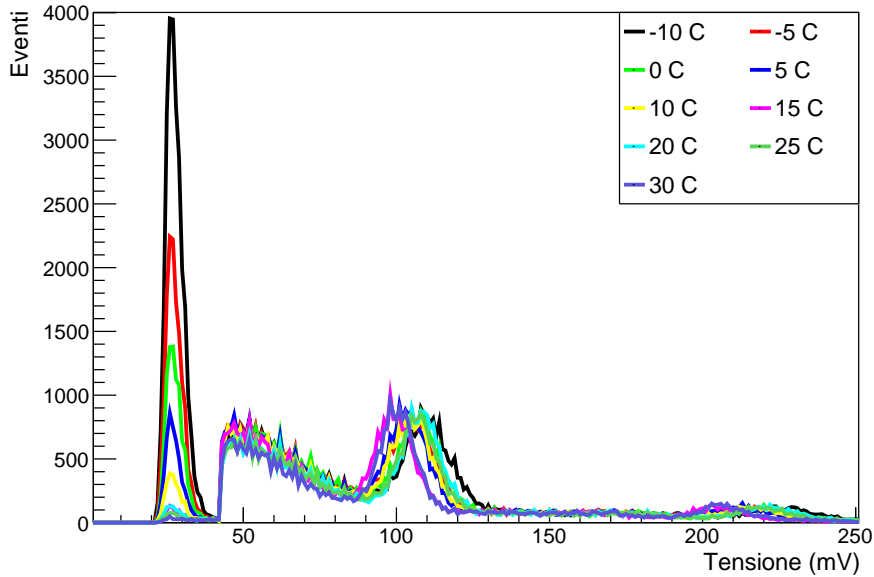


Figura 3.9: Spettro del ^{22}Na integrato ottenuto a partire dai massimi delle forme d'onda al variare della temperatura del rivelatore.

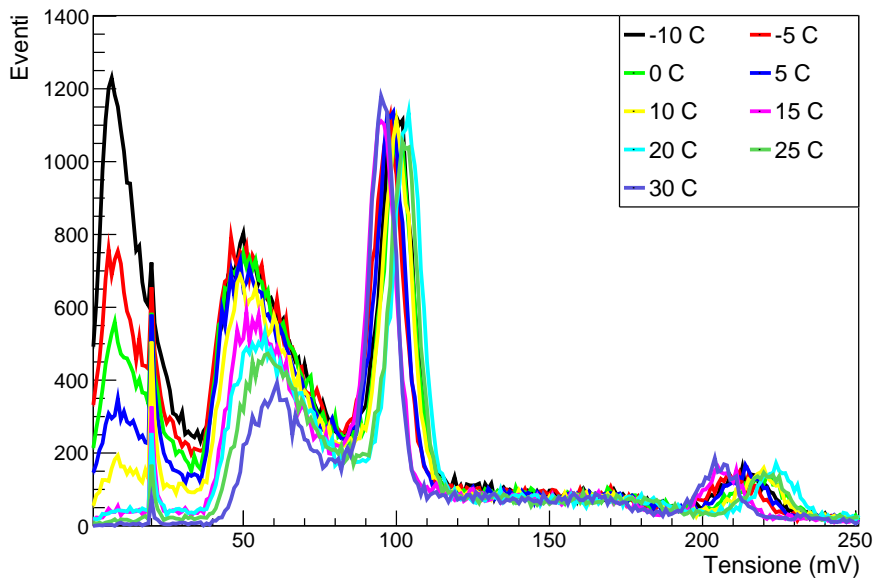


Figura 3.10: Spettro del ^{22}Na integrato ottenuto a partire dai massimi delle forme d'onda fittate con la funzione riportata in Eq. 3.3 al variare della temperatura del rivelatore.

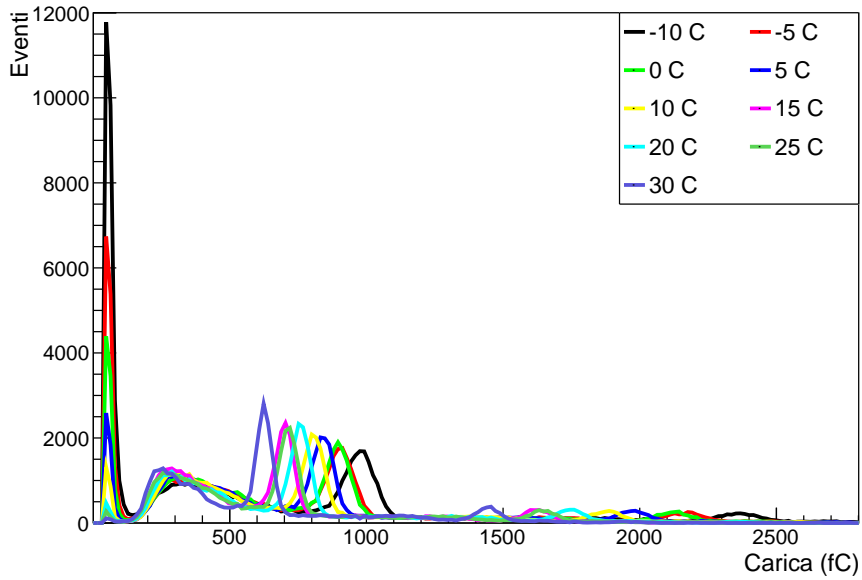


Figura 3.11: Spettro del ^{22}Na integrato ottenuto a partire dai valori integrali delle forme d'onda al variare della temperatura del rivelatore.

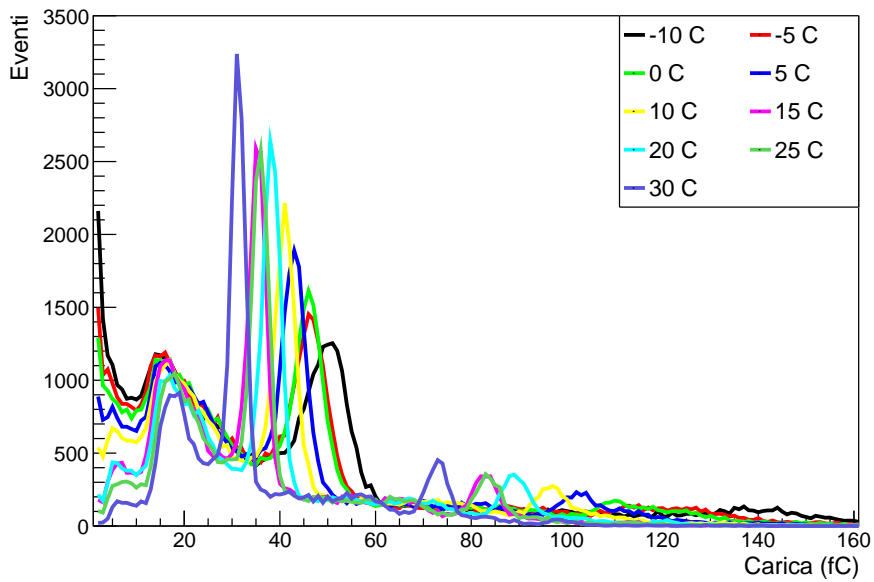


Figura 3.12: Spettro del ^{22}Na integrato ottenuto a partire dai valori integrali delle forme d'onda fittate con la funzione riportata in Eq. 3.3 al variare della temperatura del rivelatore.

3.3 Test in temperatura del survoltore

3.3.1 Acquisizione

Come per il rivelatore, si è posto il survoltore in camera climatica, mentre il resto dei componenti (rivelatore e scheda di acquisizione) vengono mantenuto all'esterno, come mostrato in Fig. 3.13. È stata presa una raccolta dati per ogni sorgente, ^{137}Cs e ^{22}Na , a ogni temperatura e in Tab. 3.2 sono riportati i tempi di mantenimento prima delle acquisizioni e i gradienti tra le temperature per ogni temperatura di acquisizione.

Siccome il survoltore (a differenza dallo scintillatore) non rischia di danneggiarsi a causa di repentine variazioni di temperatura si è potuto impostare un gradiente di temperatura più alto. Inoltre, data la sua struttura meno massiva e un maggiore scambio di calore con l'esterno rispetto al rivelatore, il tempo di mantenimento a temperatura prima dell'acquisizione è stato generalmente ridotto. La procedura adottata è analoga a quella descritta in precedenza e utilizzata per il test in temperatura del rivelatore. Si è partiti da temperatura ambiente (25°C), si è arrivati a 30°C per poi acquisire a 20°C . A questo punto la temperatura è stata successivamente ridotta effettuando misure rispettivamente alle temperature di 15 , 10 , 5 , 0 , -5 e -10°C . A fine acquisizione si è riportato il survoltore a temperatura ambiente.

Tabella 3.2: Tempo aspettato e gradiente di temperatura programmato prima dell'acquisizione per le varie temperature nel test del survoltore mentre il rivelatore e la scheda rimangono a temperatura ambiente.

Temperatura	Mantenimento	Gradiente
-10°C	20min	$1^\circ\text{C}/\text{min}$
-5°C	20min	$1^\circ\text{C}/\text{min}$
0°C	20min	$1^\circ\text{C}/\text{min}$
5°C	20min	$1^\circ\text{C}/\text{min}$
10°C	20min	$1^\circ\text{C}/\text{min}$
15°C	20min	$1^\circ\text{C}/\text{min}$
20°C	20min	$1^\circ\text{C}/\text{min}$
25°C	30min	Punto di partenza
30°C	20min	$1^\circ\text{C}/\text{min}$

I risultati, in analogia a quanto riportato per le misure effettuate sul rivelatore, sono riportati in Fig. 3.14, Fig. 3.15, Fig. 3.16 e Fig. 3.17 per quanto riguarda le acquisizioni con il Cs-137 e in Fig. 3.18, Fig. 3.19, Fig. 3.20 e Fig. 3.21 per le acquisizioni con il Na-22.



Figura 3.13: Setup dell'esperienza ponendo il survolatore dentro la camera climatica (sinistra) mentre il rivelatore e la scheda rimangono a temperatura ambiente (destra).

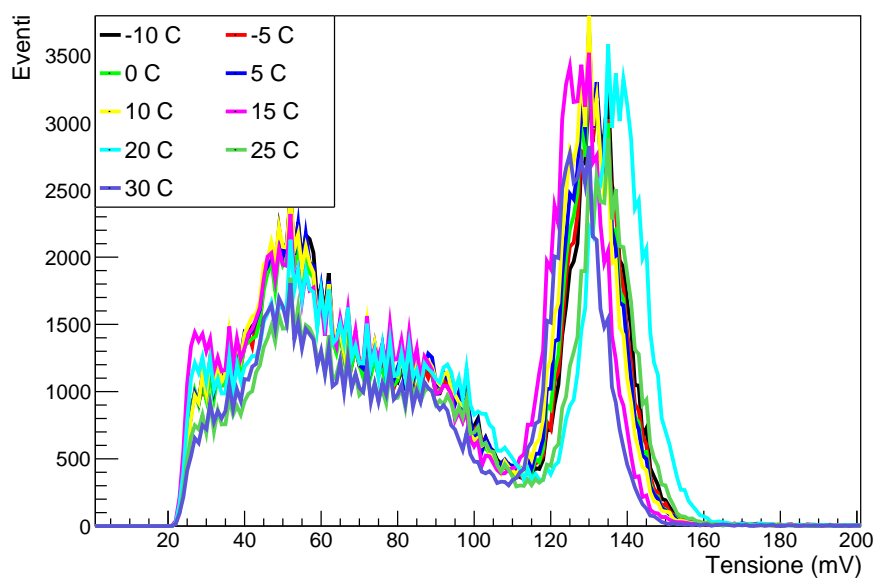


Figura 3.14: Spettro del ^{137}Cs integrale ottenuto a partire dai massimi delle forme d'onda al variare della temperatura del survolatore.

