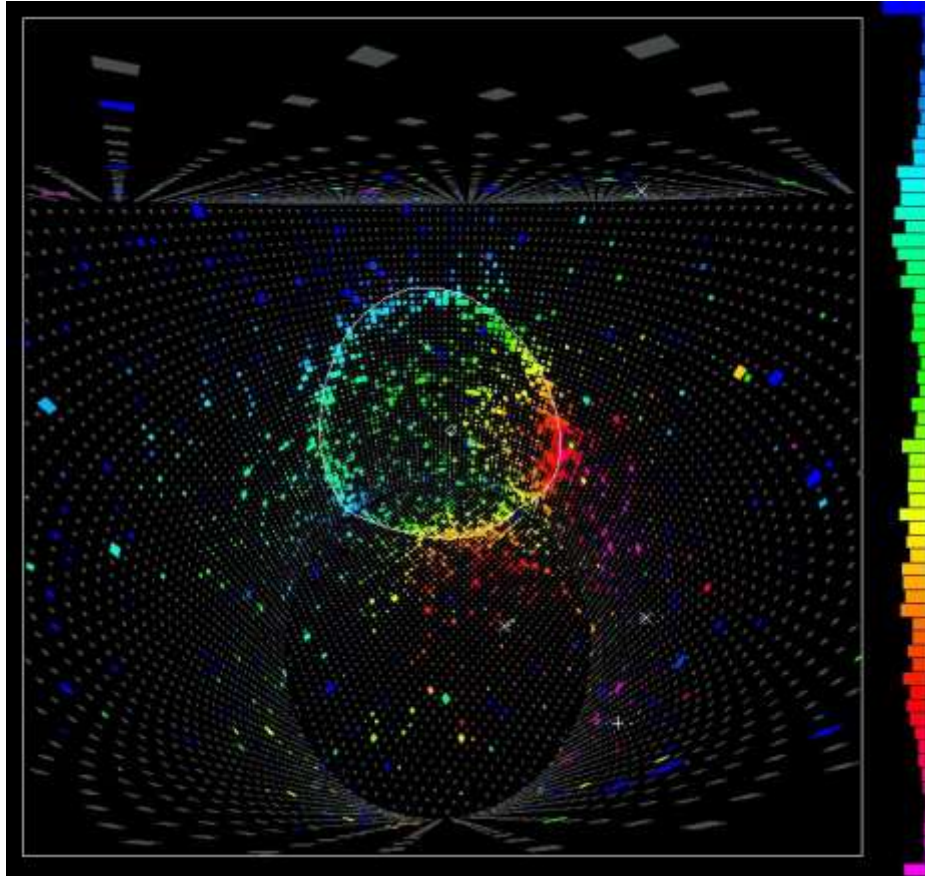

Cherenkov Detector

Rilevatore Cherenkov per Raggi Cosmici

Lodovico Lappetito

Sommario

Introduzione sull'Effetto Cherenkov	4
Super - Kamiokande.....	6
Realizzazione del Detector	7
Impulsi di Luce Cherenkov.....	9
Decadimento del Muone.....	11
Impulsi in Coincidenza	13



Nella immagine si vede la traccia di un cono di luce Cherenkov prodotta nell'esperimento giapponese **Kamiokande** basato su 50000t di acqua tenute "osservate" da 11000 tubi fotomoltiplicatori. L'interazione di un neutrino con gli elettroni o i nuclei dell'acqua può produrre una particella carica che si **muove più veloce della luce nell'acqua** (ma ovviamente, più lentamente della luce nel vuoto). Questo fatto genera un lampo di luce dovuto alla **radiazione Cherenkov**, che è l'equivalente ottico del boom sonico. Questo lampo genera tracce distintive di luce che vengono registrate e forniscono informazioni sulla direzione ed il tipo del neutrino incidente.

In questo documento proponiamo la costruzione di un rivelatore Cherenkov DIY per la rilevazione di particelle cosmiche, principalmente muoni.

