

**theremino**  
•the•real•modular•in-out•

Sistema theremino

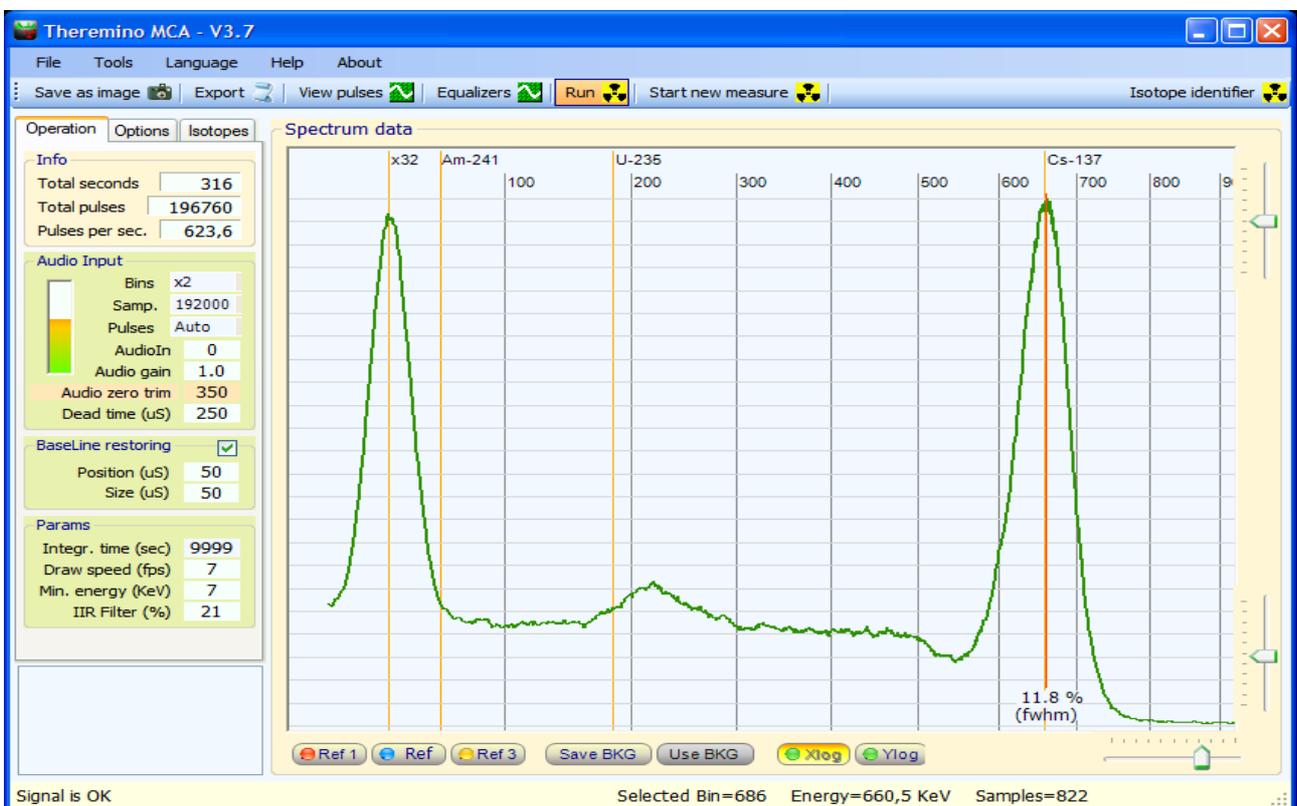
# **Tecniche di condizionamento del segnale per la Spettrometria Gamma**

# La Spettrometria Gamma

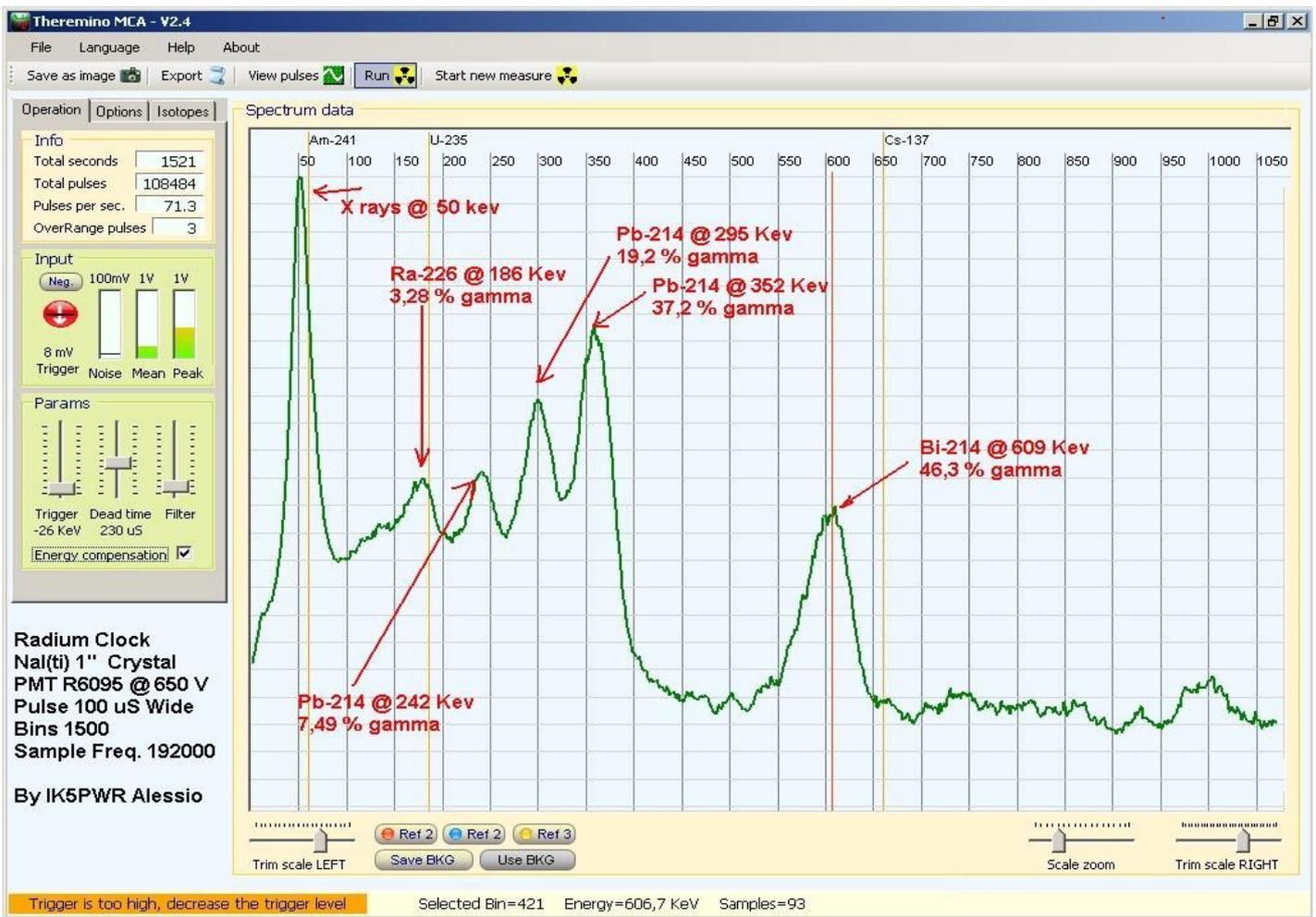
Tramite la misura dello spettro di energie è possibile distinguere gli isotopi radioattivi e apprezzarne la relativa abbondanza. Ogni isotopo produce raggi gamma con energia concentrata su una o più righe. La forma del grafico risultante è una specie di "firma" che permette di riconoscere le sostanze radioattive presenti nel campione sotto misura.

