

Marco Arcani

Costruire un rivelatore di muoni a GMT

Il telescopio per i raggi cosmici

Costruire un rivelatore di muoni a GMT

Il telescopio per i raggi cosmici

I edizione

Copyright ©2021 by Marco Arcani.

Pagina internet di riferimento del libro:

www.astroparticelle.it/telescopio-per-raggi-cosmici

Per altre informazioni: www.astroparticelle.it

L'opera comprese tutte le sue parti è tutelata dalla legge sui diritti d'autore.

Sono vietate e sanzionate (se non espressamente autorizzate) la riproduzione in ogni modo e forma comprese le fotocopie, la scansione, la memorizzazione elettronica e la comunicazione.

*A Vanessa Samantha che
ogni giorno sopporta le
pazzie scientifiche di suo
padre.*

Prefazione

Era il maggio del 2017. Navigavo a vista su un web smarrente, intricato, speranzoso di "approdare" sul sito giusto. Da insegnante di liceo e responsabile di un laboratorio di astrofisica, ero alla ricerca di un'idea, un'ispirazione, una scossa che potesse dar vita ad un progetto avvincente, qualcosa che avesse permesso ai miei studenti d'intraprendere l'appassionante, seppur impegnativo, percorso della ricerca scientifica. L'opportunità si presentò nel posto più impensabile, nascosta tra i "reietti" della mia posta elettronica. Sulla copertina di una copia digitale della rivista astronomica *Coelum*, ingiustamente dirottata nella sezione *spam* veniva messo in evidenza il progetto ADA (Astroparticle Detector Array), un vero e proprio schieramento di rivelatori di raggi cosmici dispiegato da nord a sud dello Stivale. Lo scopo di questa rete è quello di sfruttare l'ampia superficie e la raccolta dati di ogni singolo strumento di misura per indagare le diverse sfaccettature di queste astroparticelle, un continuo flusso di radiazione cosmica che attraversa il nostro pianeta da ogni direzione. Lo studio, di per sé, era molto intrigante ma ad attrarre la mia attenzione fu soprattutto un particolare: il progetto era stato pensato anche per le scuole, poiché permetteva alle giovani menti curiose, di familiarizzare, in modo tutto sommato semplice, con la fisica dei raggi cosmici.

Conobbi così, Marco Arcani, uno sperimentatore autentico, pragmatico, spinto da una vera passione per la fisica sperimentale. La sua disponibilità e il suo spirito di condivisione mettono in evidenza un'umiltà e un'apertura mentale fuori dal comune. Caratteristiche essenziali per quello che negli ultimi anni è diventato un progetto ambizioso ma soprattutto accessibile ai non addetti ai lavori, del tutto simile, nel concetto, agli osservatori professionali di tipo array (una rete di rivelatori distribuiti su un'ampia superficie).

Il progetto ADA ha avuto un impatto enorme su di me, sui miei colleghi e più di tutto sugli studenti. Le ricerche e le esperienze fatte, in questi ultimi quattro anni, tramite i rivelatori da lui concepiti, denominati AMD5 e AMD13, sono innumerevoli e dal valore educativo inestimabile: decine

Costruire un rivelatore di muoni

di pubblicazioni, partecipazioni esaltanti a concorsi scientifici e convegni internazionali, studi sul campo relazionati alle future missioni lunari e marziane con equipaggio (analizzando le caratteristiche protettive delle caverne nei confronti delle radiazioni cosmiche), nuovi approcci metodologici per meglio comprendere la relazione tra i raggi cosmici ed i vari fenomeni meteorologici, il lancio di un pallone stratosferico con a bordo un rivelatore costruito dagli studenti stessi e queste sono solo alcune delle attività in cui è stata coinvolta parte della comunità scolastica.