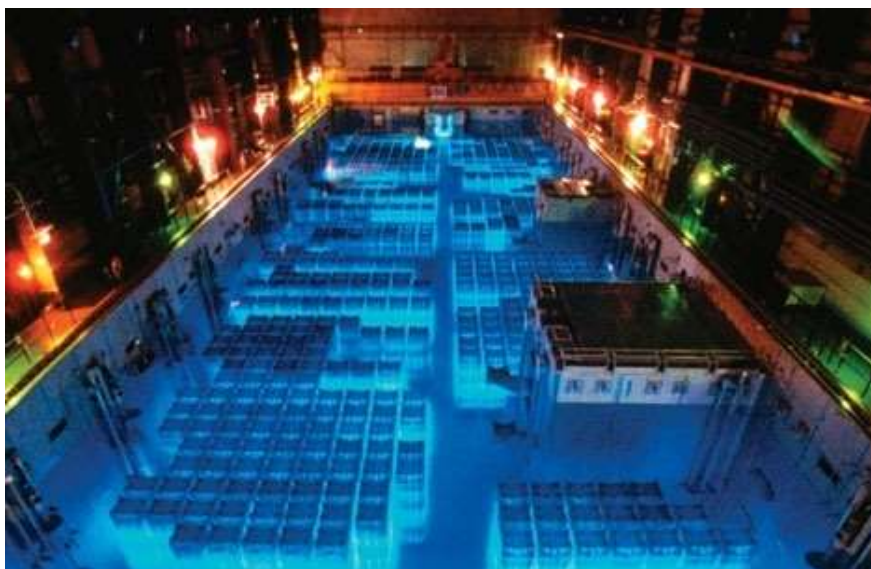
Introduzione sull'Effetto Cherenkov

L'**effetto Cherenkov** consiste nell'emissione di radiazione elettromagnetica da parte di un materiale le cui molecole sono polarizzate, quando una particella carica in moto lo attraversa. L'effetto Cherenkov si manifesta solo quando la **velocità della particella nel mezzo attraversato risulta superiore alla velocità della luce nello stesso mezzo**.

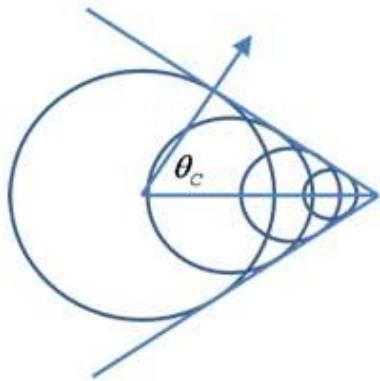
Per la teoria della relatività, nessuna particella può viaggiare a una velocità superiore a quella della luce nel vuoto (299 792,458 km/s). In un mezzo denso però, la velocità di propagazione della luce risulta più bassa di quella di propagazione nel vuoto, e in un mezzo con indice di rifrazione n sarà c/n . Può quindi avvenire che una particella superi la velocità di propagazione della luce nel mezzo (pur tuttavia rimanendo al di sotto di c). **Se tale particella è carica elettricamente si verifica l'effetto Cherenkov, ovvero l'emissione di radiazioni elettromagnetiche.**

Se la velocità della particella è sufficientemente elevata rispetto al tempo di risposta del mezzo (e ciò si verifica quando la velocità della particella nel mezzo attraversato risulta superiore alla velocità della luce nello stesso mezzo) allora l'energia prodotta da questa perturbazione si **irradia come un'onda d'urto coerente**. Come nell'aria, quando un oggetto supera il muro del suono, si forma un cono d'onda (onde meccaniche), allo stesso modo, con le onde elettromagnetiche, nelle condizioni sopra enunciate, si assiste alla produzione di un **cono d'onda del tutto simile al cono di Mach per il suono**.

La luce Cherenkov si osserva anche all'interno delle piscine di contenimento nei reattori nucleari ed è causata dalla luce Cherenkov emessa dalle radiazioni beta che si propagano all'interno dell'acqua.

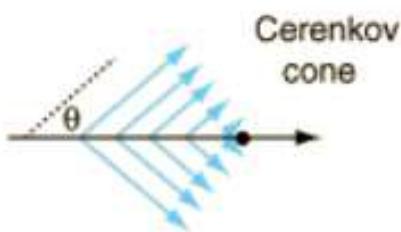


Caratteristico della radiazione Cherenkov è il cosiddetto angolo di Cherenkov, indicato in figura con la lettera ϑ , e può essere calcolato mediante la relazione indicata in figura, dove n è l'indice di rifrazione del mezzo e β è il rapporto tra la velocità della particella e la velocità della luce nel vuoto $\beta = v/c$.



$$\theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{1}{\beta n} \right)$$