I raggi gamma vengono rivelati singolarmente da appositi sensori (cristalli scintillatori, tubi fotomoltiplicatori e foto-diodi) e trasformati in impulsi elettrici di intensità proporzionale alla energia del raggio gamma, normalmente misurata in KeV (Kilo Elettron Volt)

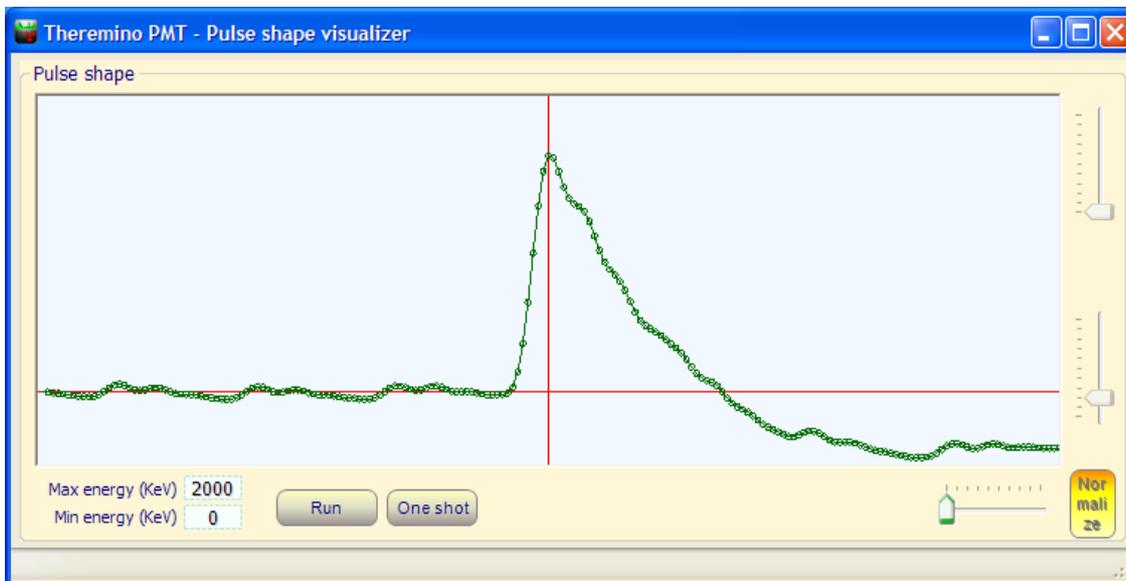
Con appositi software chiamati MCA (Multi Channel Analyzer) si estraggono gli impulsi dal rumore e si trasformano in grafici tarati in KeV, facilmente leggibili da un operatore.



Questa è la "firma" del Cesio radioattivo (Cs-137), facilmente riconoscibile e quindi molto usato per la taratura. Altre firme ben conosciute dagli esperti del settore sono quelle dell'Americio (Am-241), del Radio (Ra-226), del Cobalto (Co-60) e del Potassio (K-40)



Questa è la "firma" del Radio (Ra-226), con i suoi quattro picchi caratteristici a 186, 242, 296 e 352 KeV e il picco singolo a 609 KeV



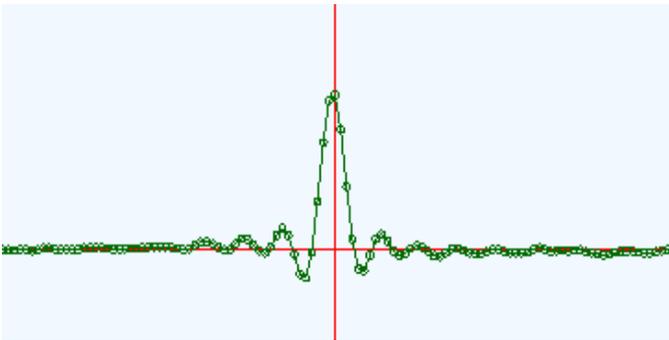
Questo è un impulso proveniente da un cristallo scintillatore accoppiato a un tubo foto-moltiplicatore e amplificato.

# Riconoscere gli impulsi

Il riconoscimento degli impulsi è un punto cruciale per un analizzatore multicanale, esistono molti metodi per farlo, tutti lavorano bene sugli impulsi di alta energia, ma pochi riescono a lavorare bene nella zona delle energie molto basse.

Il ben noto software PRA, ad esempio, usa il riconoscimento della forma degli impulsi "Shape recognition" che funziona abbastanza bene, ma elimina un gran numero di impulsi e rallenta notevolmente la visualizzazione.

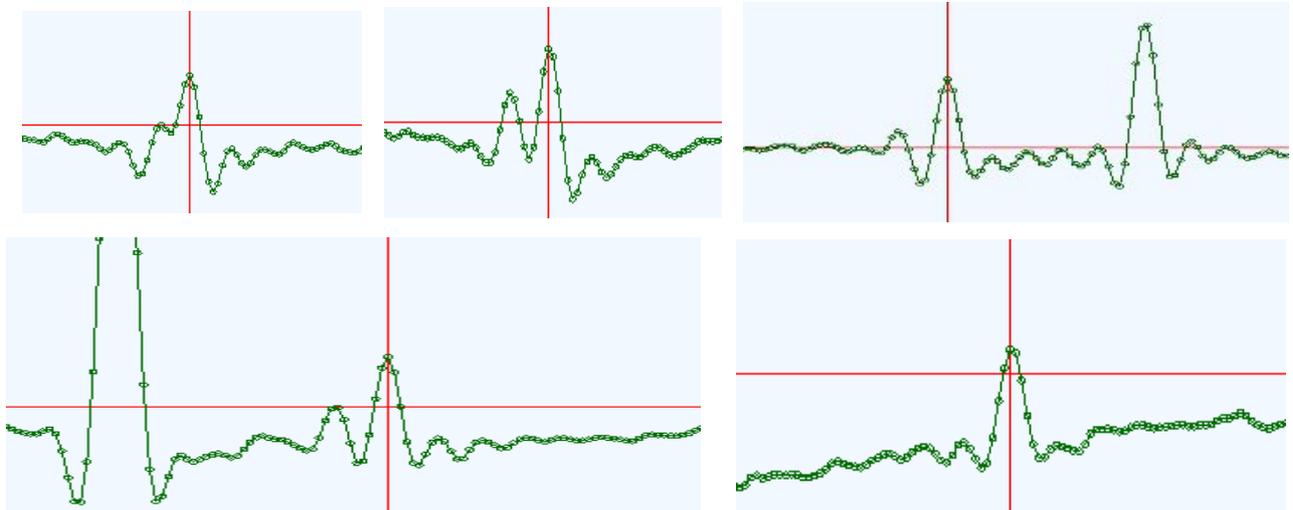
Intuitivamente si pensa che riconoscere gli impulsi dalla forma sia il metodo ideale. Questo è vero quando gli impulsi sono alti ma quando sono piccoli, deformati dal rumore e dai "ringing" questo metodo può fare solo una cosa, eliminarli.



Facciamo conto di avere nella "Shape" da riconoscere l'impulso delle immagine qui a sinistra. In genere gli impulsi di alta energia saranno più o meno tutti simili e la "Shape Recognition" li riconoscerà facilmente.

Ma come sono fatti gli impulsi molto bassi, con energie sotto ai 100 KeV ?

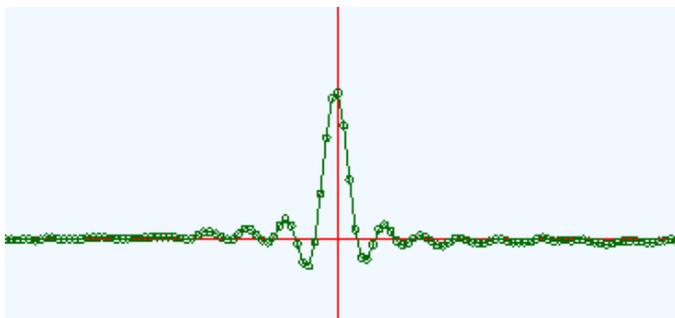
Eccone un po' - attenzione che la scala di tutte le prossime immagini è stata amplificata molto in verticale, in realtà gli impulsi sono da 10 a 100 volte più bassi del precedente.



Sono tutti deformati dal rumore, non se ne trova uno che assomigli a quelli di alta energia. In questa situazione la "Shape recognition" può fare solo due cose o li elimina tutti, oppure si accontenta di una lontana somiglianza e prende per buoni tutti i "ringing" e tutte le piccole gobbe di rumore che assomigliano a un impulso producendo una montagna di rumore nella parte sinistra del grafico che copre, sposta e confonde le righe di nostro interesse.

## Come Theremino MCA riconosce gli impulsi

Come visto nella pagina precedente la "Shape recognition" è lenta e produce molto rumore ma esiste un metodo migliore?



**Impulso di alta energia ( 660 KeV )**



**Impulso di energia molto bassa ( 32 KeV )**

Un umano, guardando queste due immagini riconosce immediatamente che anche quello a destra è un impulso valido, anche se di forma completamente diversa.

Anche Theremino MCA ci riesce, infatti la riga rossa indica che lo ha preso perfettamente in centro, se il segnale è ragionevolmente esente da rumore e disturbi il Theremino MCA ne sbaglia pochissimi, come è facile verificare con il suo "Pulse shape visualizer"

Per arrivare a questo risultato il Theremino MCA usa un insieme di tecniche di tipo comportamentale "Behavioural", cioè si basa non sulla forma, che può variare, ma su come un impulso si comporta diversamente dal rumore.

Prima di tutto è necessario prevedere il futuro... cioè avere a disposizione anche i campioni che non sono ancora arrivati, per fare questo si passa tutto l'impulso in una linea di ritardo (un buffer circolare) e quindi si leggono gli impulsi non quando avvengono ma un certo tempo dopo. In questo modo si possono avere a disposizione anche le caratteristiche della zona che segue l'impulso.