Tramite il progetto, i ragazzi non hanno solo preso confidenza con diversi campi della fisica (fisica particellare, geofisica, fisica delle atmosfere, cosmologia, statistica, elettronica, ecc...) ma hanno anche e soprattutto imparato a fare lavoro di squadra, a pianificare progetti e missioni, ad apprendere concretamente tutte le tappe della metodologia scientifica e hanno preso coscienza del significato e degli obiettivi dello studio della scienza nelle scuole e nelle università. Un lavoro appassionante, non sempre facile, che ha aperto loro gli occhi su un mondo che gli sembrava essere precluso e che attraverso il progetto di Marco si è rivelato, anzi, essere alla loro portata.

Questa nuova opera dell'autore, un vero e proprio manuale per costruire in autonomia un proprio rivelatore di raggi cosmici, è un ulteriore passo in avanti nel processo d'inclusione e di condivisione da lui iniziato qualche anno fa. Un lavoro prezioso che fornisce a insegnanti, studenti, ricercatori e ad appassionati del settore in generale, un mezzo potente ed efficace per avvicinarsi non solo alla fisica dei raggi cosmici ma anche al campo più circoscritto della scienza applicata.

Marco Arcani ha concentrato tutta la sua esperienza e le sue indiscusse capacità comunicative, allo scopo di fornire al lettore gli elementi necessari per raggiungere l'obiettivo finale, senza mai disorientarlo. Basta voltare pagina e farsi condurre senza esitazioni lungo un percorso che permetterà, a chiunque lo voglia, di potersi creare i mezzi per captare e decifrare parte delle informazioni provenienti da messaggeri cosmici come il Sole, supernovae o galassie attive lontane lontane.

Andrea Grana

Miersch - Lëtzebuerg (Lussemburgo),

Lycée Ermesinde

Abrëll 2021

Sommario

Introduzione.....	11
1 – I raggi cosmici.....	15
La radiazione cosmica.....	15
Energia dei raggi cosmici.....	17
Osservatori per raggi cosmici.....	18
Progetto ADA.....	20
Gli acceleratori cosmici.....	22
La modulazione solare.....	23
Composizione dei raggi cosmici.....	25
Il Muone (μ).....	26
I muoni in atmosfera.....	27
Raggi cosmici e nuvole.....	29
Muoni e campo geomagnetico.....	30
Effetto di latitudine.....	31
Effetto Est-Ovest.....	31
Effetto Zenit.....	32
Effetto diurno.....	33
Muoni e relatività.....	35
2 – Il rivelatore di muoni.....	37
La radioattività.....	37
Il contatore di Geiger & Müller.....	38
Unità di misura di un rivelatore contatore di particelle.....	39
Principio di funzionamento di un rivelatore di raggi cosmici.....	41
Rivelatori a GMT (Geiger-Müller Tube).....	43
L'alimentazione.....	44
La scheda elettronica.....	44
L'interfaccia di uscita.....	44
Rivelatori a PMT.....	45
Rivelatori a SPM.....	46
Introduzione al rivelatore AMD5.....	46
Geometria del telescopio per raggi cosmici.....	47
Tempo di coincidenza.....	50
Coincidenze accidentali.....	52

3 — Il circuito elettronico	53
I sensori GMT.....	53
Alimentazione dei GMT.....	54
Il contatore Geiger – polarizzazione dei GMT.....	56
Dead time dei GMT.....	57
Alimentazione del circuito a bassa tensione.....	58
La scheda elettronica e logica.....	58
Il rivelatore di Muoni – i GMT in coincidenza.....	61
Interfacce di output.....	62
La connessione USB.....	64
Messa a punto del rivelatore.....	65
Migliorie del circuito di AMD5.....	68
4 — Registrazione dei dati	71
Connessione a un computer.....	71
Connessione a un data logger.....	72
Alternative low-cost.....	73
Data logger Arduino.....	73
Costruzione di un data logger con Arduino UNO.....	74
Hardware del data logger.....	74
Shield di interfaccia segnali tra data logger e AMD5.....	76
Lo sketch (versione con clock esterno).....	78
Shield e sketch (versione clock interno).....	90
Smartphone e Tablet.....	97
Il cavo di collegamento per lo smartphone.....	99
5 — Software AstroRad	101
Descrizione generale.....	101
Installazione del driver USB.....	102
Installazione del software AstroRad.....	102
Installazione software orologio atomico (solo per Windows xp)...	103
Impostazione orologio per Windows 7 e successivi.....	103
Impostazione formato ora (solo Windows 7 e successivi).....	103
Collegamento dei cavi e accensione.....	104
Utilizzo del software AstroRad.....	104
Impostazione porta di comunicazione COM.....	104
Scheda Control Panel.....	105