Si può notare che l'angolo massimo si ha quando la particella si muove all'incirca alla velocità c . Nel caso dell'acqua, dove $n = 1,33$, l'angolo massimo vale $41,2^\circ$. Sempre dalla stessa relazione si ricava anche la velocità (energia) minima affinché si manifesti l'emissione Cherenkov, per un elettrone l'energia minima vale **0,26MeV**, per un muone invece l'energia minima per produrre emissione Cherenkov vale **160MeV**. Nello schema riportato sotto viene illustrato questo calcolo nel caso di un elettrone.



$$\cos \theta = \frac{c}{v n}$$

v = particle velocity
 n = index of refraction of the medium

For water with $n=1.33$, the limiting angle for high speed particles is given by:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{1}{1.33} = 41.2^\circ$$

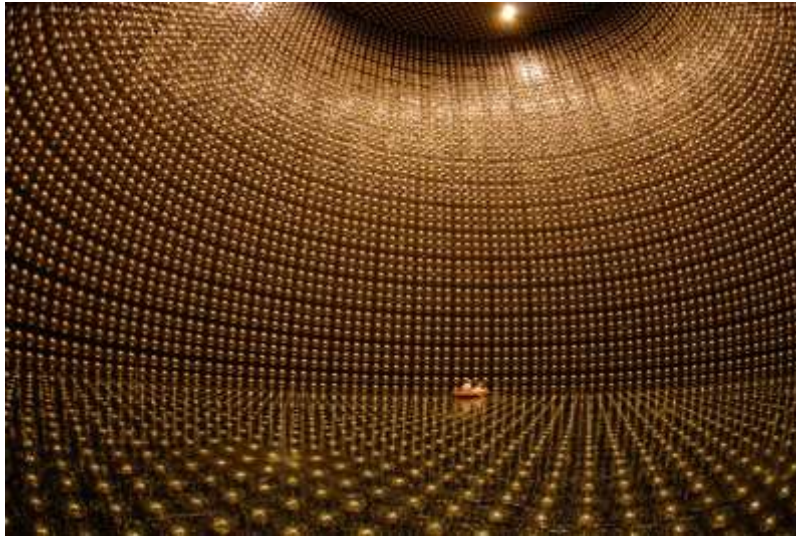
The threshold particle speed for Cherenkov radiation is $v = c/n$, which for an electron in water gives a threshold particle kinetic energy of 0.26 MeV.

$$\beta = 0.752, E_{\text{electron}} = \gamma m_e c^2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} m_e c^2 = (1.52)(0.511 \text{ MeV}) = .775 \text{ MeV}$$

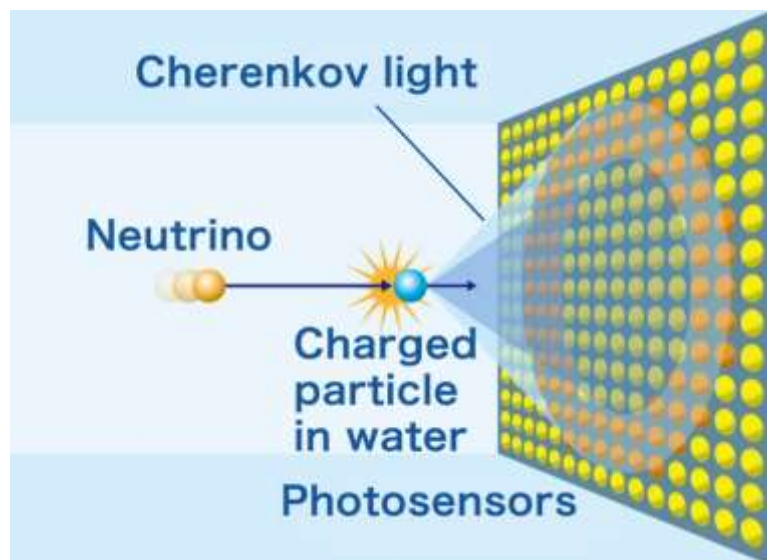
$$\text{Kinetic energy} = 0.775 \text{ MeV} - 0.511 \text{ MeV} = 0.26 \text{ MeV}$$

Super - Kamiokande

Il **Super-Kamiokande**, abbreviato in Super-K, è un osservatorio di neutrini situato in Giappone, nella miniera di Kamioka (l'attuale nome dalla città è Hida). Venne costruito per studiare i neutrini solari, i neutrini atmosferici, il decadimento dei protoni, e rilevare i neutrini provenienti da qualsiasi supernova della nostra galassia. Il Super-K fornì la prima prova dell'oscillazione dei neutrini nel 1998. **Il Super-K consiste di un ammasso di 50.000 tonnellate di acqua ultra-pura, circondato da 11.146 tubi fotomoltiplicatori. La struttura cilindrica misura 41,4 m di altezza e 39,3 m di diametro.**



L'interazione di un neutrino con gli elettroni o i nuclei dell'acqua può produrre una particella carica che si muove più veloce della luce nell'acqua (ma ovviamente, più lentamente della luce nel vuoto). **Questo fatto genera un cono di luce dovuto alla radiazione Cherenkov**, che è l'equivalente ottico del boom sonico. Questo lampo genera tracce distintive di luce che vengono registrate e forniscono informazioni sulla direzione e il sapore del neutrino incidente.