Poi si controllano le caratteristiche principali: Quale è il campione più alto di questo impulso? Ci sono campioni più alti nelle vicinanze? Ci sono altri impulsi sovrapposti? La linea di zero è a posto oppure si trova più in basso o in alto? Quello che sembra un impulso sarà forse solo rumore?

Poi si cerca di correggere tutto il possibile, cancellare gli effetti del "ringing" e del rumore e raddrizzare la linea di zero.

Infine, se tutto va bene, si memorizza l'impulso altrimenti lo si elimina.

Il tasso di eliminazione di ThereminoMCA è minimo, praticamente "non perde un colpo" e questo si vede dalla velocità di creazione dei suoi grafici.

## Segnale audio, campionamento e "ringing"

Il ringing (che in inglese non significa "ringhio" ma "scampanellio", "vibrazione" o "risonanza") viene creato dal filtro anti-aliasing della scheda audio.

Molti pensano che il ringing dipenda dai cavi di collegamento o dall'amplificatore del segnale e cercano di agire su questi componenti per eliminarlo, senza riuscirci.

Per eliminare il ringing si devono ammorbidire gli impulsi con un adeguato filtro passa basso che allunghi i pochi micro secondi prodotti dal tubo foto-moltiplicatore ad almeno 100  $\mu\text{s}$

Allungando gli impulsi se ne perde qualcuno ma durante le normali misure da laboratorio non se ne perde che una piccola percentuale e questa perdita viene compensata dall'aver impulsi più precisi e leggibili tanto che la velocità non solo non diminuisce ma aumenta di molto.

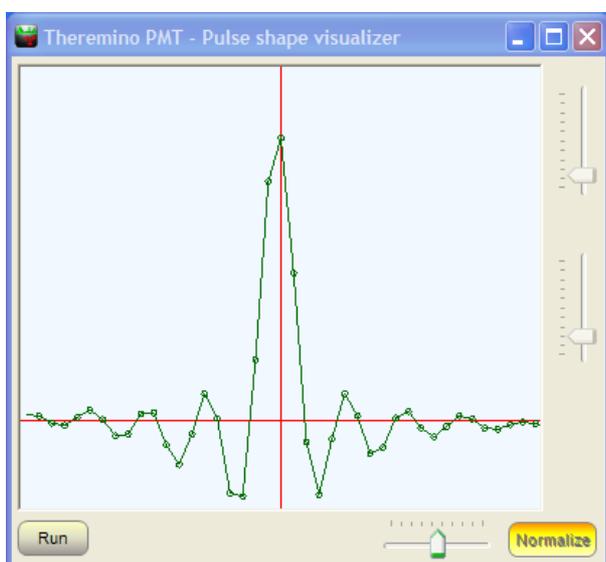


Immagine 1 - Impulso da 10  $\mu\text{s}$

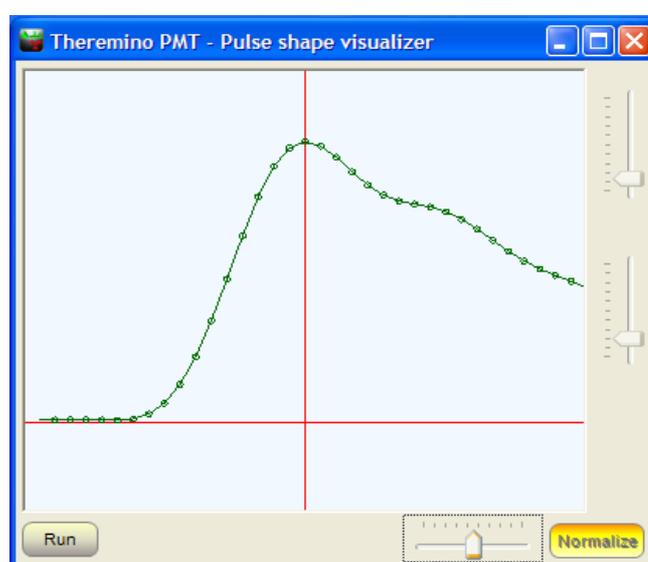
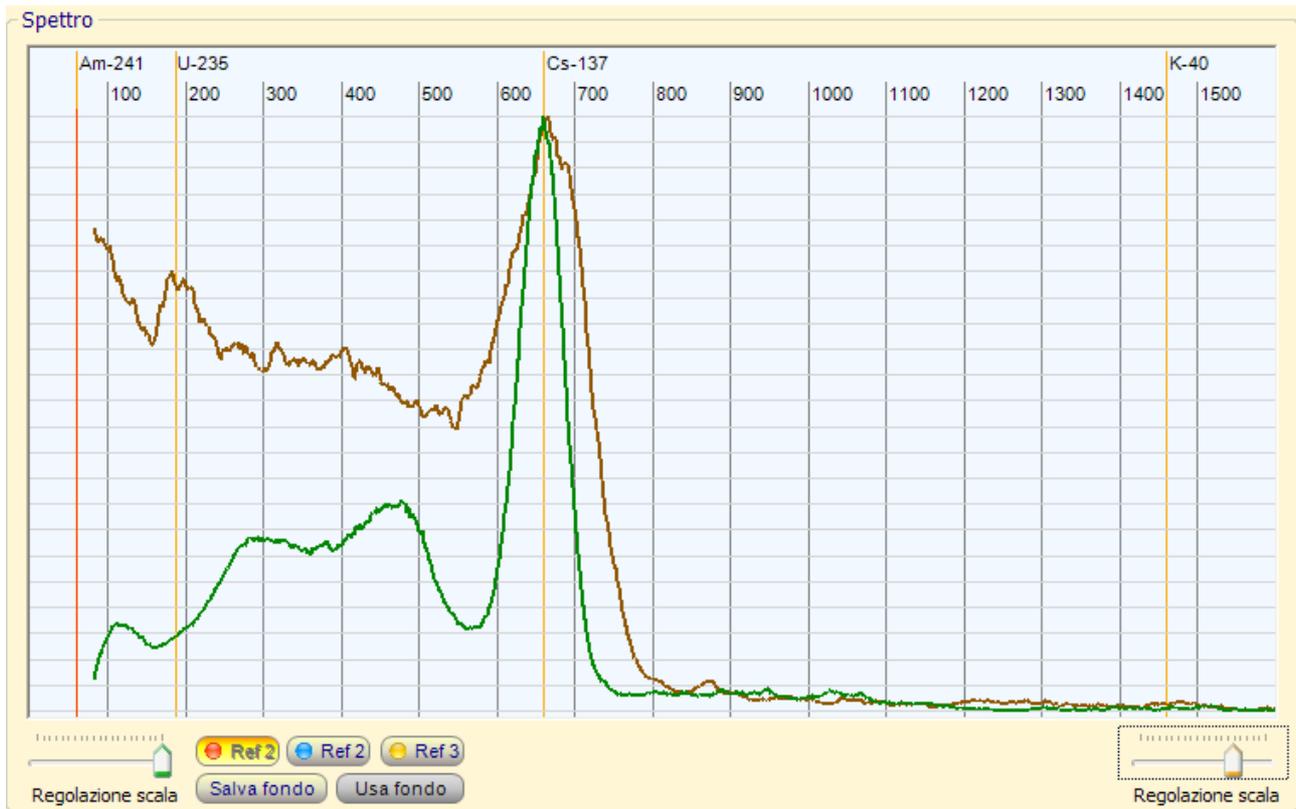


Immagine 2 - Impulso da 100  $\mu\text{s}$

Nella immagine "1" si vede un impulso molto stretto (10  $\mu\text{s}$ ) che produce un forte "ringing" mentre nella "2" si vede un impulso da 100  $\mu\text{s}$  che non produce "ringing"

Si noti anche che nella prima immagine il punto di massimo viene campionato male, con troppo pochi punti, producendo misure imprecise che allargano notevolmente le righe come visibile nella prossima pagina.