Impostazioni generali.....	106
Scheda Flux.....	108
Sezione FTP.....	108
Utilizzo in modalità locale.....	109
Impostazione per il funzionamento online (progetto ADA).....	110
Impostazione del proprio sito web.....	110
Scheda Plot.....	111
Scheda Real Time.....	112
Scheda Frequency.....	114
Scheda Dose.....	115
Scheda Space Weather.....	115
Scheda Tools.....	118
Scheda MIDI.....	119
Scheda Report.....	121
Stampa Report.....	121
Archiviazione dei file per funzionamento continuo.....	122
Opzioni per i plotter dei dati a video.....	123
Altre versioni di AstroRad.....	125
6 — La fisica di AstroRad e AMD5.....	129
Coincidenze.....	129
I GMT SBM-20.....	131
Curva di lavoro di AMD5.....	133
La geometria di AMD5.....	134
Precisione reciproca.....	135
Misure di radioattività.....	135
Limiti tecnici per le misure di radioattività.....	138
I file csv in dettaglio.....	138
Requisiti Hw e Sw minimi richiesti.....	142
Velocità di esecuzione del software.....	143
7 — Esperimenti.....	145
Cosa si può fare con AMD5.....	146
Raggi cosmici e altitudine.....	147
Esperimenti stratosferici.....	150
L'effetto Zenit.....	151
Il cielo a muoni.....	153
Raggi cosmici e meteorologia.....	154

Effetto Forbush.....	157
Esperimenti di assorbimento nella materia e radiografie MU.....	160
Esperimenti di radioattività con AMD5 e AstroRad.....	167
8 — Appendici.....	171
Le fasce di Van Allen.....	171
Trigger di Schmitt.....	172
Valutazione della percentuale di radioattività dai RC	173
Scaler e ratemeter.....	175
Registrazione dati via audio e PC.....	175
Siti del progetto ADA che utilizzano un rivelatore AMD5.....	176
App astroparticelle.....	177
CoViDe.....	179
Unità di misura della radioattività.....	181
Il DVD virtuale.....	182
Raccomandazioni di sicurezza.....	184
Ringraziamenti.....	185
Bibliografia.....	187
Iconografia.....	189

I raggi cosmici

Cenni sui messaggeri spaziali

La fisica delle astroparticelle (in gergo scientifico: astroparticle physics) è un moderno campo di ricerca che studia le particelle elementari di origine cosmica che arrivano sulla Terra, in relazione a processi cosmici, astrofisici e geofisici. Questa materia è in rapida evoluzione proprio perché coinvolge un grande numero di discipline tecniche e scientifiche. Il termine astro-particelle è utilizzato anche per definire queste particelle subatomiche, frammenti di atomi che provengono da vari corpi celesti, ovvero i raggi cosmici. I raggi cosmici che sono accelerati dalle sorgenti nello spazio sono definiti *primari* e si propagano a velocità vicine a quelle della luce, perciò posseggono energie enormi. Si pensa che la loro natura, la loro energia e le loro caratteristiche fisiche contengano indizi sugli oggetti che li hanno generati e sparati nello spazio, per questo spesso sono identificati come "messaggeri spaziali".