Realizzazione del Detector

Per la realizzazione del detector abbiamo scelto un fotomoltiplicatore molto utilizzato nei rivelatori a scintillazione, il modello R6233 della Hamamatsu, caratterizzato da un ampio fotocatodo di 70mm, in grado quindi di coprire una area piuttosto estesa.



Specifiche del PMT R6233

Type : Head-On

Size : 76mm

Photocathode : Bialkali

Max Voltage : 1500V

Peak Sensitivity Wavelength : 420nm

Rise Time : 9,5ns

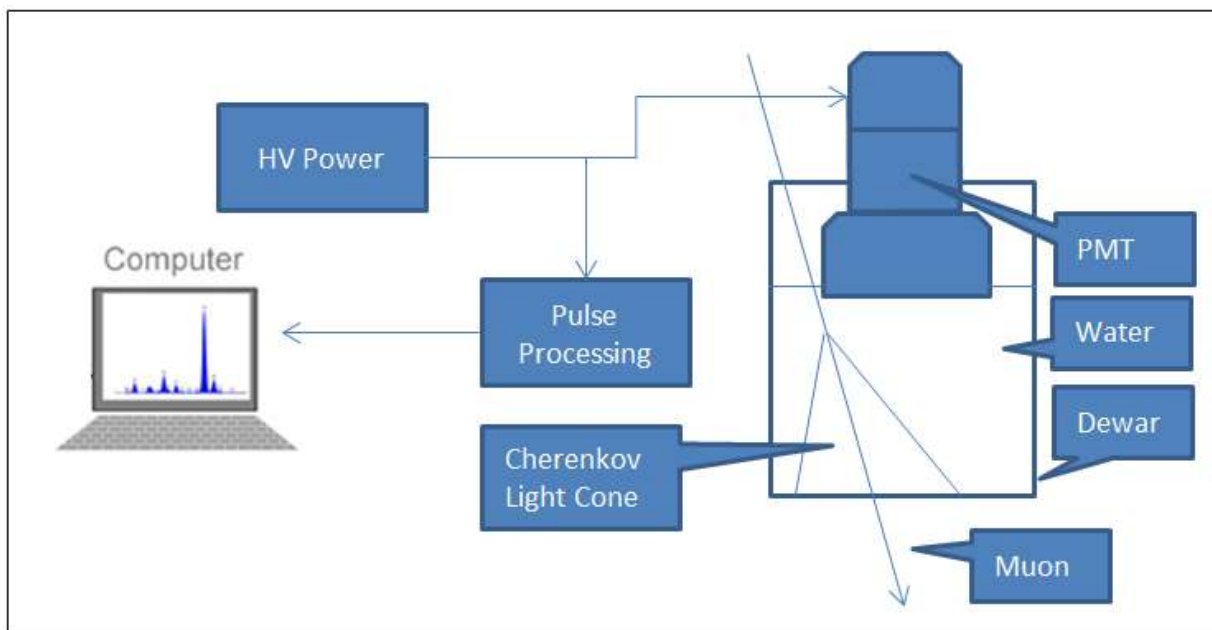
Gain : 270000

Per il contenitore dell'acqua è stato utilizzato un vaso di Dewar ricavato da un thermos per alimenti. Il vaso di Dewar è fatto in vetro ed è argentato a specchio, in questo modo la radiazione Cherenkov che viene prodotta verso il basso viene riflessa verso l'alto dalle pareti del Dewar e raggiunge, almeno in parte il fotocatodo del PMT.

Nelle immagini riportate sotto viene mostrato il vaso di Dewar ed il detector completo di PMT :



Per ridurre le riflessioni interne il PMT è stato collocato in modo che il fotocatodo sia immerso all'interno dell'acqua. L'acqua deve essere distillata e purificata in modo che l'assorbimento interno al liquido sia ridotto al minimo.