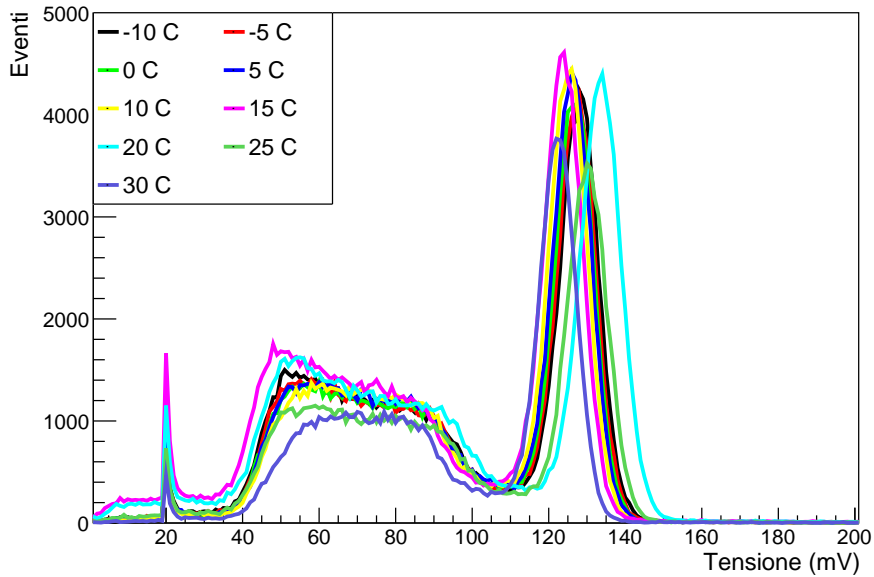


Figura 3.15: Spettro del ^{137}Cs integrale ottenuto a partire dai massimi delle forme d'onda fittate con la funzione riportata in Eq. 3.3 al variare della temperatura del survolto.

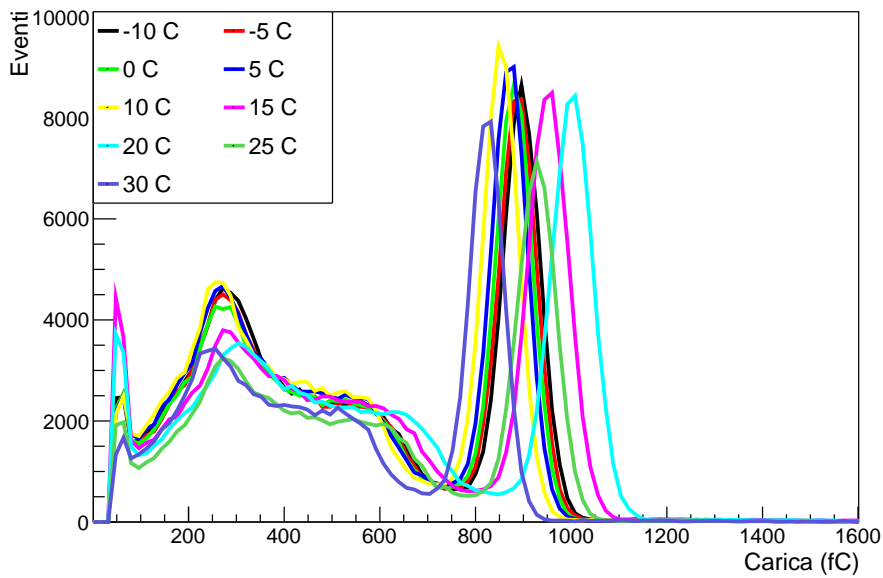


Figura 3.16: Spettro del ^{137}Cs integrale ottenuto a partire dai valori integrali delle forme d'onda al variare della temperatura del survolto.

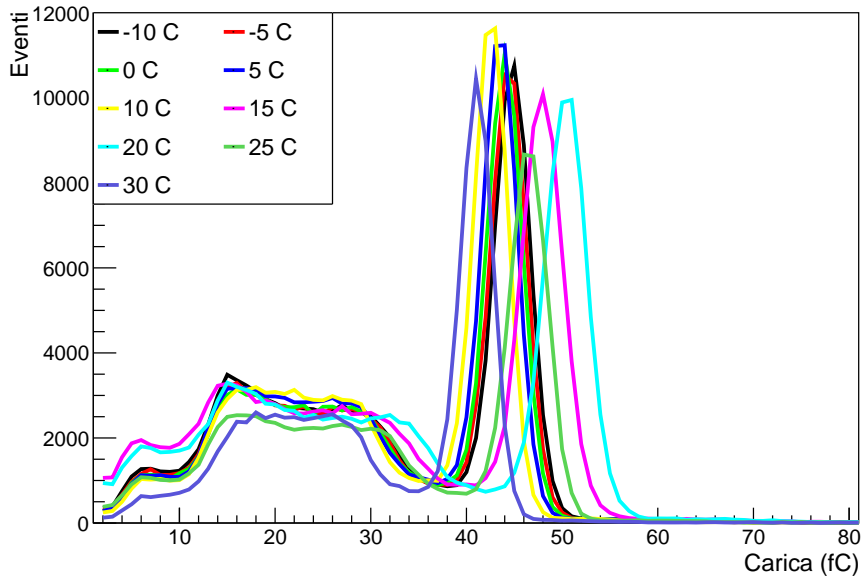


Figura 3.17: Spettro del ^{137}Cs integrale ottenuto a partire dai valori integrali delle forme d'onda fittate con la funzione riportata in Eq. 3.3 al variare della temperatura del survolto.

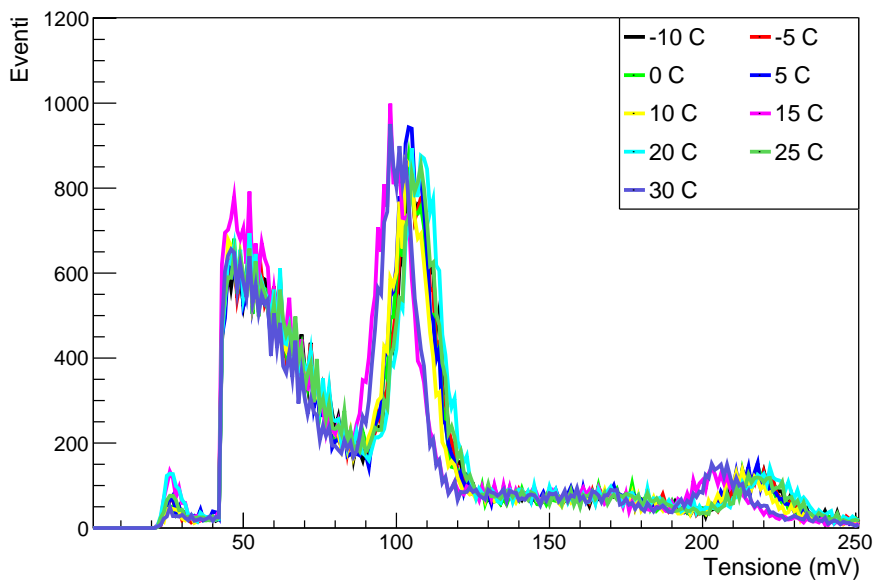


Figura 3.18: Spettro del ^{22}Na integrale ottenuto a partire dai massimi delle forme d'onda al variare della temperatura del survolto.

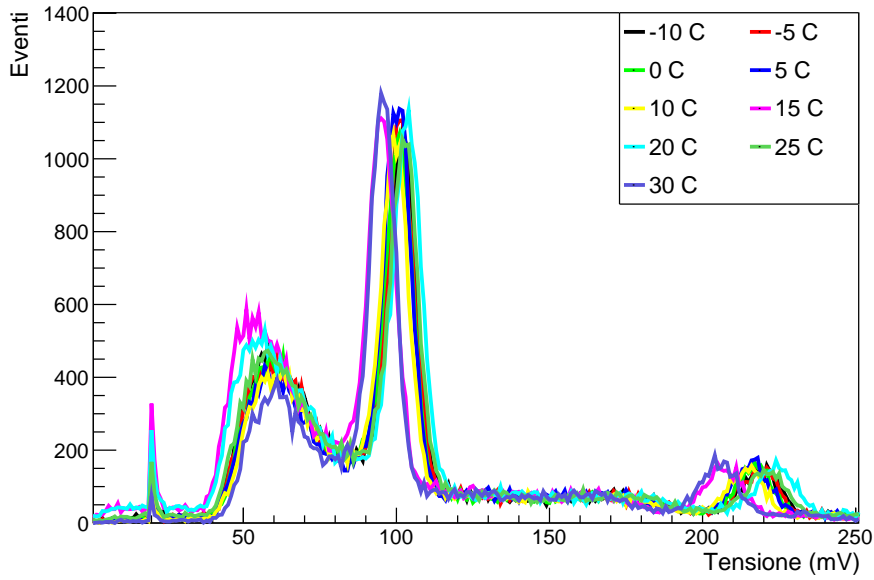


Figura 3.19: Spettro di ^{22}Na integrale ottenuto a partire dai massimi delle forme d'onda fittate con la funzione riportata in Eq. 3.3 al variare della temperatura del survoltore.

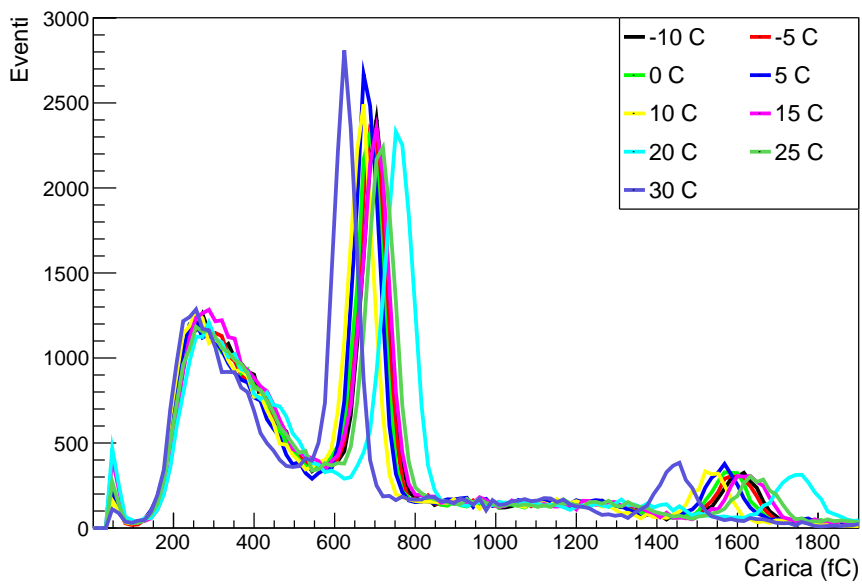


Figura 3.20: Spettro del ^{22}Na integrale ottenuto a partire dai valori integrali delle forme d'onda al variare della temperatura del survoltore.