La radiazione cosmica

I raggi cosmici primari sono composti prevalentemente da protoni (nuclei dell'idrogeno) e altri ioni (nuclei di atomi), la loro carica elettrica positiva è ciò che consente la loro accelerazione e diffusione nel cosmo, essi si propagano come una costante corrente elettrica di ioni che bombardano tutto quello che incontrano, compresa la Terra. I nuclei atomici primari entrano in atmosfera e siccome trasportano energie elevatissime, quando collidono con gli atomi dell'aria generano una miriade di altre particelle, i prodotti delle collisioni in atmosfera sono definiti raggi cosmici *secondari*. I raggi cosmici secondari si distribuiscono in atmosfera come una pioggia, tanto che sono chiamati *shower* o anche cascate o sciami. Gli *shower* sono composti da vari tipi di particelle, principalmente c'è una componente "molle" (poco penetrante) confinata nella parte centrale dello sciame, chiamata cascata elettrofotonica^[1] e una parte "dura" (molto penetrante) composta soprattutto da muoni.

[1] Oppure elettromagnetica, la terminologia "elettrofotonica" è in disuso ma la preferisco perché concettualmente esprime meglio la natura delle particelle da cui ha origine.

Tra i raggi cosmici secondari che raggiungono il suolo (a livello del mare) ci sono prevalentemente muoni oltre a qualche fotone ed elettrone delle cascate eletrofotoniche, qualche neutrone e pochissimi altri nuclei.

Le particelle degli sciami atmosferici quindi si propagano dall'alto verso il basso e progressivamente rilasciano energia nell'atmosfera, esse sono particelle di natura diversa e articolata e prendono parte a molti dei processi radioattivi. Molte di queste particelle sono elettricamente cariche e quindi ionizzanti. Un rivelatore di raggi cosmici a terra pertanto può misurare principalmente i muoni ed eventualmente altre particelle ionizzanti presenti negli sciami. Anche con un semplice contatore Geiger, se si fanno misure a partire da basse quote e poi si sale in alta montagna, si trova che il numero di queste particelle ionizzanti cresce, ovvero la radioattività aumenta progressivamente con l'aumentare dell'altitudine. La concentrazione massima di radioattività si raggiunge intorno a 16.000 metri di quota, poco più in alto delle quote dei voli aerei, e come si può immaginare, questa è una grossa minaccia per gli equipaggi di volo e per chi vola molto di frequente.

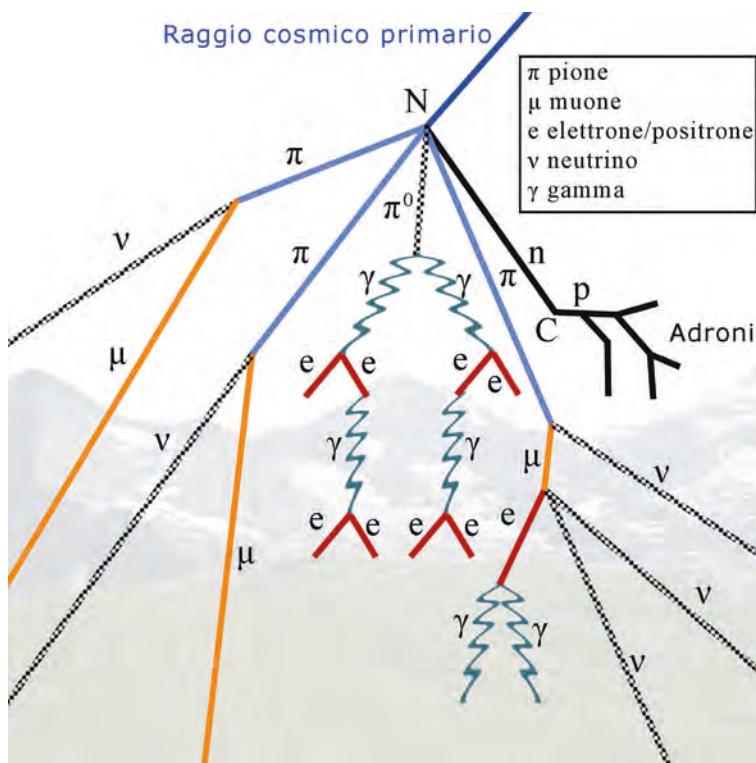


Figura 1 - Schema sintetico di uno sciamo atmosferico.