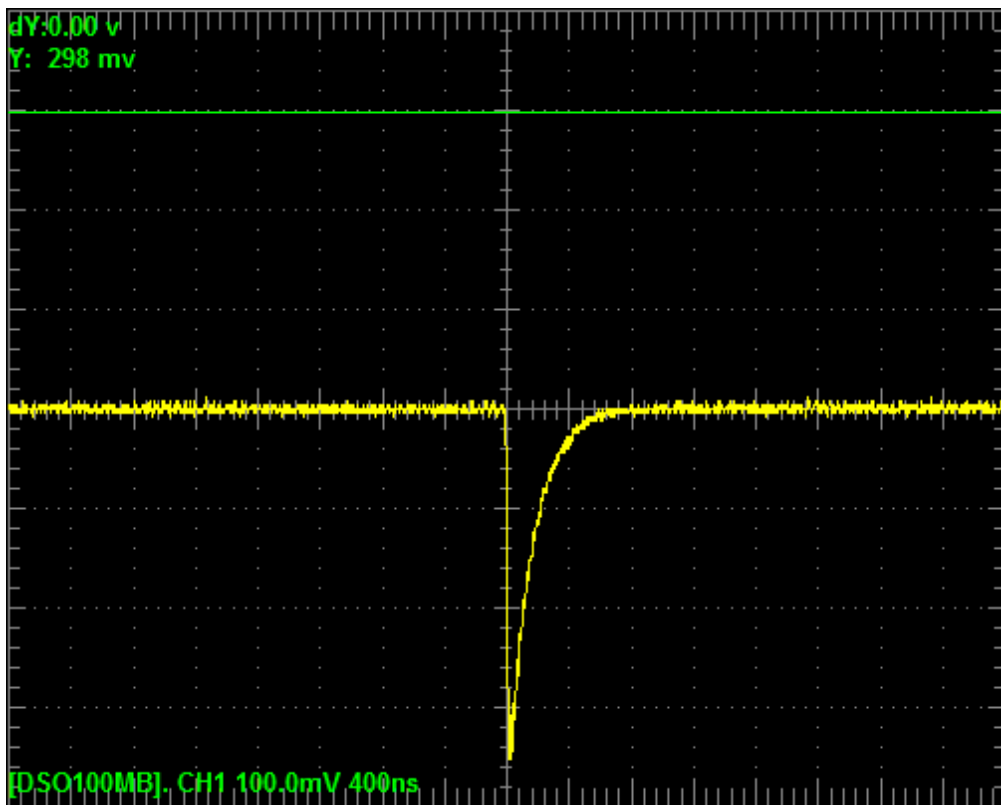
Per evitare che il PMT venga raggiunto dalla luce ambientale, il detector è stato inserito all'interno di un contenitore a prova di luce, provvisto di connettore BNC per il collegamento della alta tensione. Il segnale viene prelevato da uno "splitter a T", provvisto di condensatore di disaccoppiamento. La figura sotto mostra il setup completo.