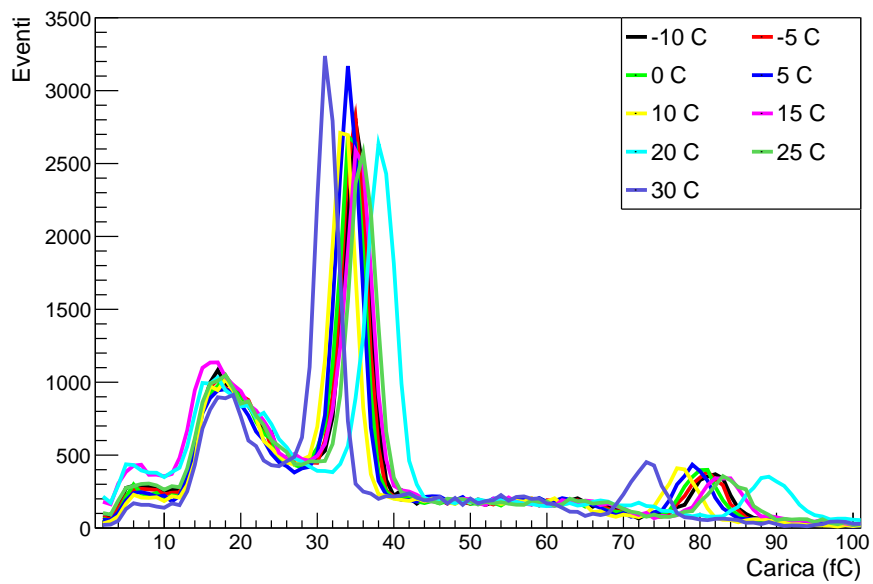


Figura 3.21: Spettro del ^{22}Na integrale ottenuto a partire dai valori integrali delle forme d'onda fittate con la funzione riportata in Eq. 3.3 al variare della temperatura del survolto.

Capitolo 4

Discussione dei risultati

Per quantificare l'andamento delle due componenti alle varie temperature si sono fatti degli ingrandimenti dei dati attorno ai picchi dovuti alle sorgenti. Si sono analizzati solo i grafici relativi alle forme d'onda originali (cioè quelle non fittate) integrate: ogni temperatura è stata fittata con una gaussiana attorno al proprio picco per trovare media e deviazione standard. Il fit Gaussiano sulle righe di fluorescenza è una semplificazione dato che in aggiunta alla riga è sempre presente un continuo relativo sia al fondo, sia alla componente Compton. Tuttavia questa seconda componente, che è dominante rispetto al fondo naturale, è asimmetrica rispetto alla riga di fluorescenza pertanto non è descrivibile con una componente costante in aggiunta alla Gaussiana. Si è quindi utilizzato soltanto la Gaussiana riducendo la regione di fit (ROI, Region of Interest) soltanto al picco. I parametri della Gaussiana rilevanti per questo studio sono il centroide e la deviazione standard. Tali parametri sono stati usati per quantificare una variazione relativa in funzione della temperatura:

$$\frac{\Delta\text{valore}}{\text{valore medio}} \quad (4.1)$$

La dipendenza maggiore dalla temperatura negli spettri integrali origina dalla piccola variazione degli spettri di massimo: l'integrale viene eseguito su quella parte del segnale superiore a 20 mV (si veda sez. 3.1). Un maggiore valore di picco in tensione corrisponde a una attenuazione del segnale più lunga, quindi a un valore integrale maggiore. Oltre a questo fenomeno, anche la costante di decadimento dell'emissione del cristallo varia in funzione della temperatura [11].

4.1 Rivelatore

Gli ingrandimenti attorno ai picchi presenti nello spettro del cesio (si veda Fig. 4.1) e del sodio (si veda Fig. 4.2 per il picco a 511 keV e Fig. 4.3 per il picco a 1274 keV) evidenziano come all'aumentare della temperatura la carica prodotta dal rivelatore tende

a diminuire, così come la larghezza del segnale. Facendo un fit gaussiano si sono graficati il centroide e la deviazione standard al variare della temperatura e, come si vede nelle Fig. 4.4, Fig. 4.5 e Fig. 4.6, si osserva bene il trend descritto sopra.

La discontinuità tra i 15 e i 20 °C che si osserva sia nel valore medio sia nella deviazione standard potrebbe essere legata, come prima ipotesi, all'ordine con cui sono state effettuate le misurazioni.

La variazione relativa (Eq. 4.1) in temperatura del valore medio è 0.42, mentre della deviazione standard è 0.59, per quel che riguarda il picco del cesio. Per il sodio, la variazione relativa in temperatura del valore medio per il picco a 511 keV è 0.43, mentre della deviazione standard è 0.66. La variazione relativa in temperatura del valore medio per il picco a 1274 keV è 0.49, mentre della deviazione standard è 0.58.

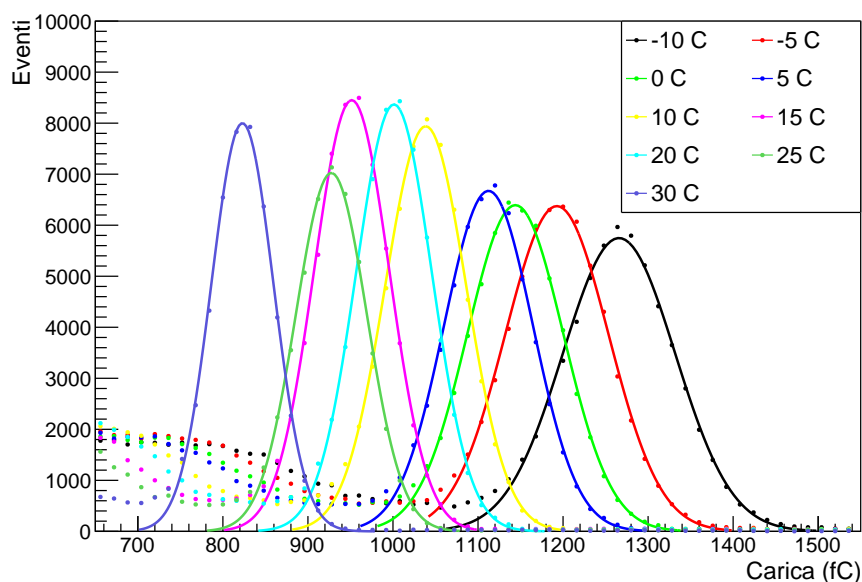


Figura 4.1: Ingrandimento degli spettri dei valori integrali delle forme d'onda avendo come sorgente il ^{137}Cs al variare della temperatura del rivelatore attorno al picco corrispondente all'energia di 661 keV; le linee rappresentano i relativi fit gaussiani.

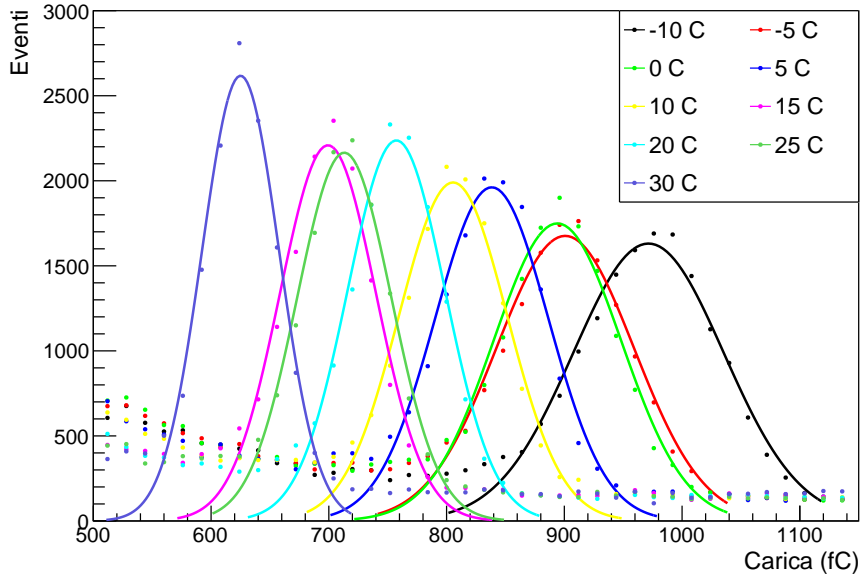


Figura 4.2: Ingrandimento degli spettri dei valori integrali delle forme d'onda grezze avendo come sorgente il ^{22}Na al variare della temperatura del rivelatore attorno al primo picco, corrispondente all'energia di 511 keV; le linee rappresentano i relativi fit gaussiani.

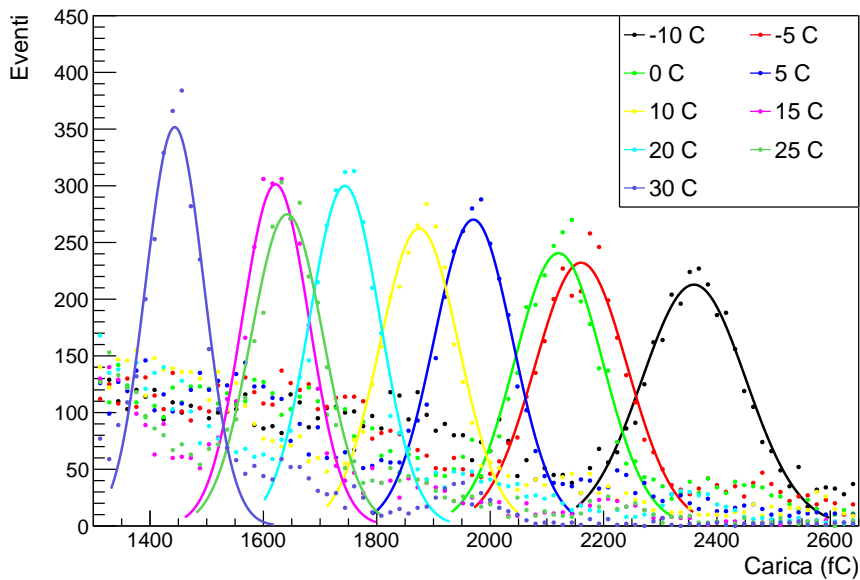


Figura 4.3: Ingrandimento degli spettri dei valori integrali delle forme d'onda grezze avendo come sorgente il ^{22}Na al variare della temperatura del rivelatore attorno al secondo picco, corrispondente all'energia di 1274 keV; le linee rappresentano i relativi fit gaussiani.

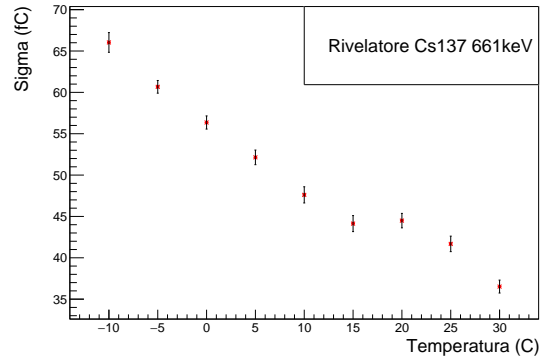
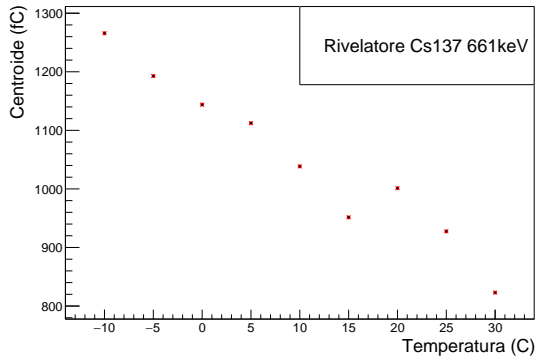


Figura 4.4: Andamento del valore medio e della deviazione standard dei fit gaussiani degli spettri dei valori integrali delle forme d'onda attorno al picco del ^{137}Cs (661 keV) al variare della temperatura del rivelatore.