# Segnali non filtrati



## La riga del cesio - In rosso con impulsi da 10 uS, in verde con impulsi da 100 uS

In questa immagine si vede un segnale non filtrato (in rosso) che produce un notevole allargamento della riga del cesio e un aumento del tappeto di rumore che si alza fino a far sparire le due gobbe caratteristiche a circa 300 e 450 KeV

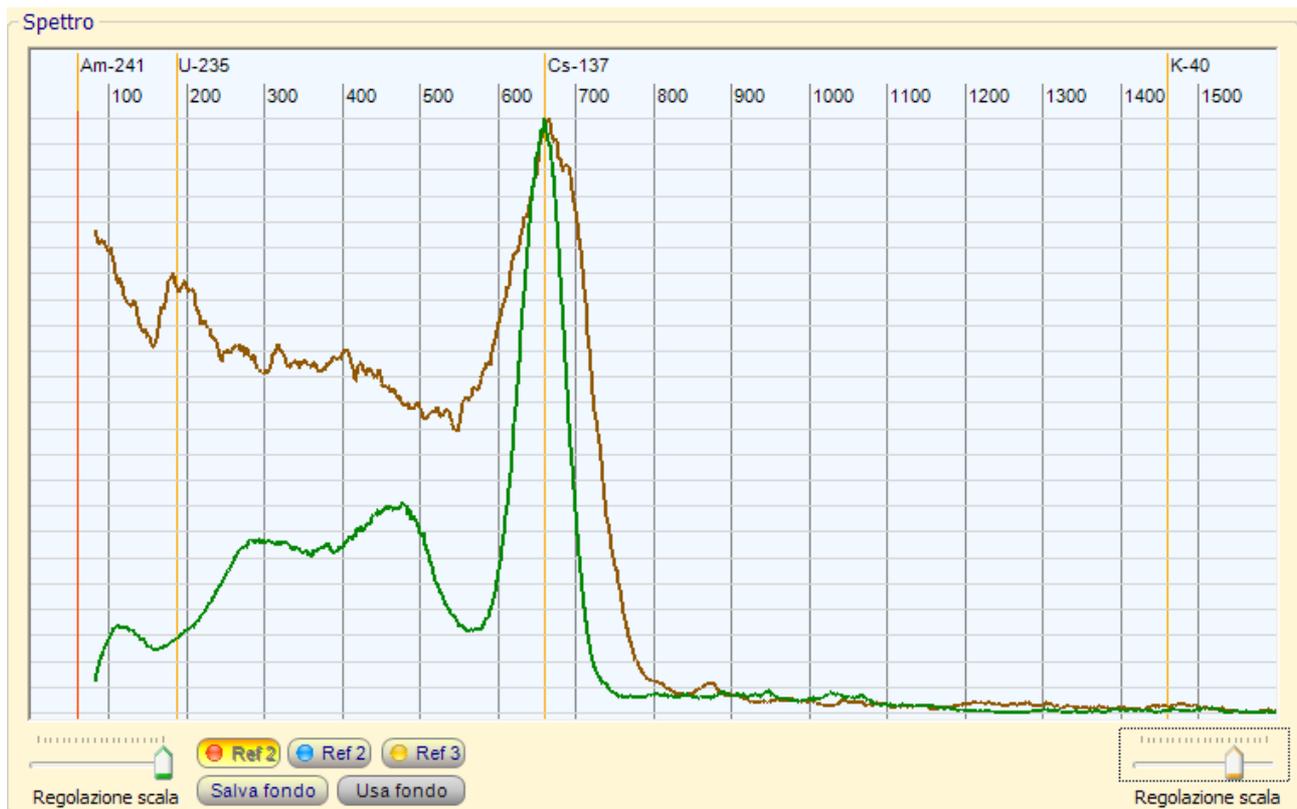
Allungare gli impulsi rende più precisi i valori campionati, stringe le righe degli isotopi, diminuisce il rumore e fa spuntare anche i segnali più deboli.

Usare impulsi larghi ha solo vantaggi e non provoca effetti collaterali. Nelle normali misure si misurano frequenze intorno ai 100 Cps quindi la distanza media tra due impulsi si aggira sui 10 millisecondi. Dieci millisecondi sono 100 volte maggiori di 100uS per cui si perdono pochissimi impulsi a causa dell'ammucchiamento (Pile up in inglese)

Anche con impulsi molto larghi (fino a 500 uS) non si verificano errori di misura causati dai "Pile up" perché in questi casi il software elimina il secondo impulso.

Spesso qualcuno obietta che a volte si misurano campioni molto radioattivi e che in questi casi gli impulsi sono più frequenti, anche 10000 per secondo, portando a perderne moltissimi. Il ragionamento non è sbagliato, in questi casi si perdono anche il 50% degli impulsi. Ma non importa perché si hanno lo stesso impulsi così frequenti da creare una curva perfetta in pochi secondi.

# Cause dell'allargamento delle righe



**In rosso un notevole allargamento della riga del cesio, in verde un modesto allargamento.**

Molti meccanismi contribuiscono ad allargare le righe dello spettro, i più importanti sono:

- Il materiale dello scintillatore
- La geometria, la trasparenza e la rifinitura superficiale dello scintillatore
- Riflessioni e rifrazione della luce nel percorso tra cristallo e catodo del tubo PMT
- Rumore e "ringing" che deformano il segnale.
- Errori di discriminazione tra impulsi e rumore
- Spostamenti della linea di zero degli impulsi ( "Base line shifting" )
- Errori sistematici nel software di misurazione

Tutti questi meccanismi producono errori simili, principalmente i seguenti:

- (1) Allargamento della riga
- (2) Abbassamento della punta della riga. In questa immagine la riga del cesio è stata normalizzata per cui questo effetto non è visibile.
- (3) Innalzamento della linea di base a sinistra delle righe
- (4) Innalzamento della linea di base a destra delle righe (di minore entità rispetto al precedente)

# Perché i cristalli allargano le righe? E perché le allargano di più a sinistra ?

I cristalli scintillatori convertono i fotoni Gamma in fotoni di luce visibile, durante la conversione ogni fotone Gamma si moltiplica in un certo numero di fotoni di luce.

Il numero di fotoni di luce visibile prodotti da ogni fotone gamma dipende dal rapporto tra le frequenze dei due fotoni (o dal rapporto di energie che in definitiva è la stessa cosa)

Ad esempio, un fotone Gamma da 660 KeV (Cesio) dovrebbe produrre circa 330 mila fotoni di luce visibile verde-azzurra e un fotone di 32 KeV (Americio) produrne 16 mila. Dato però che i cristalli hanno una efficienza un po' minore del 10%, nel primo caso saranno circa venticinquemila e nel secondo circa mille.

Fotone	Lunghezza d'onda	Energia (approx)
Raggi gamma	0.0001 nm 0.01 nm	10 MeV 100 KeV
Raggi X	0.01 nm 10 nm	100 KeV 0.1 KeV ( 100 eV )
Luce visibile gialla	400 nm	0.0025 KeV ( 2.5 eV )
Luce visibile verde-azzurra	500 nm	0.002 KeV ( 2 eV )
Luce visibile rossa	700 nm	0.0015 KeV ( 1.5 eV )

Fino a che il raggio gamma non viene convertito in luce visibile ha una sua integrità quantistica. O si scontra con qualcosa e viene rilevato, o passa attraverso indisturbato.

Come esempio prendiamo un raggio gamma da 32 Kev, quando questo raggio gamma va a sbattere in una zona sensibile e produce un lampo di fotoni visibili ha la stessa energia di quando è partito. Questo anche se è passato attraverso l'aria e altre sostanze come alluminio, plastica e cristallo e anche se ha percorso molta strada, ad esempio da un'altra galassia fino alla nostra, alla fine avrà esattamente gli stessi 32 KeV di energia di quando è stato creato.

L'energia di un fotone Gamma non può venire "attenuata" in nessun modo, o lo si ferma e allora il fotone gamma sparisce convertendosi in qualcos'altro, o continua indisturbato la sua strada.

-----

Dopo aver convertito il fotone gamma in molti fotoni di luce però le cose cambiano. Le migliaia di fotoni di luce che compongono un singolo impulso devono ancora arrivare al foto-catodo del tubo fotomoltiplicatore e molti di essi si perdono per strada.

Le possibilità di perdersi sono molte, parte dei fotoni si scontra con una particella di sporco, altri nascono con una direzione che li porta a rimbalzare varie volte sulle pareti del cristallo e spariscono prima di arrivare a destinazione, altri possono nascere lontano dal tubo PMT e perdersi durante l'attraversamento del cristallo.