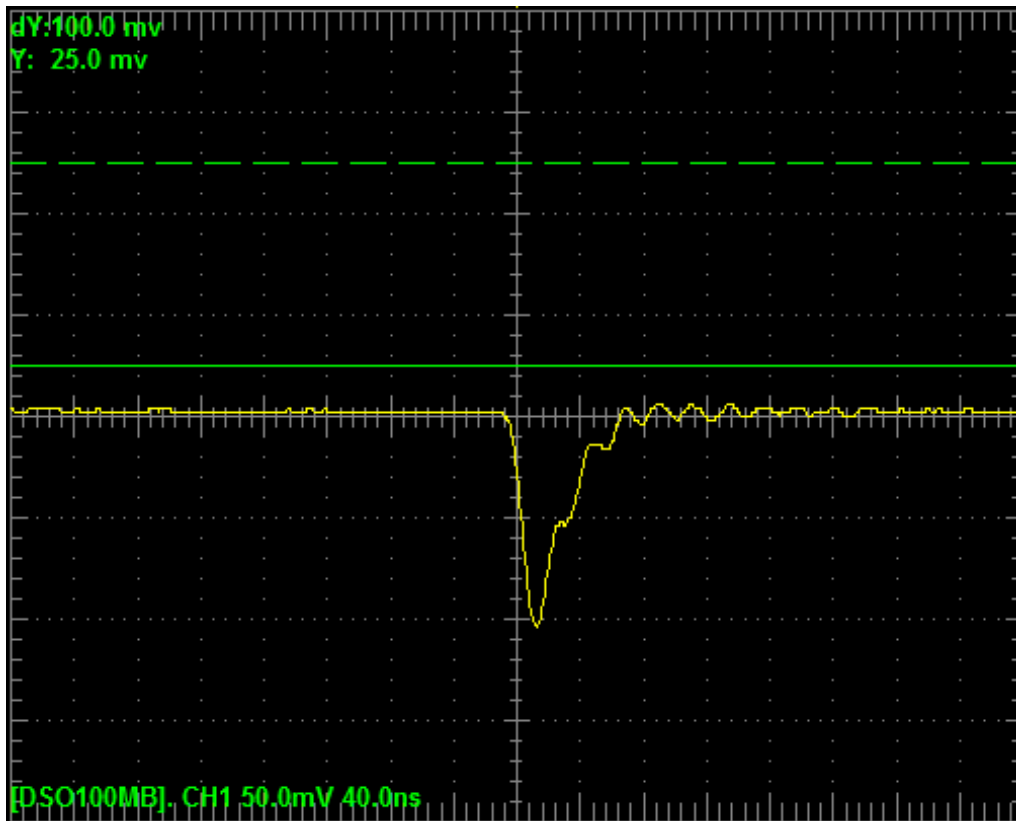


Impulsi di Luce Cherenkov

Utilizzando il setup descritto sopra abbiamo acquisito dal PMT i segnali impulsivi prodotti dalla radiazione Cherenkov. Il PMT è stato polarizzato ad una tensione compresa tra 1000V e 1400V. Come resistenza di carico in uscita dallo splitter abbiamo utilizzato i valori di 1 k Ω e 50 Ω . Il valore maggiore permette di avere un segnale di ampiezza abbastanza elevata ma con durata di quasi 1 μ s, mentre con la resistenza da 50 Ω la durata dell'impulso è molto breve, circa **20ns**, mentre l'ampiezza vale circa **50mv**. In entrambi i casi i segnali che si ottengono sono **ben distinti dal rumore termico del PMT** che si colloca su ampiezze decisamente inferiori. Questo permette di effettuare misure di conteggio abbastanza realistiche.

Nella prima immagine si vede l'impulso con carico da 1 k Ω , mentre nella seconda con carico da 50 Ω .





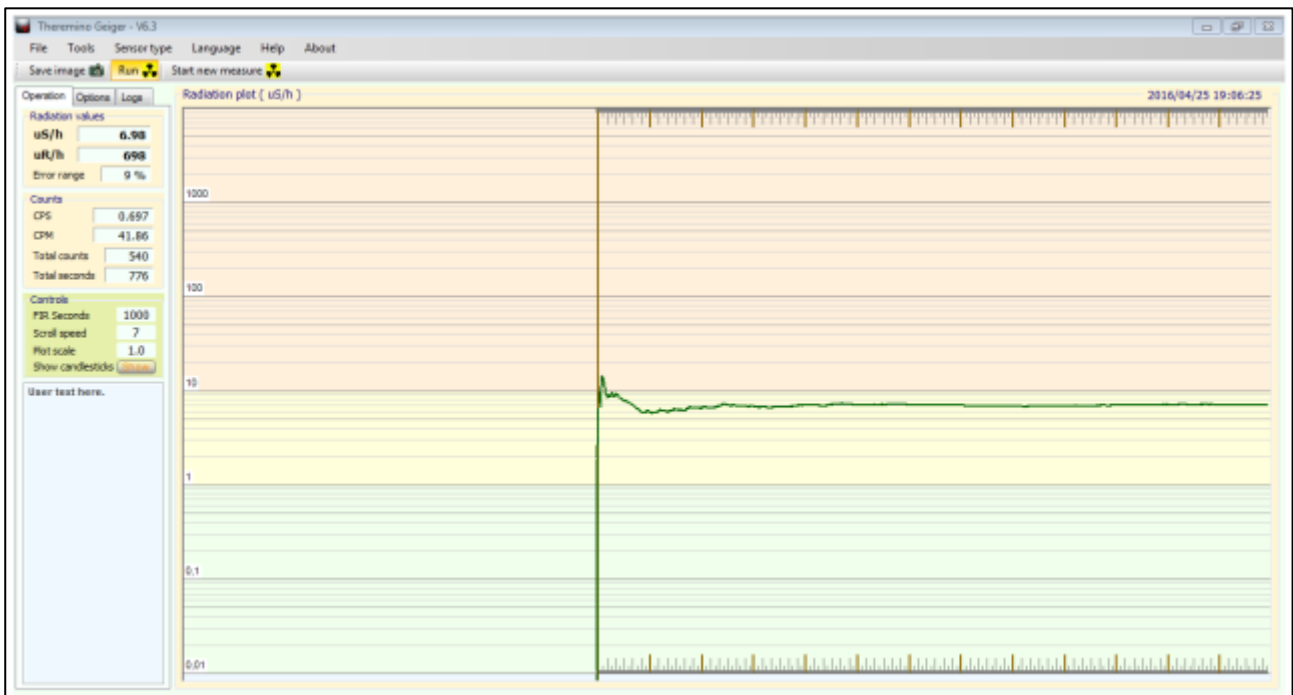
Inviando il segnale prodotto dal PMT ad un apparecchio di processamento impulsi e settando opportunamente la soglia del discriminatore in modo da escludere gli impulsi prodotti dal rumore termico del PMT si ottiene un valore di conteggio di circa **40CPM** che, considerata la superficie / volume occupata dall'acqua e la geometria del PMT, ci sembra consistente con il valore atteso del **flusso muonico**. Nella immagine sotto viene presentato il risultato del conteggio fatto con il software Thermano Geiger per un **tempo di 10 min : 40 CPM**.