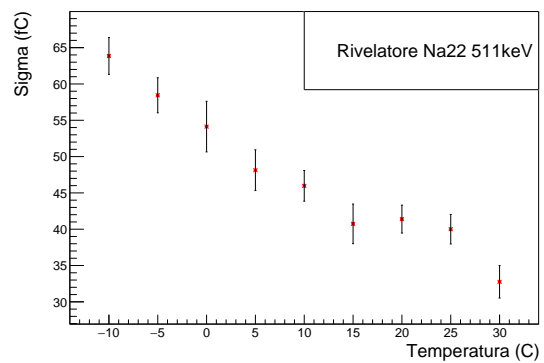
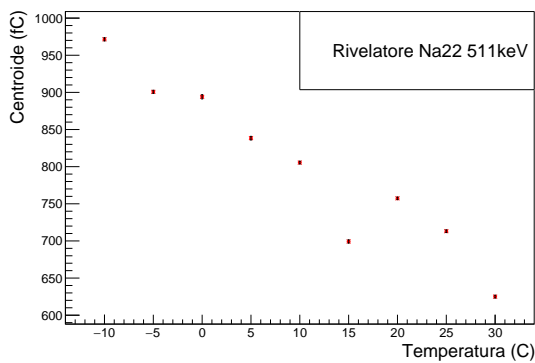


Figura 4.5: Andamento del valore medio e della deviazione standard dei fit gaussiani degli spettri dei valori integrali delle forme d'onda attorno al primo picco del ^{22}Na (511 keV) al variare della temperatura del rivelatore.

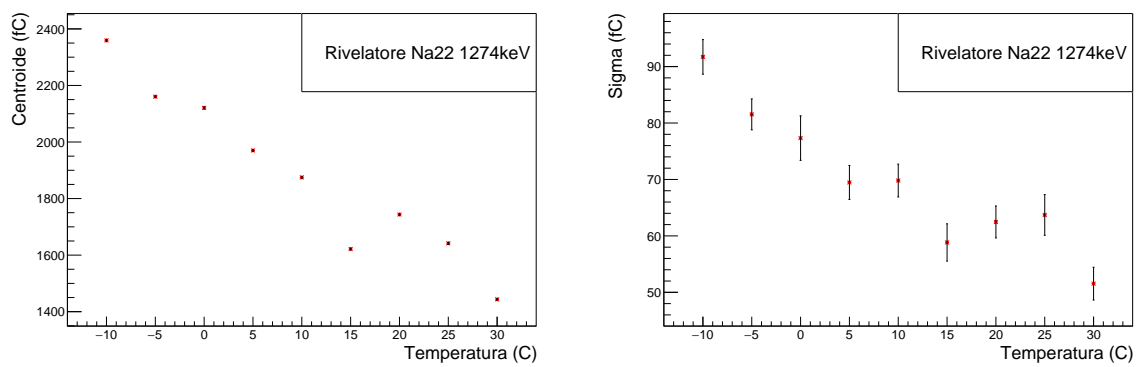


Figura 4.6: Andamento del valore medio e della deviazione standard dei fit gaussiani degli spettri dei valori integrali delle forme d'onda attorno al secondo picco del ^{22}Na (1274 keV) al variare della temperatura del rivelatore.

4.2 Survoltore

Effettuando l'ingrandimento attorno ai picchi si osserva che, in realtà, una variazione in funzione della temperatura della carica misurata esiste, come si può notare in Fig. 4.7, Fig. 4.8 e Fig. 4.9. Tuttavia la variazione della deviazione standard non si nota. Eseguendo il fit gaussiano sulle diverse temperature e graficando il valore medio e la deviazione standard (si vedano Fig. 4.10, Fig. 4.11 e Fig. 4.12) si nota la variazione di entrambi in accordo con quanto osservato per il rivelatore.

Il picco che per il rivelatore interessava le temperature di 20 e 25 °C ora riguarda anche la temperatura di 15 °C: considerando l'ordine di acquisizione dei dati (che era l'ipotesi precedente per la spiegazione di tale picco), questo non spiega l'andamento, rendendo nulla l'ipotesi precedente. Nella letteratura si riscontra che il guadagno di carica al variare della temperatura non è lineare, bensì può avere un andamento più particolare [5] [6] [16].

La variazione relativa in temperatura del valore medio è 0.20, mentre della deviazione standard è 0.20 per il cesio. Il picco a 511 keV ha variazione relativa del valore medio di 0.19 e della deviazione standard di 0.19. Il picco a 1274 keV ha variazione relativa del valore medio di 0.19 e della deviazione standard di 0.22. In Tab. 4.1 sono riportati le variazioni relative dei centroidi e delle deviazioni standard precedentemente elencati per il rivelatore e il survoltore.

Tabella 4.1: Variazioni relative del centroide e della deviazione standard rispetto al valore medio per i picchi precedentemente analizzati di rivelatore e survoltore.

Energia (keV)	Rivelatore			Survoltore		
	511	661	1274	511	661	1274
Centroide	0.43	0.42	0.49	0.19	0.20	0.19
Sigma	0.66	0.59	0.58	0.19	0.20	0.22

4.3 Correlazione carica-energia

Gli spettri fino ad ora analizzati sono in funzione della carica, mentre occorre che siano in funzione dell'energia. Per ogni temperatura analizzata si hanno tre picchi di cui si conosce l'energia poiché dovuti alle emissioni di una sorgente radioattiva e si conosce la carica prodotta grazie all'analisi dei dati descritta nei Capitoli precedenti. Graficando per ogni temperatura i picchi, ponendo in ascissa l'energia corrispondente e in ordinata la corrente misurata, si esegue un fit lineare ottenendo la pendenza e l'intercetta. Nelle Fig. 4.13 e Fig. 4.14 sono riportati i grafici per ogni temperatura. Data la maggiore dipendenza dalla temperatura del rivelatore, la correlazione tra carica ed energia al variare della temperatura è stata analizzata solo per il rivelatore.

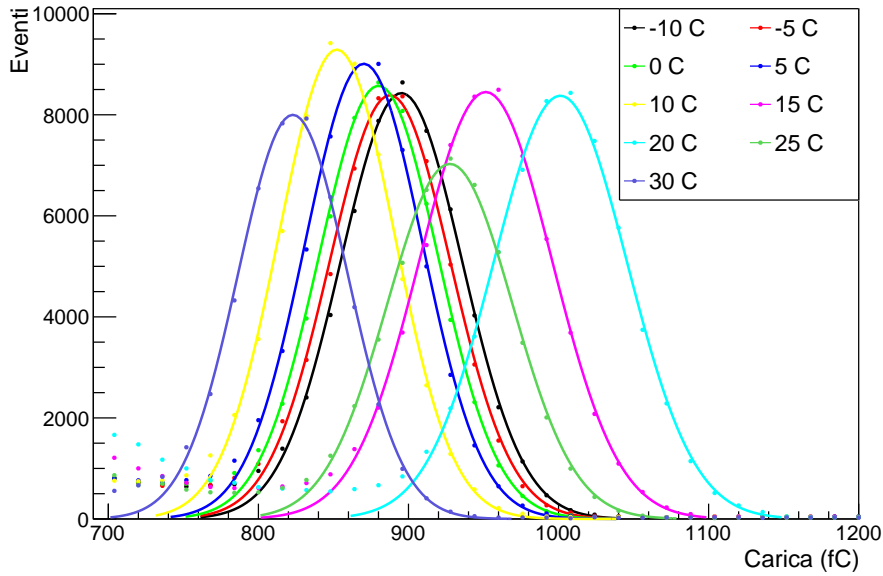


Figura 4.7: Ingrandimento degli spettri dei valori integrali delle forme d'onda grezze avendo come sorgente il ^{137}Cs al variare della temperatura del survoltore attorno al picco corrispondente all'energia di 661 keV; le linee rappresentano i relativi fit gaussiani.

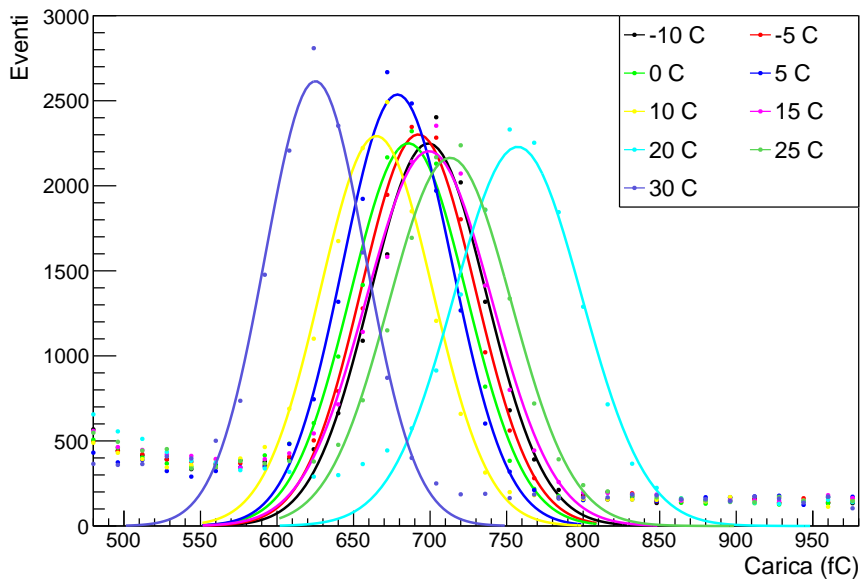


Figura 4.8: Ingrandimento degli spettri dei valori integrali delle forme d'onda grezze avendo come sorgente il ^{22}Na al variare della temperatura del survoltore attorno al primo picco, corrispondente all'energia di 511 keV; le linee rappresentano i relativi fit gaussiani.

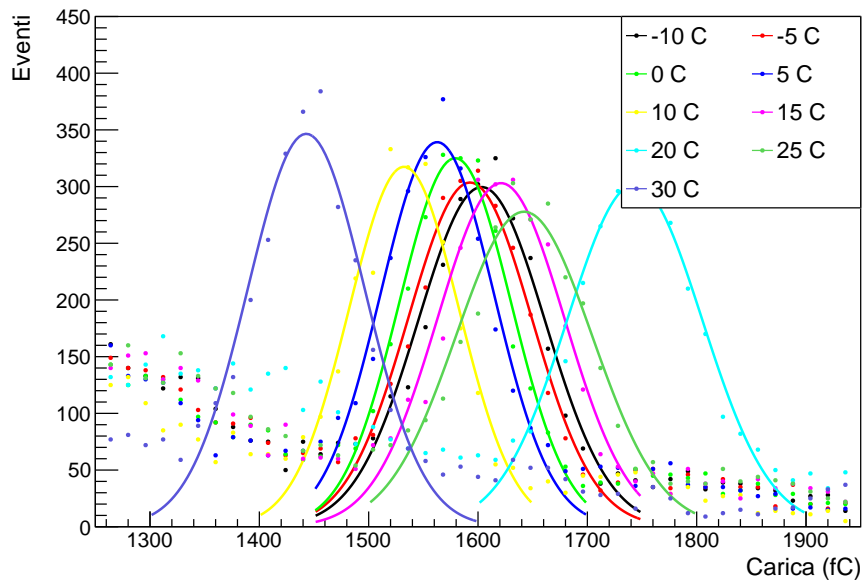


Figura 4.9: Ingrandimento degli spettri dei valori integrali delle forme d'onda grezze avendo come sorgente il ^{22}Na al variare della temperatura del survolatore attorno al secondo picco, corrispondente all'energia di 1274 keV; le linee rappresentano i relativi fit gaussiani.