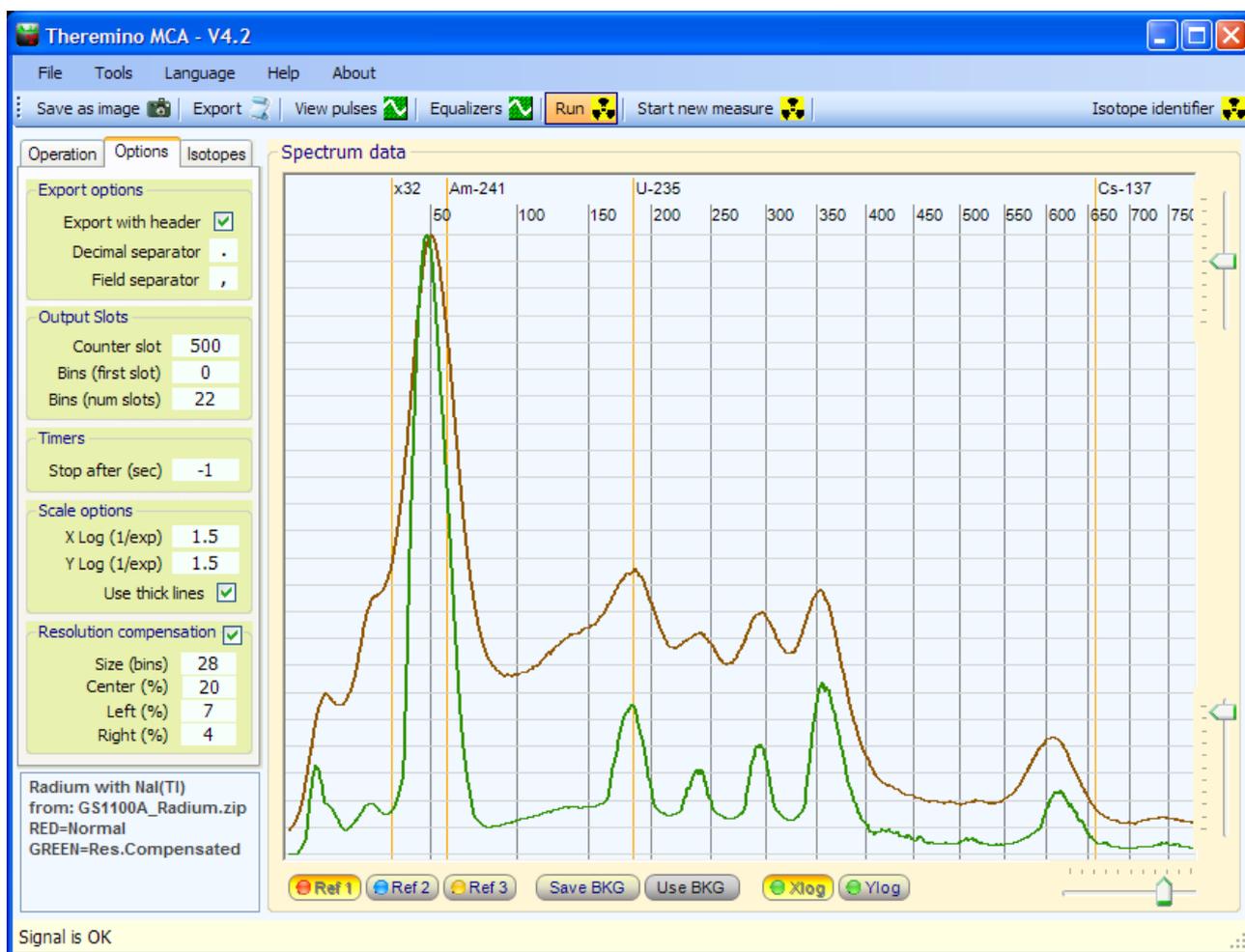
In alcuni casi, per fortuna abbastanza pochi rispetto al totale, dei 1000 fotoni originali ne restano solo 900, raramente solo 500, e in qualche rarissimo caso anche molti di meno. Questo produce un allargamento delle righe verso sinistra. L'allargamento verso destra è minore perché, se sono partiti in mille, più dei mille originali non possono arrivarne.

# Compensazione dell'allargamento delle righe

I cristalli scintillatori producono un allargamento delle righe, la loro risoluzione è sempre troppo scarsa. I cristalli BGO hanno una larghezza dal 12% (di FWHM), i cristalli NaI(Tl), molto più costosi, arrivano al 6%.

Un algoritmo di compensazione della risoluzione lavora in modo simile agli algoritmi di incremento della definizione delle immagini e può guadagnare qualche punto percentuale e portare facilmente i BGO sotto al 10% e i NaI(Tl) sotto al 5%.

Anche i piccoli miglioramenti di risoluzione hanno un grande effetto sulla visibilità delle righe degli isotopi e abbassano notevolmente il tappeto di rumore, facendo spuntare le righe più piccole, che altrimenti sarebbero invisibili.



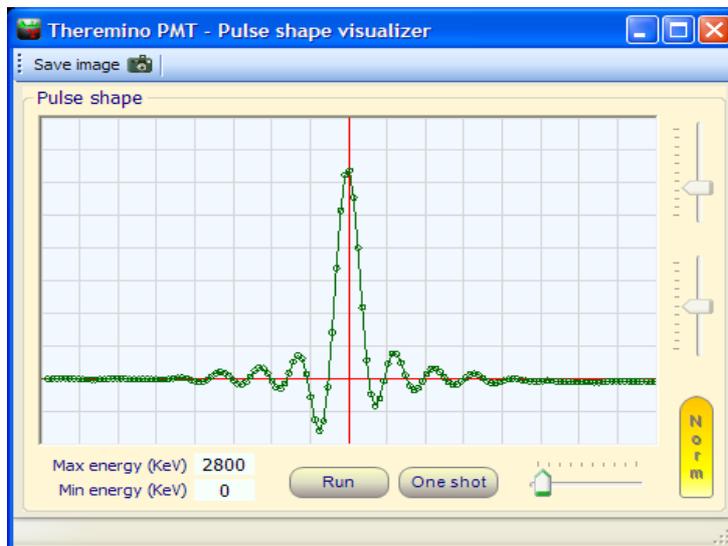
*Qui si vede uno spettro del Radium con un cristallo NaI(Tl). Senza compensazione della risoluzione del cristallo (in rosso) e con la compensazione che ha abbassato notevolmente il tappeto di rumore (in verde)*

## La linea di base ( Baseline Restoring )

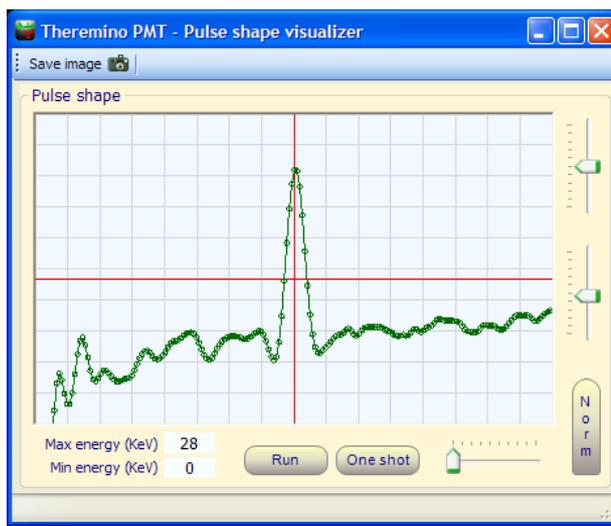
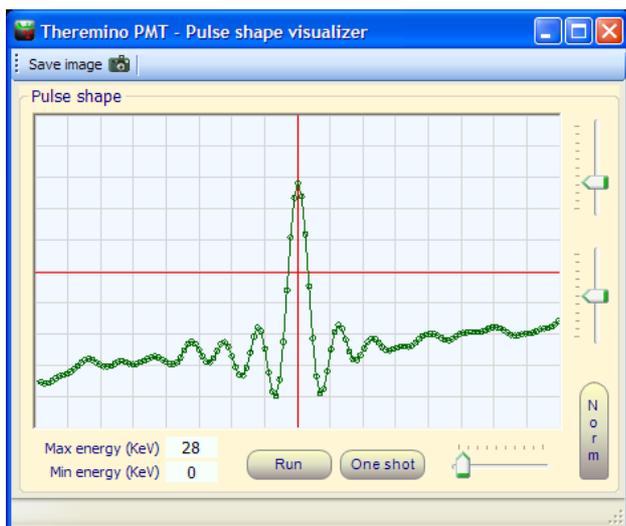
Farebbe piacere avere sempre impulsi ben allineati sulla linea di zero, come in questa immagine, ma pochi hardware riescono a tenere tutti gli impulsi al loro posto.

Per avere la linea di base sempre ferma tutta la catena del segnale dovrebbe lavorare completamente in continua, senza condensatori di disaccoppiamento. Non si tratta solo della scheda audio ma anche dei condensatore di disaccoppiamento dell'alta tensione.

D'altra parte un accoppiamento totalmente in continua provocherebbe molti problemi, tra cui lo spostamento della linea di base dallo zero al variare della temperatura.



Pertanto dovremo convivere con una linea di base instabile come nelle prossime due immagini.



La "BaseLine" tende ad abbassarsi quando ci sono molti impulsi e ad alzarsi nelle pause tra gli impulsi.

Come risultato gli impulsi vengono misurati con energia più bassa del reale (solo la parte che spunta sopra alla riga rossa) e questo provoca un allargamento delle righe e un innalzamento del tappeto di rumore sulla parte sinistra delle righe.