Il rivelatore di muoni

Principi di funzionamento

Una particella subatomica è invisibile a qualsiasi microscopio ottico o elettronico, non ha importanza quanta qualità ottica utilizziamo nel tentativo di vederle. Le particelle non sono visibili perché semplicemente non abbiamo modo di illuminarle. La lunghezza d'onda della luce visibile è infatti molto superiore alla dimensione fisica che sarebbe necessaria per renderle visibili. Le particelle subatomiche però lasciano degli effetti ben percepibili nella materia, noi ci dobbiamo accontentare di misurare tali effetti e darne una interpretazione plausibile. Quello che differenzia un fotone da un elettrone o da un muone è pertanto il comportamento differente che percepiamo coi nostri strumenti.

La radioattività

La radioattività è una emissione naturale di particelle ionizzanti proveniente da atomi instabili, detti isotopi radioattivi. I tipi di emissione più comuni sono quelle di nuclei di elio, elettroni e fotoni gamma (e anche X), rispettivamente queste emissioni sono catalogate come *alfa*, *beta* e *gamma*. L'energia trasportata dalle particelle radioattive è dell'ordine dei MeV, mentre – come mostrato in precedenza – il valore minimo di energia che possiede un muone a livello del mare supera i 2 GeV, una differenza di almeno un fattore 1000 e come vedremo in seguito, per gli studiosi di raggi cosmici, questo è un grosso vantaggio. Una particella alfa è molto ionizzante, tuttavia il suo potere di penetrazione nella materia è basso tanto che può essere schermata con un piccolo strato di materiale. Le particelle beta hanno un potere ionizzante che è la metà delle alfa, però riescono ad attraversare qualche millimetro di materia e si possono arrestare con pochi millimetri di metallo. I fotoni gamma sono i più penetranti dato che non interagiscono troppo con la materia e per fermarli servono strati di metalli pesanti come il piombo. Questo ci fa capire la grande forza di penetrazione dei muoni cosmici che si trovano anche in caverne a parecchie centinaia di metri sottoterra.

Il contatore di Geiger & Müller

Storicamente lo strumento principe per la misura di radiazione ionizzante e per la scoperta dei raggi cosmici è stato l'elettroscopio. Quando l'elettroscopio viene caricato, la scarica spontanea è dovuta al passaggio di particelle cariche come i raggi cosmici, se si ha a disposizione del materiale radioattivo si può vedere come avvicinando tale materiale all'elettroscopio, la scarica avvenga molto più rapidamente. Se l'elettroscopio viene rinchiuso in una camera stagna riempita con un gas metallico come il sodio, la sua sensibilità aumenta notevolmente (così funzionavano gli elettroscopi di Hess). Se poi si sostituiscono le "foglio-line" dell'elettroscopio con un elettrodo a cui applicare un'alta tensione elettrica (tra la camera e l'elettrodo), in linea di principio si ottiene una camera a ionizzazione. Il segnale elettrico in uscita da questo dispositivo è proporzionale alla quantità di radiazione ionizzante e diversi tipi di camere a ionizzazione sono oggi impiegate nell'industria nucleare.

Il tubo inventato da Geiger e Müller o GMT (Geiger Müller Tube) fa parte dei sensori a gas e in sostanza è una specie di camera a ionizzazione, in cui una miscela di gas è inserita in un tubo con una certa pressione. Una particella ionizzante che attraversa il tubo determina la ionizzazione del gas contenuto. Al tubo GMT è applicato un alto voltaggio che produce lo spostamento di ioni ed elettroni generati dalla ionizzazione della particella incidente. Nel tubo GMT questo spostamento viene amplificato da successive collisioni tra gli ioni finché si produce una cascata di elettroni che spostandosi verso l'anodo centrale positivo genera un impulso elettrico ai capi del tubo stesso. In pratica il GMT si comporta come un interruttore che viene chiuso ogni volta che una particella incide sul tubo.