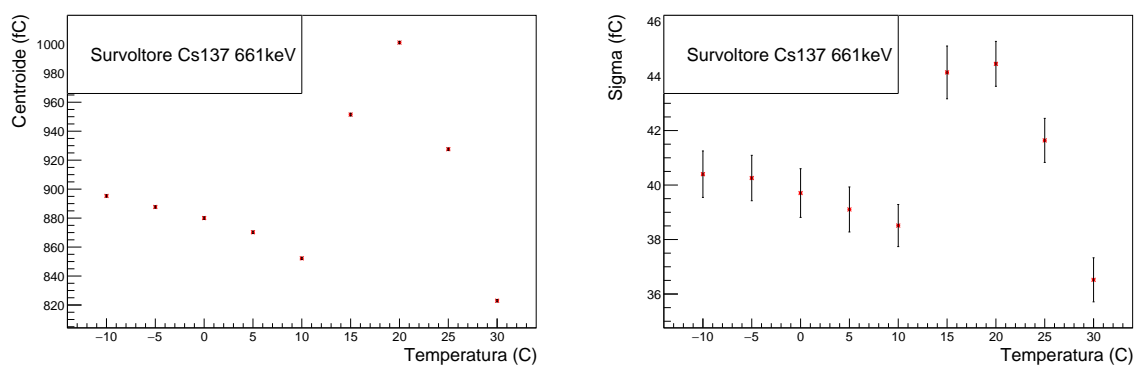


Figura 4.10: Andamento del valore medio e della deviazione standard dei fit gaussiani degli spettri dei valori integrali delle forme d'onda grezze attorno al picco del ^{137}C (661 keV) al variare della temperatura del survolatore.

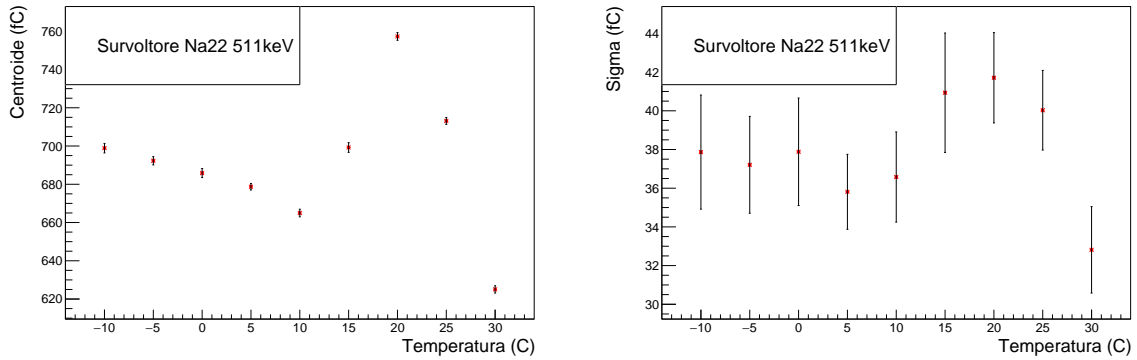


Figura 4.11: Andamento del valore medio e della deviazione standard dei fit gaussiani degli spettri dei valori integrali delle forme d'onda grezze attorno al primo picco del ^{22}Na (511 keV) al variare della temperatura del survoltore.

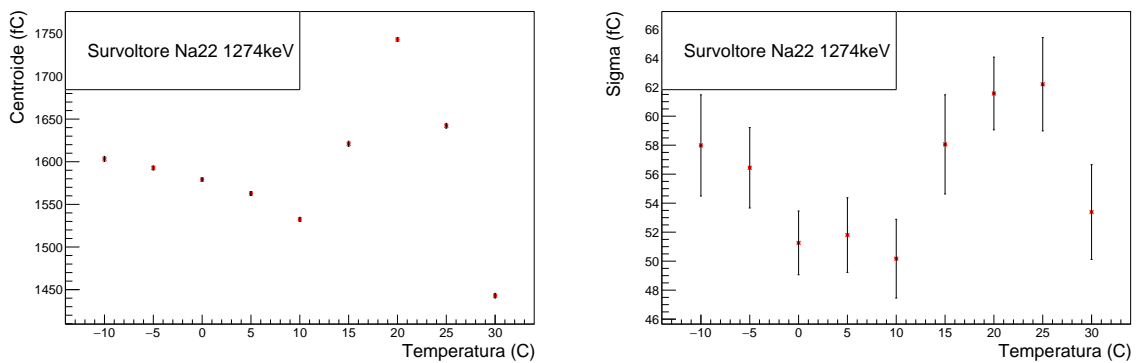
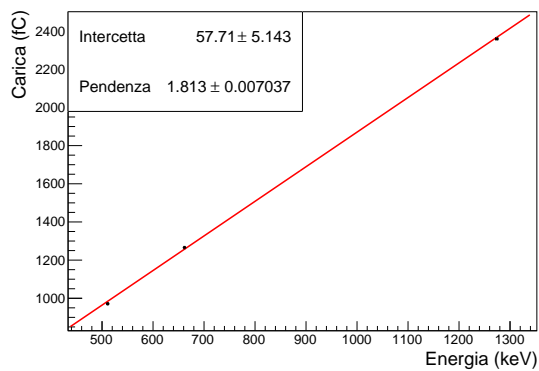
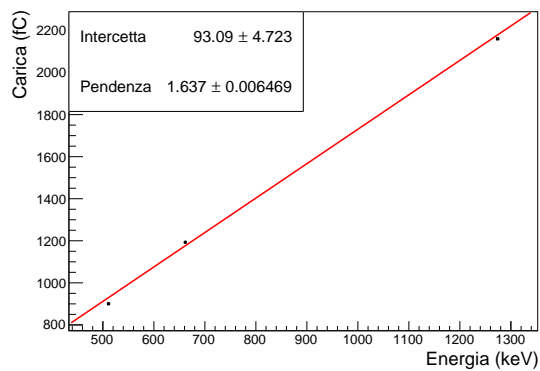


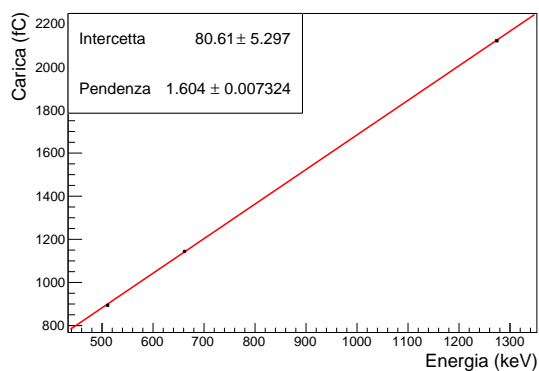
Figura 4.12: Andamento del valore medio e della deviazione standard dei fit gaussiani degli spettri dei valori integrali delle forme d'onda grezze attorno al secondo picco del ^{22}Na (1274 keV) al variare della temperatura del survoltore.



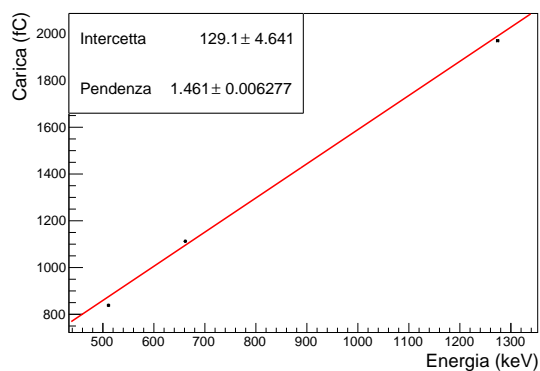
(a) $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$



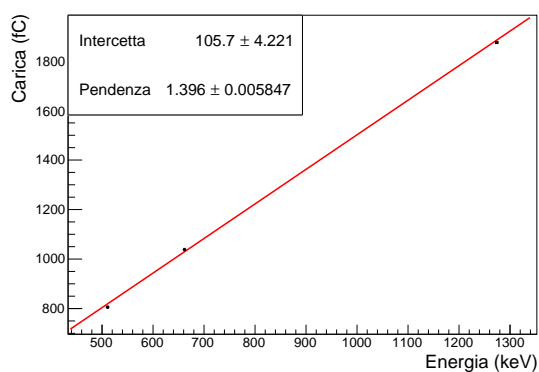
(b) $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$



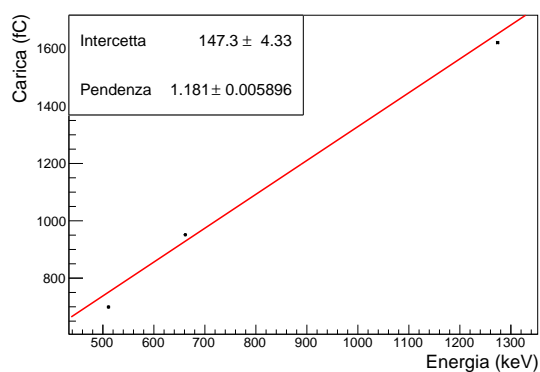
(c) $0\text{ }^{\circ}\text{C}$



(d) $5\text{ }^{\circ}\text{C}$

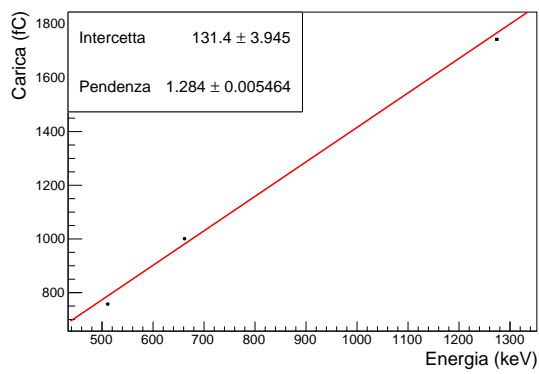


(e) $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

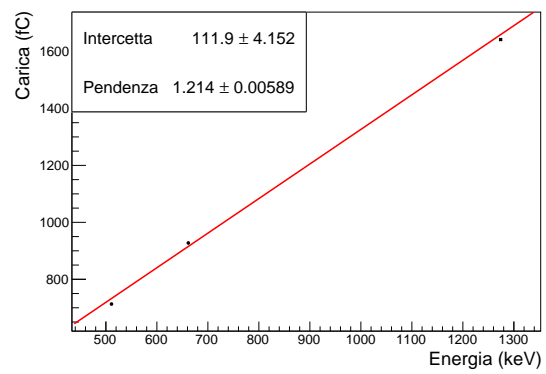


(f) $15\text{ }^{\circ}\text{C}$

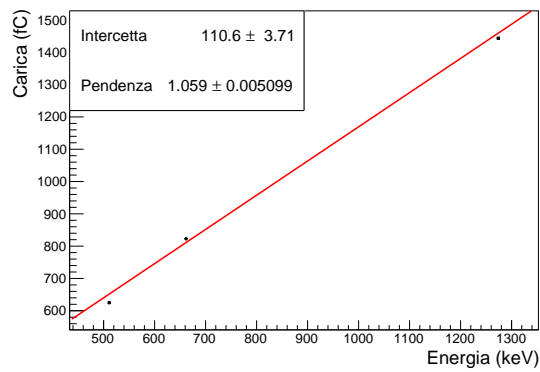
Figura 4.13: Fit lineari e relativi parametri alle varie temperature della correlazione tra energia attesa e carica misurata.