## Gli impulsi bipolari

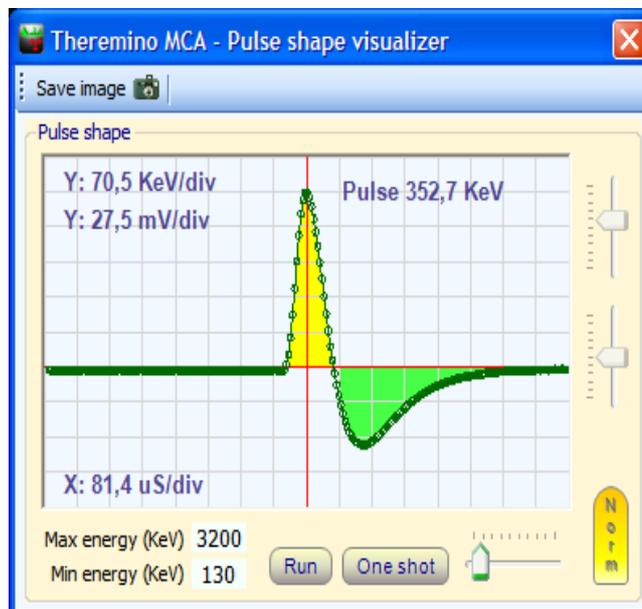
Per minimizzare gli spostamenti della linea di base anche con circuiti di ingresso accoppiati in alternata è bene usare "Impulsi bipolari"

Gli impulsi "bipolari" sono caratterizzati da una zona di segnale negativo che segue l'impulso principale positivo.

La prima parte (positiva) e la seconda parte (negativa) **devono avere la stessa area**.

Questo tipo di segnale si ottiene partendo da un segnale positivo "senza undershoot" e aggiungendo un filtro passa alto a 6dB per ottava con frequenza di taglio di circa 5 KHz.

Il filtro passa alto ha anche il benefico effetto di eliminare il rumore nella parte bassa dello spettro.



-----

**Come mai nel PmtAdapter** si è posta molta cura per produrre un segnale senza undershoot per poi degradarlo in questo modo?

**Perché solo partendo da un segnale "senza undershoot"** si riesce a produrre un impulso bipolare perfettamente bilanciato, con le aree positive e negative perfettamente uguali tra loro che eliminano gli sbandamenti della linea di base.

# Un metodo di Baseline Restoring

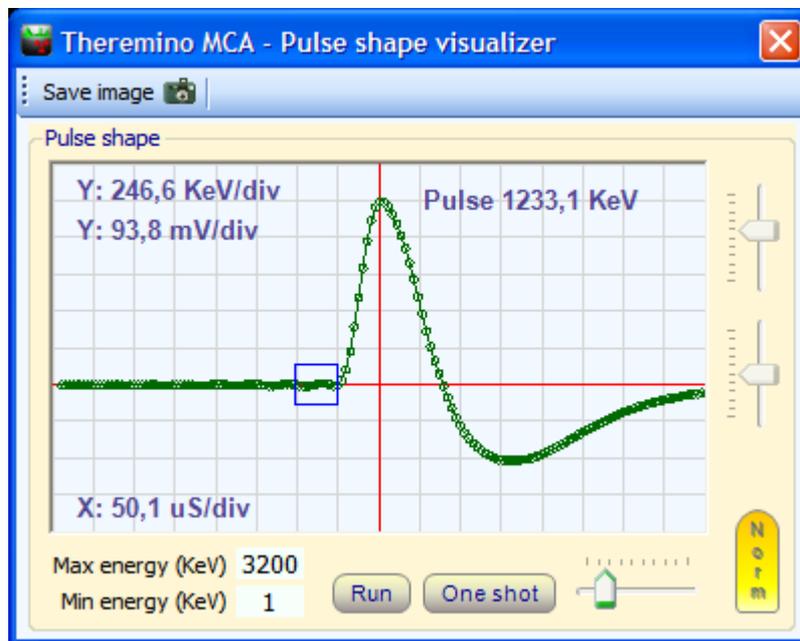
Dato che correggere la "linea di base" in hardware è difficile e molto costoso è bene che il software possa effettuare questa correzione.

Inoltre, anche i migliori filtri di segnale non producono una linea di base assolutamente stabile e una "correzione fine" è sempre utile.

Il punto migliore per misurare la tensione di zero della linea di base è la zona immediatamente prima dell'impulso.

ThereminoMCA fa la media di tutti i campioni per un certo numero di uS (definiti da "Size"), che precede il centro dell'impulso di un certo numero di uS (definiti da "Position")

La media di questi valori viene usata come "miglior stima" del livello di zero.



In questa immagine il rettangolo blu indica la zona dove viene effettuato il campionamento.

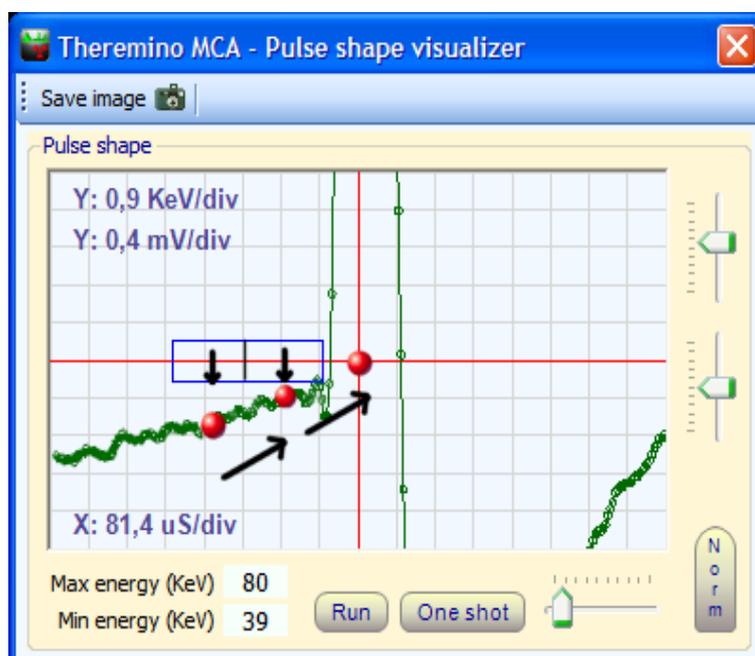
Tenendo conto che ogni quadretto vale circa 50uS si vede che il campionamento è stato impostato per un larghezza di 50uS e una distanza dal centro dell'impulso anch'essa di 50uS

## Il Baseline Test

Il metodo di integrare l'area immediatamente precedente all'impulso fornisce buoni risultati ma ha piccoli difetti, che possono essere migliorati.

Per migliorare la precisione del riconoscimento della tensione di "Baseline" si dovrebbe aumentare la dimensione dell'area di campionamento, così da fare una buona media dei disturbi e dei "ringing" ma, purtroppo, allargando l'area il suo centro si allontana dall'impulso e questo causa imprecisioni quando la linea di base non è orizzontale.

Per poter aumentare le dimensioni dell'area di campionamento la si divide in due aree separate e si misurano due medie separate. I due valori misurati permettono di calcolare la pendenza della linea di base e di correggere con precisione la posizione dello zero dell'impulso.



*Le due medie (pallini rossi a sinistra) permettono di calcolare la posizione dello zero nel centro dell'impulso (terzo pallino rosso)*

Il nuovo "Baseline Test" implementato nella versione 4 del ThereminoMCA, è un netto miglioramento rispetto al Baseline Restoring della versione 3 e permette anche di eliminare gli impulsi troppo deformati con le regolazioni "Max slope" e "Max noise"

# Gli impulsi sovrapposti ( PileUP )

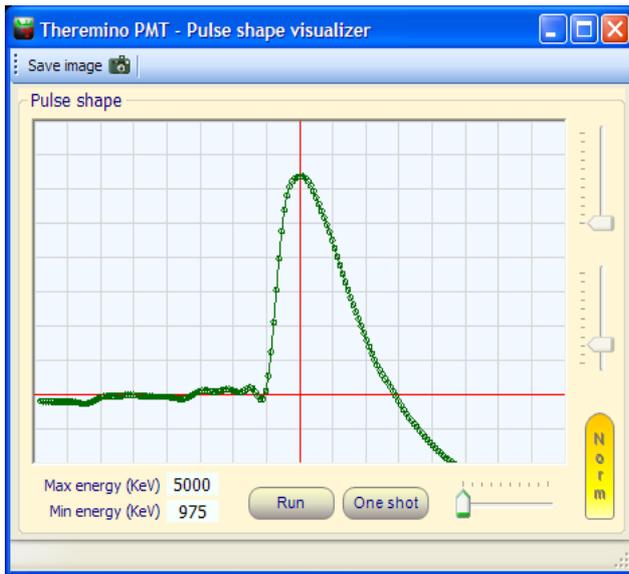


Immagine 1 - Impulso senza "PileUp"

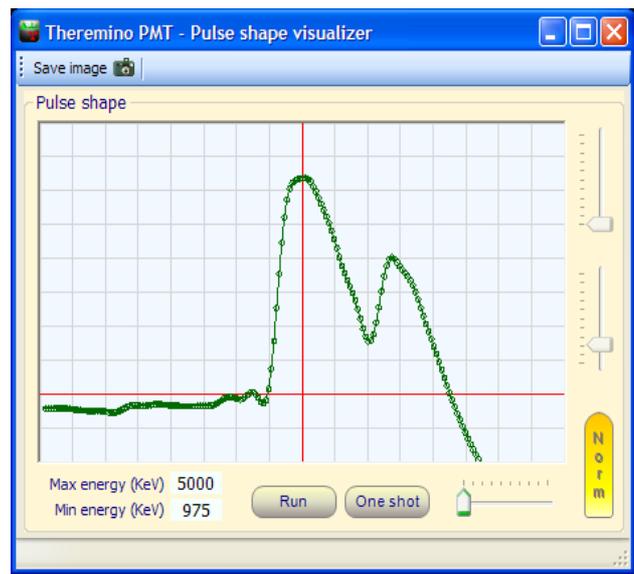


Immagine 2 - Impulsi con "PileUp"

Ecco un bell'esempio di "PileUP" il secondo impulso arriva quando il primo non è ancora finito.