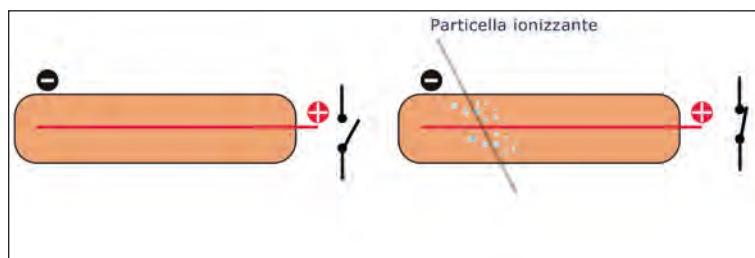


Figura 9 - **Equivalenza tra GMT e interruttore.**

Software AstroRad

Collegamento col personal computer

AstroRad è un software creato appositamente per i rivelatori della serie AMD (AMD4 e successivi), con cui è possibile determinare l'intensità dei raggi cosmici. AstroRad riceve il segnale dal rivelatore tramite una porta seriale standard (COM Rs232), quindi può funzionare anche con qualsiasi altro strumento (e.g. contatore Geiger) a cui sia collegata una scheda seriale fisica o virtuale (convertitore TTL-USB). La versione attuale (5.02) è stata ottimizzata per il funzionamento relativo al progetto ADA sui raggi cosmici e permette di ottenere: misure del flusso per unità di tempo; il tempo di arrivo esatto della particella entro il millesimo di secondo; la frequenza di rivelazione delle particelle; la radioattività e dose espresse rispettivamente in Röntgen e Sievert e molto altro.

Descrizione generale

AstroRad si è progressivamente evoluto per poter ampliare le possibilità operative dei rivelatori. Le varie tipologie di misura sono suddivise in schede. La prima scheda racchiude il pannello di controllo del software, mentre le schede dei dati principali si potrebbero identificare in: quanto, quando, come. Una prima scheda permette di contare quante particelle vengono rilevate al minuto (o in un tempo impostato), la scheda successiva determina il tempo di arrivo delle particelle e la seguente scheda determina la frequenza, cioè quanto tempo trascorre tra un evento e l'altro. Un'altra sezione o scheda è dedicata alla misura di radioattività dai raggi cosmici o ambientale. Altre schede servono per funzioni "accessorie" come la scheda *spaceweather* per il controllo dell'attività solare e geomagnetica.

Per caricare il software AstroRad sul PC si possono scegliere due metodi: il semplice copia e incolla, dopo averlo copiato in una cartella è sufficiente eseguirlo; oppure tramite installazione. Il software è di libero utilizzo per tutti i lettori e disponibile nel DVD virtuale presente sul sito astroparticelle.it (vedere appendici).

AstroRad è compatibile con tutte le versioni di Windows, da XP alla 10^[1]. Prima di collegare il rivelatore a un personal computer, bisogna installare il driver per il funzionamento della porta seriale virtuale (tramite il convertitore TTL-USB, chip CP210x) e poi il software AstroRad.

Installazione del driver USB

- Aprire la cartella “Driver” dal DVD virtuale.
- Fino a **Windows 7**^[2] – fare doppio click sul file: “CP210x_VCP_Win_XP_S2K3_Vista_7”.
- Da **Windows 7 in poi** – utilizzare il file CP210xVCPInstaller_x64 (per i sistemi a 64 bit) oppure CP210xVCPInstaller_x86 (per i sistemi a 32 bit). Seguire le indicazioni a video fino a installazione terminata.

Installazione del software AstroRad

Si può installare il software sia tramite *setup*, sia tramite *drag & drop* (copia e incolla).

1. Dal DVD virtuale aprire la cartella “Software\Astrorad5”.
2. Se si vuole utilizzare il primo metodo avviare il file “AstroRad502_setup.exe” e seguire le istruzioni a schermo.
3. Se si vuole utilizzare il secondo metodo, copiare tutta la cartella “Astrorad_v502_binary” sul disco fisso del computer in c:\programmi\ (oppure c:\programmi(x86)\).
4. Rinominare la cartella solo come: Astrorad_v502.
5. Selezionare il file eseguibile astroradv502.EXE col tasto destro e selezionare invia a desktop.
6. Sul desktop del computer dovrebbe apparire l’icona relativa per avviare AstroRad (eventualmente sostituire l’icona di default con quella più amichevole contenuta nella cartella del software).