Abbiamo poi provato a schermare il rilevatore con uno schermo di circa **2cm di piombo**, con lo scopo di verificare se il conteggio subisce delle variazioni. L'immagine a lato presenta il setup della misura con lo schermo.

Il risultato del conteggio è di circa **42CPM**, leggermente superiore alla configurazione priva di schermo. Questo è in linea con il risultato atteso dovuto al contributo delle particelle secondarie generate all'interno dello schermo di piombo dall'interazione della componente molle dei raggi cosmici (**cascata elettromagnetica**); mentre la componente dura non viene schermata dal piombo.

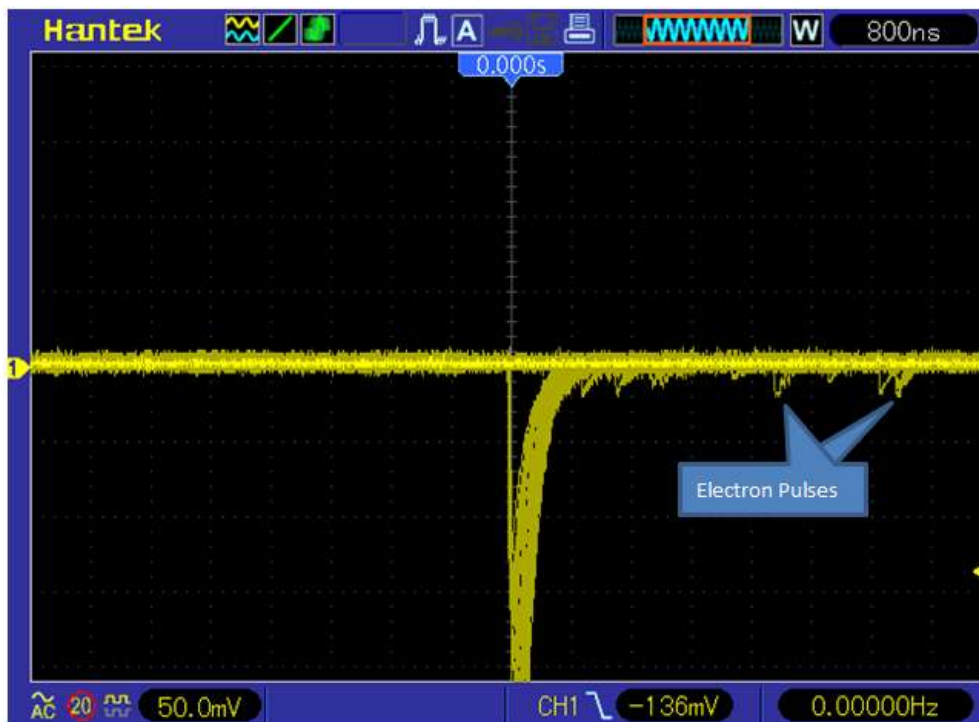
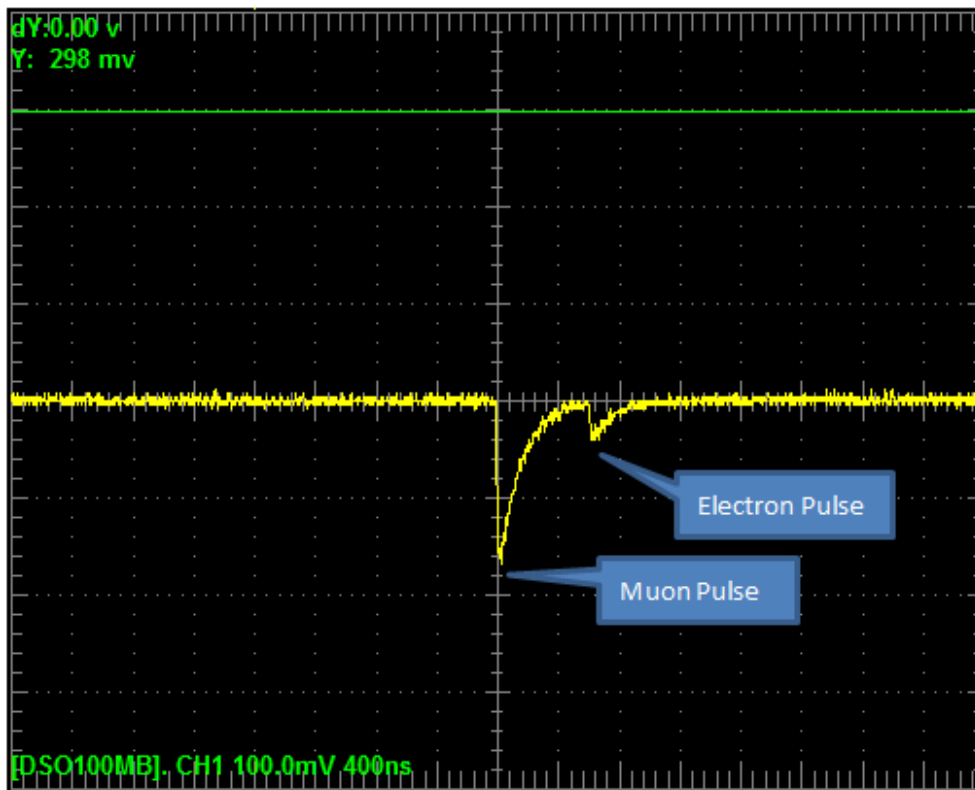