(a) 20 °C



(b) 25 °C



(c) 30 °C

Figura 4.14: Fit lineari e relativi parametri alle varie temperature della correlazione tra energia attesa e carica misurata.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi ci si è occupati dei rivelatori di radiazione gamma in corso di installazione presso l'osservatorio *O. Vittori* di Monte Cimone (Modena) gestito dall'*Istituto per la Scienza dell'Atmosfera e del Clima (ISAC)*. I rivelatori sono utilizzati nell'ambito del progetto *Gamma-Flash* il cui obiettivo è quello di studiare con strumentazione dedicata il legame fra i cosiddetti lampi di raggi gamma da terra (*Terrestrial gamma-ray flashes TGFs*) e gli episodi di fulminazione prodotti durante i temporali, che sono molto frequenti in quella zona montuosa.

Ci si è occupati, in particolare, di caratterizzare uno dei rivelatori in funzione della temperatura che può essere presente sul sito di installazione e che subisce nette variazioni giorno-notte oltre alle ovvie evoluzioni stagionali. Tale variazione di temperatura ha effetti non trascurabili sulla risposta spettrale e di efficienza dei rivelatori di radiazione, pertanto è evidente l'importanza di una analisi sistematica del comportamento dei rivelatori con la temperatura. Una possibilità è quella di installare i rivelatori sul sito e di far evolvere naturalmente la temperatura valutando l'evoluzione della risposta. Ovviamente ciò richiede molto tempo affinché i rivelatori vengano portati dalle temperature estive a quelle più rigide invernali.

Una soluzione più logica e rapida è quella di impiegare strumenti dedicati che permettano di effettuare cicli termici o di mantenere temperature molto alte o molto basse (e comunque estremamente stabili nel tempo) per il tempo necessario a valutare la risposta dello strumento. È stata quindi impiegata una camera climatica disponibile all'*Istituto Nazionale di Astrofisica INAF OAS* di Bologna per questo scopo.

È stata posta la domanda su quale dei componenti che costituisce l'attrezzatura di *Gamma-Flash* fosse il più sensibile agli sbalzi di temperatura. Una volta individuato i componenti più sensibili occorre individuare un metodo per correggere questa variazione di temperatura ed ottenere dati fisici insensibili a questo tipo di variazioni. Per ottenere questo si sono utilizzate radionuclidi che hanno emissioni ad energie ben determinate e dall'evoluzione di tali righe osservate si è stimato il fattore di correzione. Il rivelatore (cristallo scintillatore e fotomoltiplicatore) è più sensibile rispetto al survoltore alle temperature di lavoro.

Per ogni temperatura è stata stimata la retta di calibrazione utilizzando la risposta dello strumento alle 3 energie monocromatiche di riferimento (Fig. 4.13 e Fig. 4.14).

I parametri di coefficiente angolare ed intercetta sono stati plottati in funzione della temperatura. L'evoluzione del coefficiente angolare e dell'intercetta sono visibili nelle Fig. 4.15 e Fig. 4.16. Si può notare un chiaro andamento del coefficiente angolare che decresce al crescere della temperatura, benché grandi fluttuazioni siano presenti rispetto ad una funzione lineare di best fit. Meno ovvio è il comportamento dell'intercetta che sembra avere una crescita lineare al crescere della temperatura dai bassi valori fino a circa 20 °C per poi mostrare un plateau a temperature più elevate (>25 °C).

Grazie a questo lavoro è quindi possibile, conoscendo la temperatura di lavoro del rivelatore nel momento dell'acquisizione, calibrare il suo comportamento e riportare le misure come se fossero state acquisite ad una temperatura di riferimento (per esempio alla temperatura ambiente di 20 °C). La caratterizzazione svolta in questa tesi per un solo rivelatore dovrà essere svolta per tutti i rivelatori, dato che la risposta di un rivelatore è unica ed è indipendente dalla risposta degli altri rivelatori. Inoltre, nelle future calibrazioni si analizzerà il comportamento collettivo di tutto l'apparato sperimentale e non solo del rivelatore (quindi del rivelatore, del servitore e della DAM insieme).

La tecnica adottata prevede quindi il test di ogni rivelatore ad intervalli di temperatura da un valore minimo ad un valore massimo e successivamente grazie alla realizzazione della funzione di calibrazione, riportare il funzionamento di ogni rivelatore alla temperatura di riferimento. Una possibilità che si sta valutando è quella di effettuare una calibrazione in laboratorio ma di ripetere periodicamente la calibrazione direttamente in loco, utilizzando al posto delle sorgenti radioattive i picchi naturali della radioattività ambientale che avranno una evoluzione con la temperatura analoga a quanto osservato con i picchi in energia delle radiosorgenti di calibrazione in laboratorio (per un approfondimento dell'utilizzo di una sorgente naturale di K-40 si veda App. B).

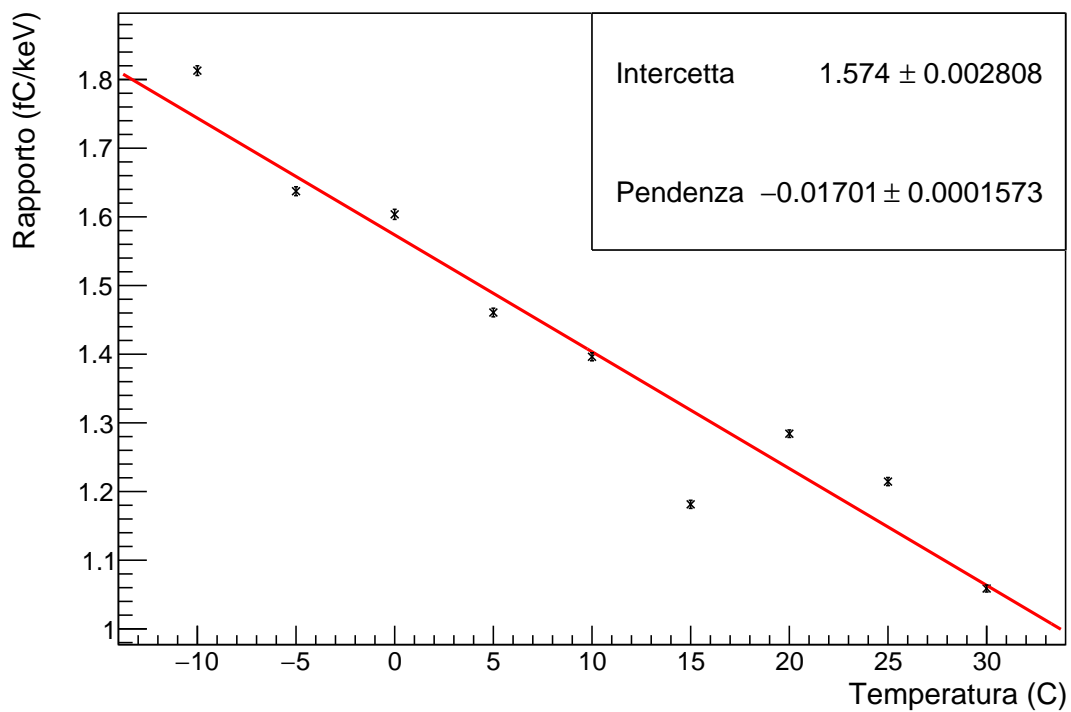


Figura 4.15: Pendenze dei fit lineari dei grafici della carica in funzione dell'energia al variare della temperatura con il rispettivo fit lineare (rosso) e i suoi parametri.

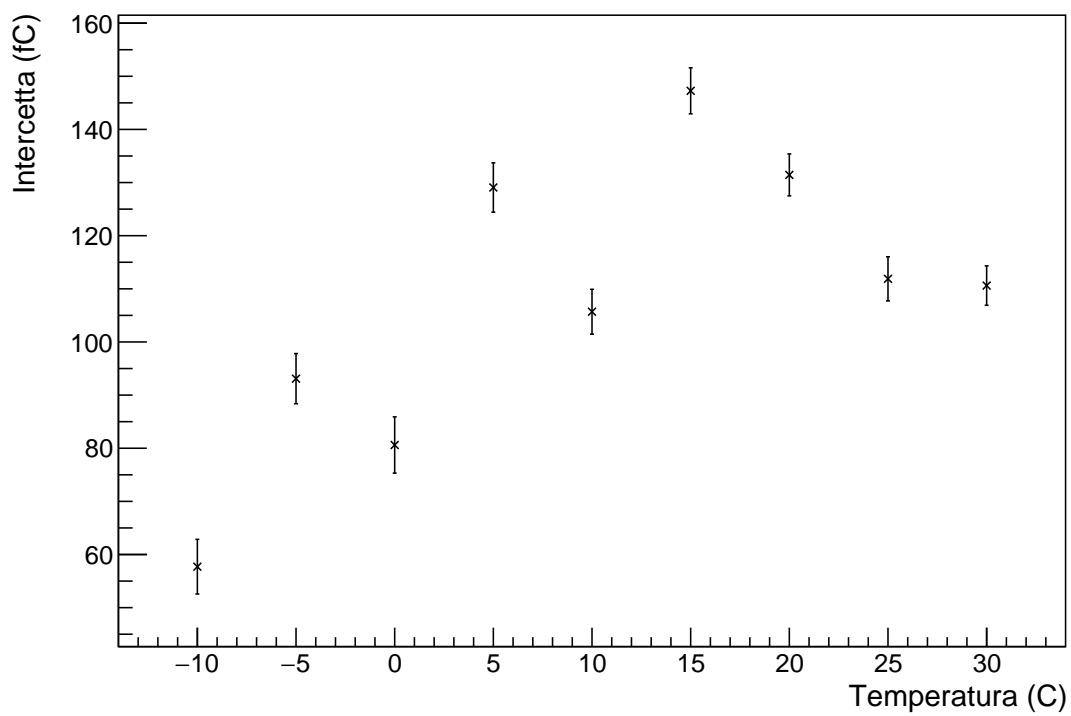


Figura 4.16: Intercette dei fit lineari dei grafici della carica in funzione dell'energia al variare della temperatura.

Appendice A

Corrispondenza tra spettri di valori massimi e di valori integrali

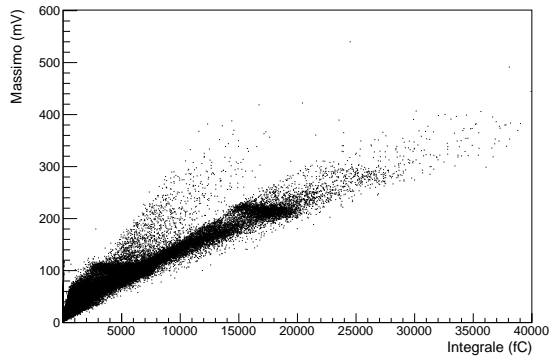
Come già accennato, il programma *LabVIEW* fornisce anche la correlazione tra il valore di massimo e di integrale per lo stesso segnale, sia per le forme d'onda originali sia per quelle fittate.

Siccome nelle acquisizioni con il cesio si verificano diverse sovrapposizioni di forme d'onda non si osserva bene la correlazione tra i due metodi con cui si studia lo spettro. Per questo si è scelto di mostrare solo i grafici del sodio, dove invece la correlazione è molto evidente: per le forme d'onda fittate la correlazione è perfettamente lineare; per le forme d'onda originali la correlazione è lineare, a meno di un certo rumore a basse energie, probabilmente legato al rumore elettronico. Questa ipotesi è supportata dal fatto che a basse temperature si è osservato che il rumore è maggiore, così come il rumore a basse energie.