[1] Con windows 10 si possono riscontrare semplici problemi (per il salvataggio dei file TXT) relativi ai permessi di esecuzione, scrittura e autorizzazioni di sicurezza che vanno risolti caso per caso.

[2] Windows 7 è compatibile con entrambi i driver.

La fisica di AstroRad e AMD5

Riassunto delle caratteristiche

Coincidenze

I rivelatori AMD(n) considerano come particella cosmica, la coincidenza dei segnali prodotti dai tubi Geiger-Müller. Una particella che viaggia a velocità relativistica produce segnali di brevissima durata (ns) attraversando i materiali di poco spessore, quali sono i GMT. La cascata Townsend prodotta dalla ionizzazione del gas nei GMT per fortuna amplifica tale durata. Nonostante questo, l'impulso elettronico generato, di lunghezza nell'ordine dei microsecondi (figura 60) potrebbe essere comunque troppo breve per essere percepito dal sistema di ricezione del segnale. Per questo motivo la maggior parte dei rivelatori di particelle cosmiche utilizzano delle finestre temporali di acquisizione (figura 59). Quando la particella attiva il primo GMT, l'elettronica aziona un temporizzatore della durata t' , se il segnale del secondo GMT (il quale anch'esso attiva un temporizzatore t'') arriva entro la durata di t' la coincidenza è confermata e l'elettronica conta tale segnale come particella (muone) che ha attraversato entrambi i GMT.

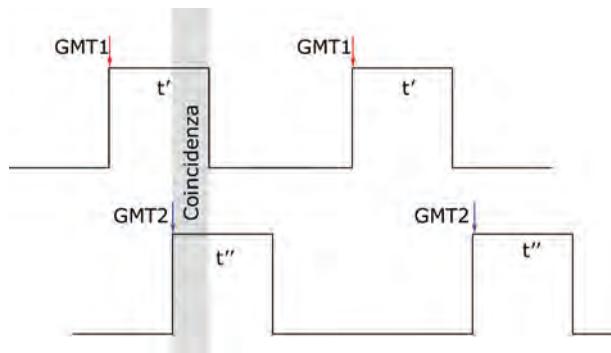


Figura 59 - **Coincidenza tra i segnali dei GMT.**

Nei rivelatori AMD5 della rete di ADA costruiti fino al 2015, il tempo di queste finestre temporali ($t' = t''$) è stato impostato a 66 ms. Gli AMD5 costruiti dal 2016 in poi utilizzano due finestre di coincidenza selezionabili tramite un selettore. La modifica si è resa necessaria per migliorare la discriminazione tra radiazione naturale e cosmica, in particolare per risolvere il problema del radon riscontrato in alcuni siti.

Per un utilizzo generico, il selettore dedicato può rimanere sull'impostazione con la finestra di coincidenza temporale più lunga (che chiameremo C_1 o *standard*), per esperimenti selettivi o in cui è richiesta una maggiore precisione (oppure un tempo di misura più breve) viene impiegata la finestra temporale più corta che è impostata a circa 190 μ s (che chiameremo C_2). L'utilizzo del tipo di impostazione è a propria discrezione, in base agli esperimenti da condurre.

L'accorgimento di utilizzare le coincidenze, ideato nel 1929 da Walther Bothe e perfezionato nel 1930 da Bruno Rossi permette di escludere buona parte della radiazione naturale misurando principalmente quella cosmica. Un espediente ulteriore sarebbe quello di aggiungere un foglio di piombo tra i due sensori, ma la coincidenza tra GMT non può in qualsiasi caso escludere due particelle accidentali che nello stesso preciso istante attraversino i due GMT (i.e. deposito di prodotti da decadimento del radon).



Figura 60 - Impulso elettrico in uscita dal GMT.



Figura 61 - Impulso "allungato" dall'elettronica, ovvero finestra di acquisizione temporale.