Il secondo impulso si appoggia sul primo, risulta più alto di quanto dovrebbe, e finisce in un bin sbagliato.

Dato che la posizione relativa dei due impulsi è casuale anche il bin di destinazione lo è, con il risultato di alzare il tappeto di rumore in modo uniforme. Se i PileUp sono molto frequenti il rumore si alza al punto da mascherare le righe utili.

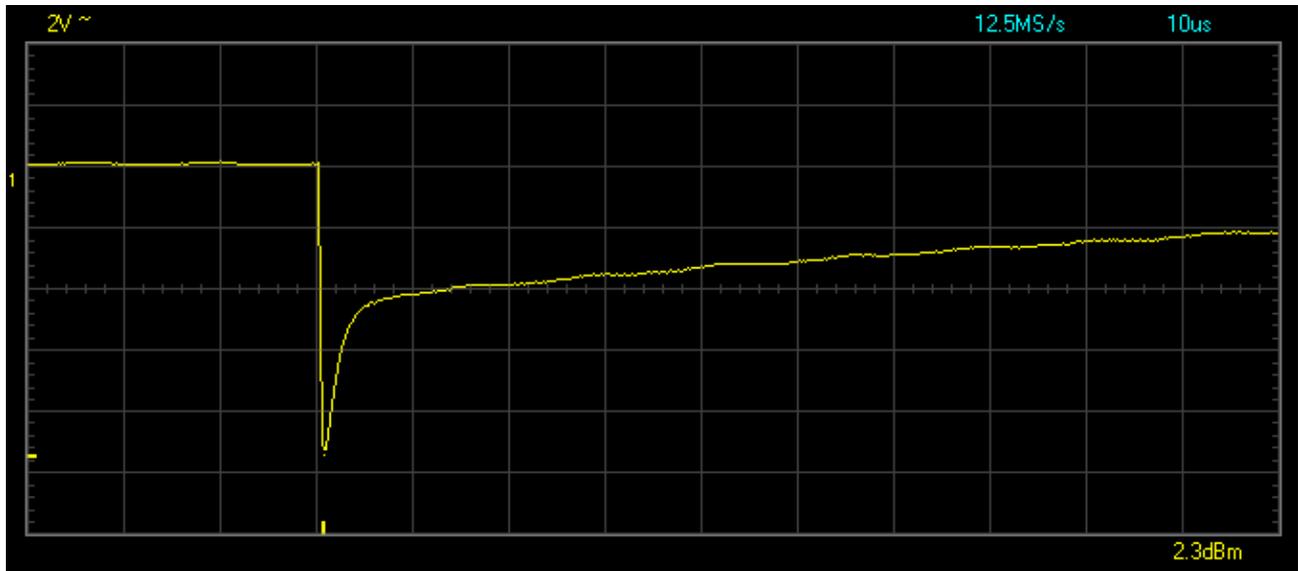
-----

Sia il metodo del riconoscimento della forma degli impulsi "Shape Recognition" (usato dal PRA), sia il metodo "comportamentale" (usato da ThereminoMCA) riescono a eliminare i difetti causati dal PileUp però come già visto nelle pagine precedenti, anche in questo caso, il metodo comportamentale è migliore, ecco il comportamento dei due metodi:

- La "Shape Recognition" riconosce che la forma è sbagliata e scarta ambedue gli impulsi.
- Il ThereminoMCA tratta correttamente il primo impulso e scarta solo il secondo.

# La larghezza degli impulsi

Gli impulsi in arrivo dal tubo PMT sono rettangolari e molto stretti (meno di un  $\mu\text{s}$ ) ma basta una minimo di capacità (ad esempio 50 centimetri di cavo schermato) per allungarli a circa 3  $\mu\text{s}$ .



Qui si vede un impulso misurato appena dopo il condensatore di disaccoppiamento dell'alta tensione. La tensione sul tubo è 900 Volt e il fotone che lo ha generato era da circa 1 MeV. Qui non si vede molto bene ma la punta è alta quasi 10 Volt ed è larga circa 3 $\mu\text{s}$ .

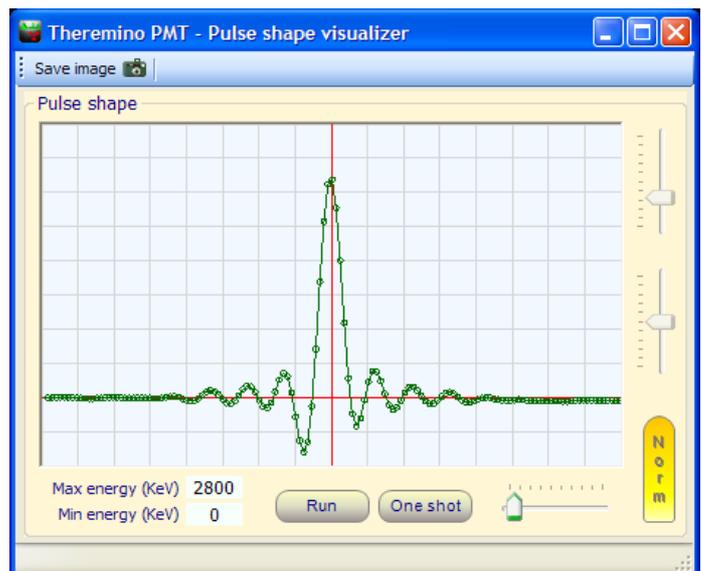
Questo impulso contiene il massimo della sua energia intorno ai 300 KHz che sono più di dieci volte la banda passante delle schede audio (sempre 20 KHz anche con campionamenti di 192 KHz)

Se inviamo un impulso simile direttamente alla scheda audio, verrà quasi del tutto eliminato dal filtro di ingresso e il rapporto segnale rumore diminuirà moltissimo.

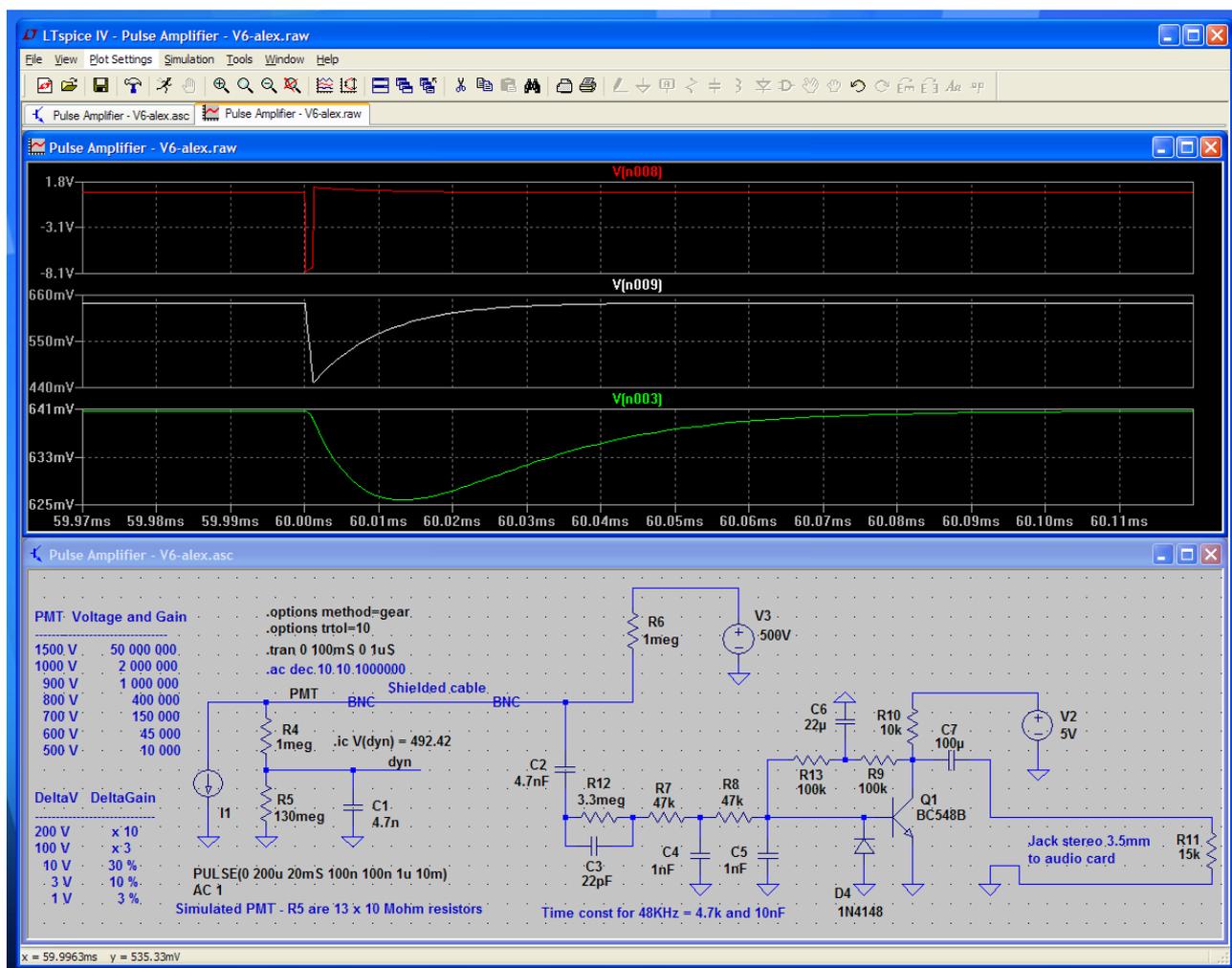
Un secondo effetto di un impulso così rapido è la produzione di un notevole "ringing" nel filtro "antialiasing" della scheda audio. Questa immagine mostra un ringing da quasi il 25% dell'altezza dell'impulso.