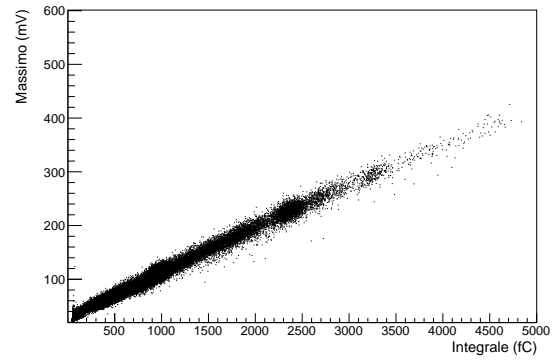
Oltre alla riduzione del rumore, all'aumentare della temperatura si osserva una maggior linearità, cioè è presente una minore dispersione e la correlazione è più evidente. Si osservino i grafici in Fig. A.1 per un confronto con quanto descritto, dove sono riportati i grafici di rate a -10 , 10 e 30 °C.

Le osservazioni precedenti sono riferite alla caratterizzazione del rivelatore. Per quel che riguarda la caratterizzazione del survoltore si osserva sempre il rumore a basse energie, con una densità intermedia tra il grafico di Fig. A.1c e quello di Fig. A.1e, cioè i grafici non fittati a 10 °C e a 30 °C del rivelatore, come è normale che sia poiché il rivelatore era a temperatura ambiente (circa 21 °C). Per quel che riguarda la dispersione o ad altre caratteristiche, non si osservano cambiamenti al variare della temperatura, come si nota in Fig. A.2.

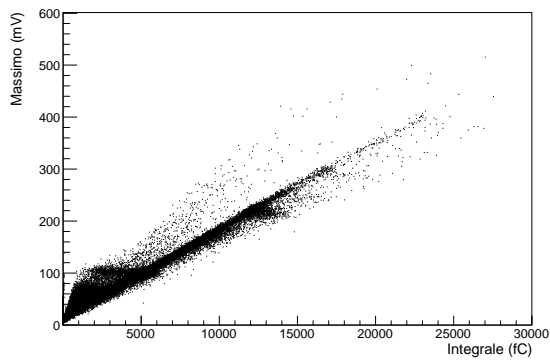
Si può quindi affermare che il rapporto tra il metodo dei massimi e degli integrali non dipenda dalla temperatura del survoltore, bensì solo da quella del rivelatore.



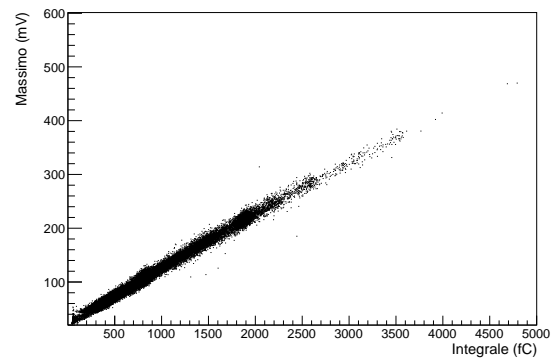
(a) -10°C non fittato rivelatore



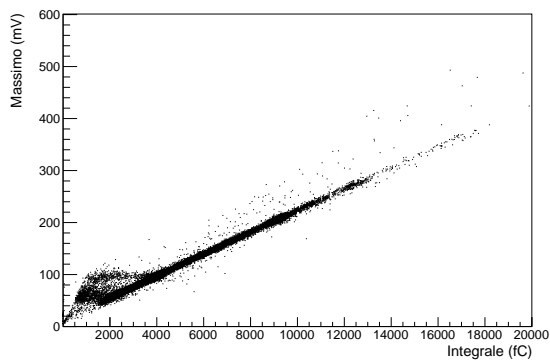
(b) -10°C fittato rivelatore



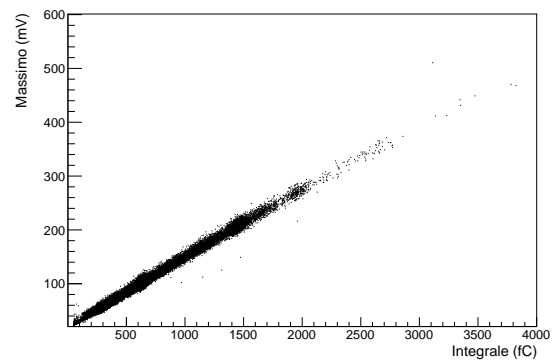
(c) 10°C non fittato rivelatore



(d) 10°C fittato rivelatore

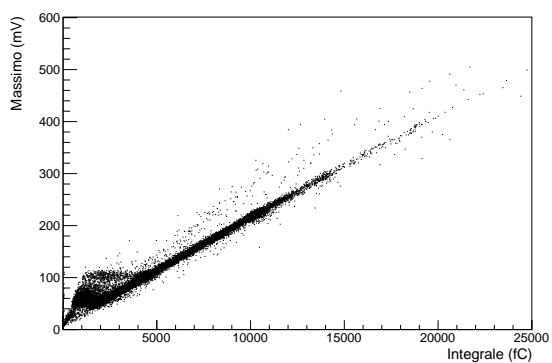


(e) 30°C non fittato rivelatore

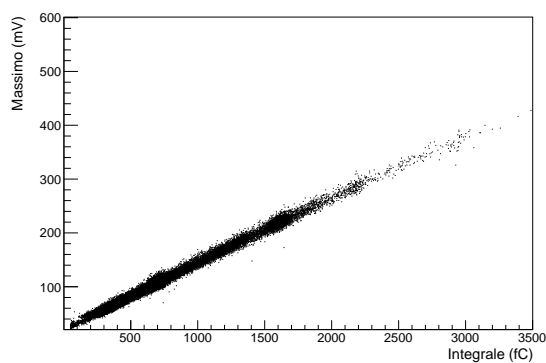


(f) 30°C fittato rivelatore

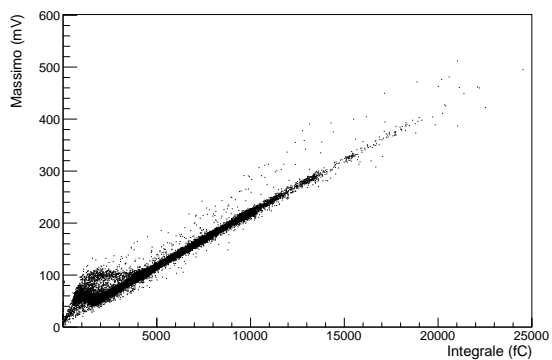
Figura A.1: Correlazioni tra metodo a massimi e a integrali degli spettri del ^{22}Na a -10°C (*a* e *b*), 10°C (*c* e *d*) e 30°C (*e* e *f*) del rivelatore, con a sinistra i dati non fittati (*a*, *c* ed *e*) e a destra i dati fittati (*b*, *d* e *f*).



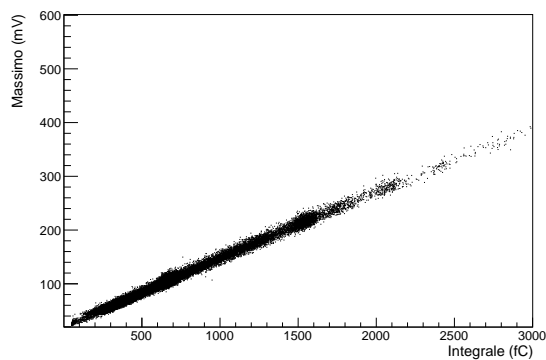
(a) -10°C non fittato survoltore



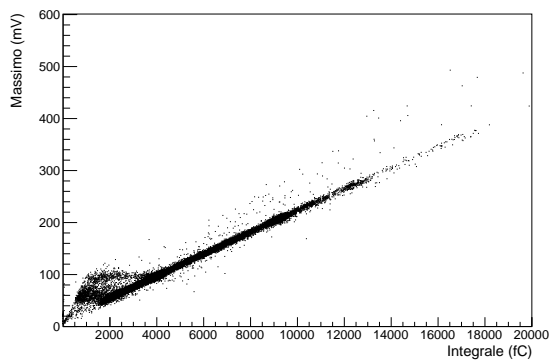
(b) -10°C fittato survoltore



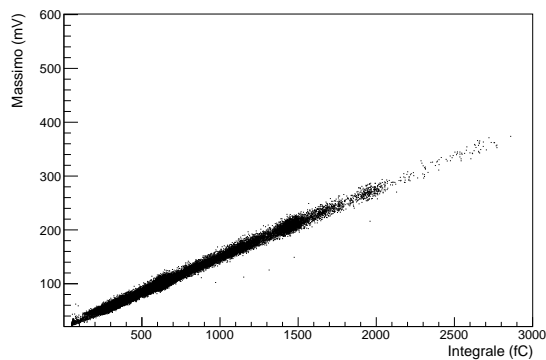
(c) 10°C non fittato survoltore



(d) 10°C fittato survoltore



(e) 30°C non fittato survoltore



(f) 30°C fittato survoltore

Figura A.2: Correlazioni tra metodo a massimi e a integrali degli spettri del ^{22}Na a -10 (a e b), 10 (c e d) e 30°C (e e f) del survoltore, con a sinistra i dati non fittati (a, c ed e) e a destra i dati fittati (b, d e f).

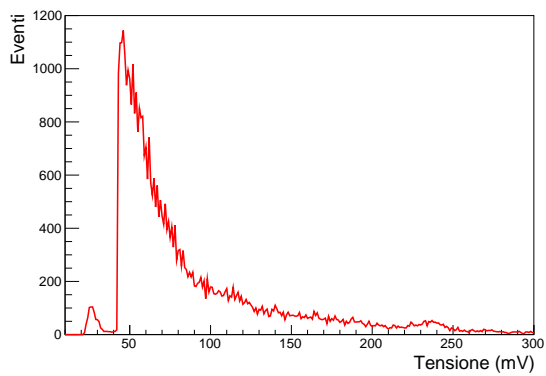
Appendice B

Dati per la calibrazione dei rivelatori già installati

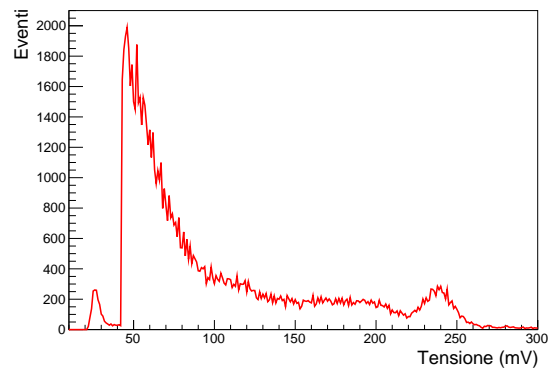
Come già accennato nella sez. 2.1, nel momento dell'acquisizione dati per questa relazione, alcuni rivelatori erano già stati installati sul M.te Cimone. Per effettuare la loro calibrazione carica-energia e la loro dipendenza dalla temperatura bisognerebbe calibrarli con una sorgente di cui si conosce l'energia emessa. Tuttavia trasportare una sostanza radioattiva risulterebbe complesso.