Decadimento del Muone

Come visto nei paragrafi precedenti, il rilevatore Cherenkov registra i passaggi dei **muoni cosmici** attraverso l'acqua del rilevatore. Il **muone è una particella instabile** e decade naturalmente in un elettrone ed una coppia di neutrini, con una vita media di circa **2,2µs**. Il decadimento del muone è un evento che può essere registrato nel nostro rilevatore Cherenkov DIY. Quando il muone, interagendo con l'acqua del

rilevatore viene rallentato fino quasi a fermarsi, può andare incontro a decadimento mentre è ancora all'interno del rivelatore. In questo caso l'elettrone che viene prodotto può, a sua volta dare luogo ad un lampo Cherenkov, immediatamente dopo l'impulso prodotto dal muone.

Nelle figure sotto vengono mostrate le tracce dei decadimenti muonici registrate nel nostro rivelatore DIY.



Impulsi in Coincidenza



Utilizzando il detector Cherenkov e lo scintillatore plastico è stato realizzato un setup per la rilevazione di impulsi in coincidenza.

Questi impulsi vengono prodotti dai muoni cosmici che attraversano entrambi i detector che sono posti in verticale, uno al di sopra dell'altro. L'immagine a lato mostra il posizionamento dei due detector.

I due detector sono posti alla distanza di circa 1m, con questa geometria il numero degli eventi in coincidenza è piuttosto basso : **minore di 1CPM**, questo è naturale perché il posizionamento dei due detector a questa distanza riduce notevolmente l'angolo solido di rilevazione.

Considerando che i muoni possono avere una velocità compresa tra c e $2/3c(2 \times 10^8 \text{ m/s} - 3 \times 10^8 \text{ m/s})$, il **tempo impiegato dai muoni per coprire la distanza di 1m dovrebbe quindi essere compreso tra 3ns e 5ns**.

Nelle immagini che riportiamo sotto vengono visualizzati alcuni esempi di impulsi di coincidenza, nei quali si vede che l'ordine di grandezza dello sfasamento temporale dei due impulsi è in accordo con quanto previsto.