I filtri delle schede audio sono adeguati ai normali segnali audio che non contengono mai componenti a frequenze superiori ai 20 o 30 KHz e sono alti circa 1 Volt, ma vanno in palla quando gli spari addosso 10 Volt a 300KHz.

Un altro difetto dagli impulsi stretti è di avere la punta a spillo, per cui se il campionamento non capita esattamente in punta, il valore misurato cambia di molto, con conseguente allargamento delle righe.



# I filtri hardware di condizionamento del segnale



*Lo schema di questa immagine e' solo un esempio e non corrisponde al PmtAdapter delle ultime versioni, per gli schemi definitivi, leggere la documentazione del PmtAdapter.*

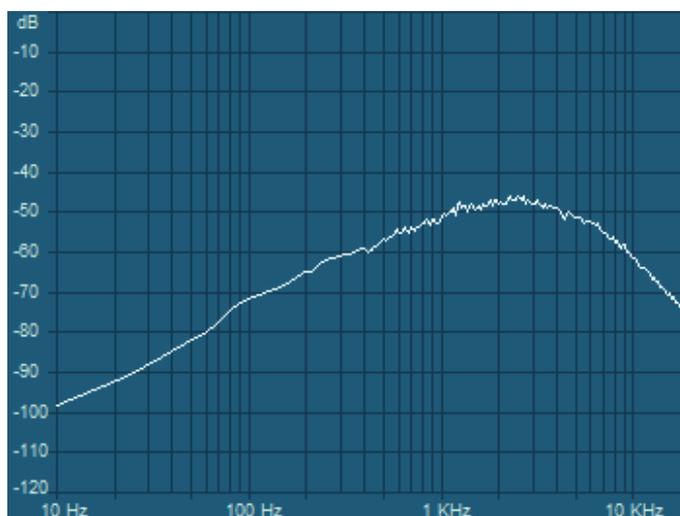
Questa simulazione mostra come la prima cella del filtro allarghi il segnale senza arrotondare la sua punta.

Solo con due celle passa basso consecutive si ottiene la punta arrotondata, cioè quello che viene spesso chiamato "impulso gaussiano" per la sua somiglianza con la ben nota curva "gaussiana" molto usata in statistica.

## La banda passante

Visto in termini di banda passante il risultato di tutti i filtri e' il seguente:

- Massimo guadagno intorno ai 3 KHz
- Attenuazione di 18 dB/ottava oltre i 6 KHz in modo che elimina i disturbi ad alta frequenza, rallenta il fronte di salita e quindi riduce al minimo il "ringing" generato dalla scheda audio.
- Attenuazione di 6dB per ottava sotto i 3 KHz che elimina i disturbi a bassa frequenza e abbatte (di ben 35 dB !) l'eventuale ronzio a frequenza di rete.



*Questa immagine rappresenta l'energia degli impulsi alle varie frequenze ed è stata prodotta con un campione di cesio per avere impulsi al secondo (oltre 600) e con il DAA impostato per integrare nel tempo il grafico di risposta in frequenza (parametro "speed" quasi al minimo)*

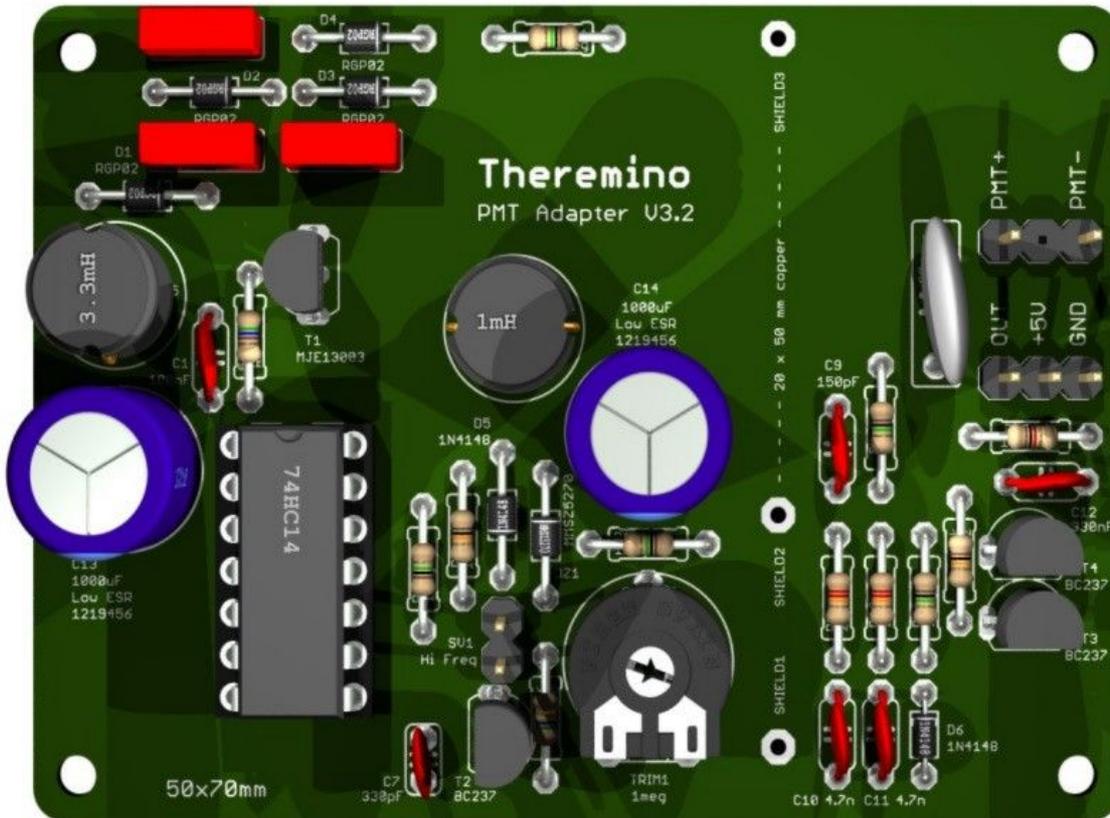
## Il rumore causato dall'alimentatore

Il tubo foto-moltiplicatore ha un consumo molto basso e costante, basta alimentarlo attraverso due celle da 1 MegaOhm + condensatore da 47 nF e tutto il rumore sparisce.

Se non sparisce allora passa attraverso l'aria per la piccola capacità che c'è tra i componenti dell'alimentatore e quelli del circuito del segnale audio, in questo caso si devono separare le due parti con schermi metallici in alluminio o rame.

Se ancora il rumore dell'alimentatore non va via può essere dovuto a un "loop di massa" cioè troppe masse e disposte male. In questi casi può anche aiutare molto aggiungere un grosso elettrolitico (1000 uF - low ESR) tra i cinque Volt positivi e massa.

## Il Theremino\_PmtAdapter



Questo alimentatore (e condizionatore del segnale), risolve tutti i problemi delle pagine precedenti, non ha ringing e produce un segnale con rumore bassissimo.

A differenza di molti alimentatori commerciali, non stabilizzati, che richiedono dieci minuti di preriscaldamento, il Theremino PmtAdapter contiene un circuito di retroazione, che mantiene la tensione stabile, anche in presenza di forti variazioni della temperatura. In questo modo la taratura rimane precisa nel tempo e le righe degli isotopi non si spostano e non si allargano.