Per risolvere questo problema si è ipotizzato di poter usare della potassa caustica (idrossido di potassio, KOH): essa non è considerata una sostanza radioattiva e si può sfruttare il ^{40}K in essa contenuto naturalmente. Considerando il campione presente in laboratorio (1 kg) e la concentrazione in natura dell'isotopo radioattivo (0.01%), dovrebbero essere presenti 1.07×10^{18} atomi di ^{40}K . Per verificare che siano sufficienti si è eseguita la presa dati sia del solo fondo ambientale sia con la potassa caustica posta a contatto con il rivelatore con lo stesso procedimento usato per le sorgenti di Cesio-137 e Sodio-22. Di seguito vengono riportati affiancati i quattro tipi di spettri integrati per i due tipi di presa dati: solo fondo e fondo drogato (Fig. B.1 e B.2).

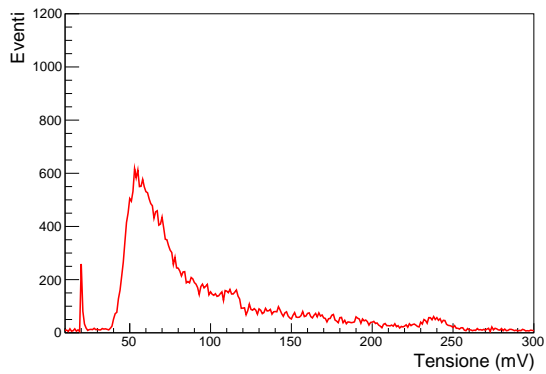
Si può notare come un picco presente anche nel fondo ambientale sia più marcato nella raccolta dati drogata con la potassa caustica. Negli spettri integrati, tale picco è anche particolarmente piccato, consentendo dunque una buona correlazione tra i bin e l'energia.



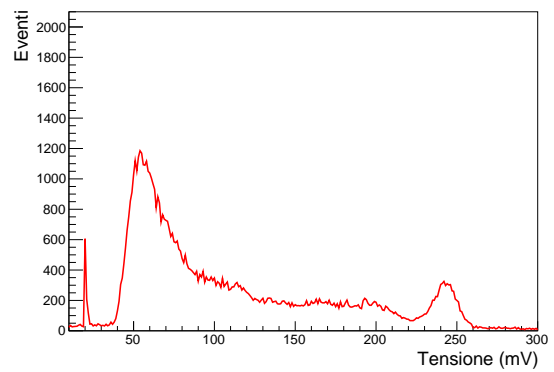
(a) Fondo



(b) ^{40}K

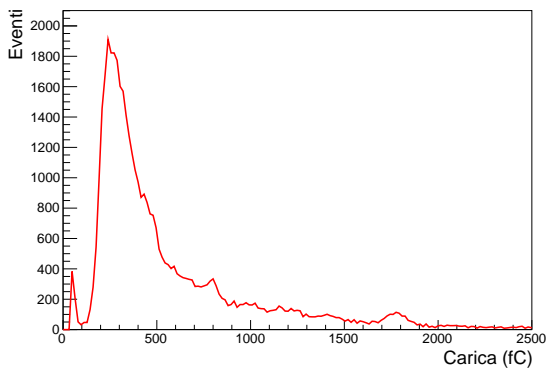


(c) Fondo

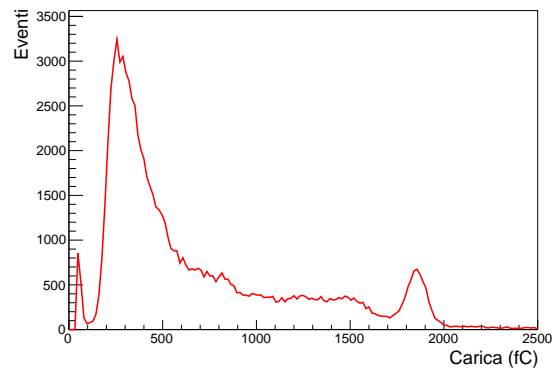


(d) ^{40}K

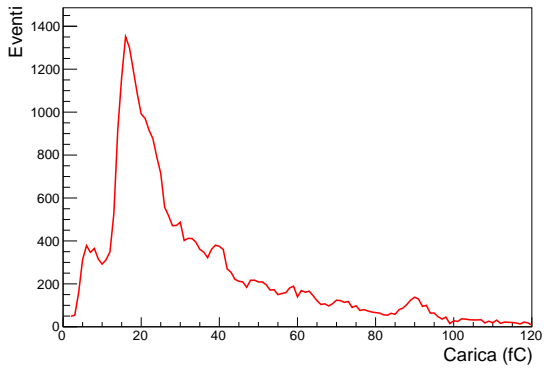
Figura B.1: Spettri integrali ottenuti a partire dai massimi delle forme d'onda (*a* e *b*) e fittate con la funzione riportata in Eq. 3.3 (*c* e *d*) a 21 °C del fondo naturale (*a* e *c*) e del ^{40}K (*b* e *d*); si nota il picco maggiormente evidente per gli spettri drogati con ^{40}K .



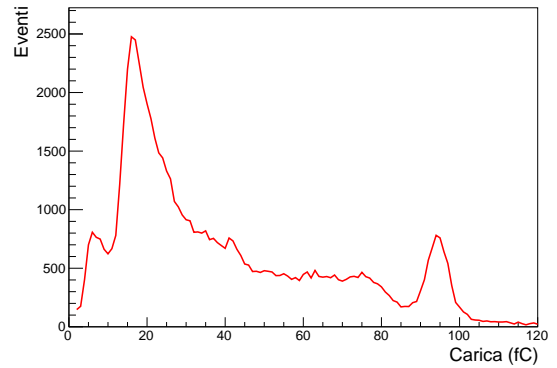
(a) Fondo



(b) ^{40}K



(c) Fondo



(d) ^{40}K

Figura B.2: Spettri integrali ottenuti a partire dai valori integrali delle forme d'onda (*a* e *b*) e fittate con la funzione riportata in Eq. 3.3 (*c* e *d*) a 21 °C del fondo naturale (*a* e *c*) e del ^{40}K (*b* e *d*); si nota il picco maggiormente evidente per gli spettri drogati con ^{40}K .

Bibliografia

- [1] Steven A. Cummer et al. «Lightning leader altitude progression in terrestrial gamma-ray flashes». In: *Geophysical Research Letters* 42.18 (2015), pp. 7792–7798. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015GL065228>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2015GL065228>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015GL065228>.
- [2] J. R. Dwyer et al. «Observation of a gamma-ray flash at ground level in association with a cloud-to-ground lightning return stroke». In: *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 117.A10, A10303 (ott. 2012), A10303. DOI: [10.1029/2012JA017810](https://doi.org/10.1029/2012JA017810).
- [3] Joseph R. Dwyer et al. «Energetic Radiation Produced during Rocket-Triggered Lightning». In: *Science* 299.5607 (2003), pp. 694–697. ISSN: 00368075, 10959203. URL: <http://www.jstor.org/stable/3833440> (visitato il 03/07/2022).
- [4] Teruaki Enoto et al. «Photonuclear reactions triggered by lightning discharge». In: *Nature* 551.7681 (nov. 2017), pp. 481–484. DOI: [10.1038/nature24630](https://doi.org/10.1038/nature24630).
- [5] R. Erling Rohde. «Gain vs temperature effects in NaI(Tl) photomultiplier scintillation detectors using 10 and 14 stage tubes». In: *Nuclear Instruments and Methods* 34 (1965), pp. 109–115. ISSN: 0029-554X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(65\)90268-5](https://doi.org/10.1016/0029-554X(65)90268-5). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X65902685>.
- [6] R. Erling Rohde. «Gain vs temperature effects in NaI(Tl) photomultiplier scintillation detectors using 10 and 14 stage tubes». In: *Nuclear Instruments and Methods* 34 (1965), pp. 109–115. ISSN: 0029-554X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(65\)90268-5](https://doi.org/10.1016/0029-554X(65)90268-5). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X65902685>.
- [7] G. J. Fishman et al. «Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin». In: *Science* 264.5163 (mag. 1994), pp. 1313–1316. DOI: [10.1126/science.264.5163.1313](https://doi.org/10.1126/science.264.5163.1313).
- [8] Glenn F. Knoll. *Radiation detection and measurement*. United State of America: John Wiley & Sons, ago. 2010, p. 258.

- [9] S. Koički, A. Koički e V. Ajdačić. «The investigation of the 0.15s phosphorescent component of NaI(Tl) and its application in scintillation counting». In: *Nuclear Instruments and Methods* 108.2 (1973), pp. 297–299. ISSN: 0029-554X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(73\)90603-4](https://doi.org/10.1016/0029-554X(73)90603-4). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X73906034>.
- [10] M. Marisaldi et al. «Gamma-ray Localization of Terrestrial Gamma-ray Flashes by AGILE». In: *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 2010. Dic. 2010, AE11A-0330, AE11A-0330.
- [11] C.L. Melcher e J.S. Schweitzer. «Gamma-ray detector properties for hostile environments». In: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 35.1 (1988). Cited by: 8, pp. 876–878. DOI: [10.1109/23.12851](https://doi.org/10.1109/23.12851). URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84881011585&doi=10.1109%2f23.12851&partnerID=40&md5=cd4bc9fd4d44c85f0db7719ef9500871>.
- [12] N. Østgaard et al. «First 10 Months of TGF Observations by ASIM». In: *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 124.24 (dic. 2019), pp. 14, 024–14, 036. DOI: [10.1029/2019JD031214](https://doi.org/10.1029/2019JD031214).
- [13] D. M. Smith et al. «A terrestrial gamma ray flash observed from an aircraft». In: *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 116.D20, D20124 (ott. 2011), p. D20124. DOI: [10.1029/2011JD016252](https://doi.org/10.1029/2011JD016252).
- [14] *STEMlab 125-14 technical specifications*. Red Pitaya. 2021. URL: <https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/developerGuide/hardware/compares/vs.html#rp-board-comp>.
- [15] M.D. Tran et al. «A terrestrial gamma-ray flash recorded at the Lightning Observatory in Gainesville, Florida». In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 136 (2015). Advances in Lightning Research, pp. 86–93. ISSN: 1364-6826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.10.010>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682615300717>.
- [16] Ludmil Tsankov e Mityo Mitev. «Response of a NaI (Tl) scintillation detector in a wide temperature interval». In: *Proc. Electronics 2006, Sozopol 20-22 September, Bulgaria 2* (gen. 2006).
- [17] A. Ursi et al. «Terrestrial gamma-ray flashes in the BeppoSAX data archive». In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 156 (apr. 2017), pp. 50–56. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.02.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.02.014).
- [18] Alessandro Ursi et al. «A Study on TGF Detectability at 2165 m Altitude: Estimates for the Mountain-Based Gamma-Flash Experiment». In: *Remote Sens.* 14.13 (giu. 2022), p. 3103. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14133103>.

Ringraziamenti

Alla fine di questo lavoro, vorrei ringraziare le varie persone che sono state necessarie per portarlo a termine.

Innanzitutto il prof. Baldazzi per l'opportunità di tesi.

Il dott. Virgilli per le spiegazioni, la pazienza e il tempo dedicatomi.

Il prof. Levi per l'interesse dimostrato.

Tutta l'equipe del progetto *Gamma-Flash* per avermi permesso di collaborare con loro; in particolar modo il dott. Addis per l'aiuto con il setup informatico.

I vari ricercatori di *CNR-INAF* che ho incontrato durante l'esperienza per le conoscenze che mi hanno fornito.

La mia famiglia, soprattutto - ma non solo - per il supporto.

I miei compagni universitari per aver condiviso con me le esperienze che questo corso di studi ci ha portato.

I miei amici di casa per avermi aiutato come solo loro sanno fare: male!