Esperimenti

«La scienza è misurazioni» (Lord Kelvin)

L'esperimento è la colonna portante del metodo scientifico e in pratica è un'osservazione di un processo della natura a cui seguono: l'analisi, l'ipotesi oppure la conferma o meno di una ipotesi già esistente e l'eventuale sviluppo di una nuova teoria. Per quanto una misura possa essere eseguita in qualsiasi modo, sarebbe meglio progettare l'esperimento prima di iniziare a misurare. Nel caso ci siano in gioco diverse variabili esiste anche una progettazione formale degli esperimenti, in gergo tecnico definita DOE (Design Of Experiment). Con il rivelatore AMD5 si possono fare diversi esperimenti e perciò è prima necessario definire cosa si vuole misurare e come. I dati delle misure possono essere ottenuti dal software AstroRad, direttamente dalle tabelle a video, così come i grafici. Per un'analisi più dettagliata è comunque meglio prelevare i risultati dai file testuali generati dallo stesso programma, oppure da eventuali data logger collegati allo strumento. In questo modo al termine delle misure è possibile analizzare i dati con molti software di calcolo, analisi e statistica come Excel, Matlab, Jasp, SciLab, Statgraphics e altri.



Figura 69 - **Misure di raggi cosmici in alta montagna (Rifugio Gnifetti AO) con un rivelatore AMD7.**

Cosa si può fare con AMD5

Con questo strumento è possibile fare molti lavori, il sito *astroparticelle.it* è stracolmo di esperimenti ottenuti con i rivelatori della serie AMD. Le attività vanno dalla più semplice, come il conteggio del flusso dei raggi cosmici con la tracciatura dei grafici, alle più impegnative e non mancano attività di svago come la generazione di musica o di testi al passaggio dei raggi cosmici. Un'esperienza semplice da condurre è quella relativa alla dipendenza dei raggi cosmici dall'angolo di zenit, un effetto dovuto al fatto che muoni molto inclinati attraversando più materia perdono più energia. Su questo tema, in collaborazione con DESY, ogni anno insegnanti e studenti possono partecipare alla giornata cosmica internazionale (ICD). Un'altra misura simile può essere quella della verifica della provenienza dei raggi cosmici o effetto est-ovest che consiste nell'orientare il rivelatore (ovvero i GMT) in direzione sud-nord e inclinarlo progressivamente verso est e poi verso ovest, per dimostrare e comprendere l'effetto geomagnetico. A onor del vero questo è un esperimento che ha più probabilità di successo a basse latitudini e/o ad alta quota, ma utilizzando molti dati e molta statistica è possibile evidenziarlo anche alle nostre latitudini. Dal 2020 esiste anche un simulatore online chiamato CoViDe che permette di fare misurazioni con rivelatori virtuali e anche di prevedere il comportamento del rivelatore AMD5 su questo tipo di esperimenti (vedere appendici).

Clima, meteorologia e raggi cosmici hanno un intimo rapporto, coi rivelatori AMD5 è affascinante vedere come l'intensità dei muoni è modulata dai fenomeni atmosferici. Un'altra ricerca intrigante può essere quella del confronto tra l'intensità dei muoni rilevati e il flusso del vento solare, per evidenziare come l'attività del Sole influenza i raggi cosmici a terra. I dati del vento solare sono disponibili in tempo reale da vari strumenti, ad esempio dal *CELIAS proton monitor* della sonda SOHO (https://www.astroparticelle.it/public/celias/plot-celias_sky.asp), oppure si possono fare confronti con altri parametri solari, o con i flussi di neutroni e muoni di altri osservatori raccolti da vari portali, come il NMDB (<http://www01.nmdb.eu/>) o il NOAA (<https://www.swpc.noaa.gov/>). Esperimenti stimolanti riguardano l'assorbimento dei raggi cosmici nella materia, questo è il principio su cui si fonda la radiografia a muoni o Mu-Ray. Un primo effetto può essere evidenziato sovrapponendo materiali di un certo spessore sopra al rivelatore, ad esempio le

