



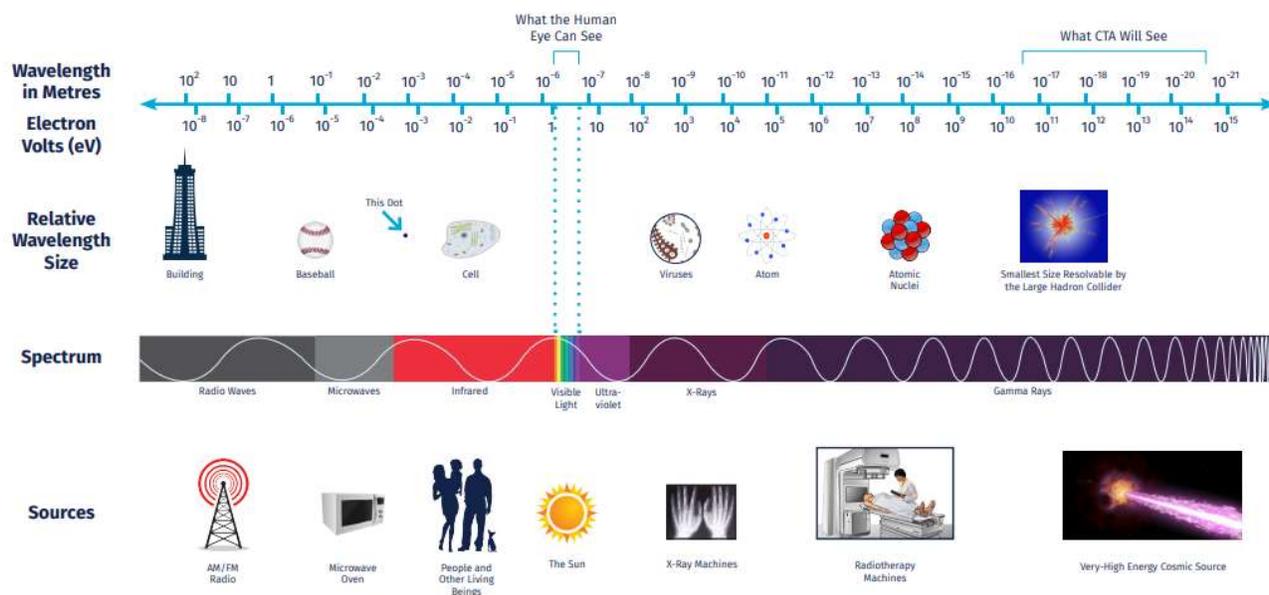
Let's look the muons !!!

***Come costruire un telescopio per
raggi cosmici.***

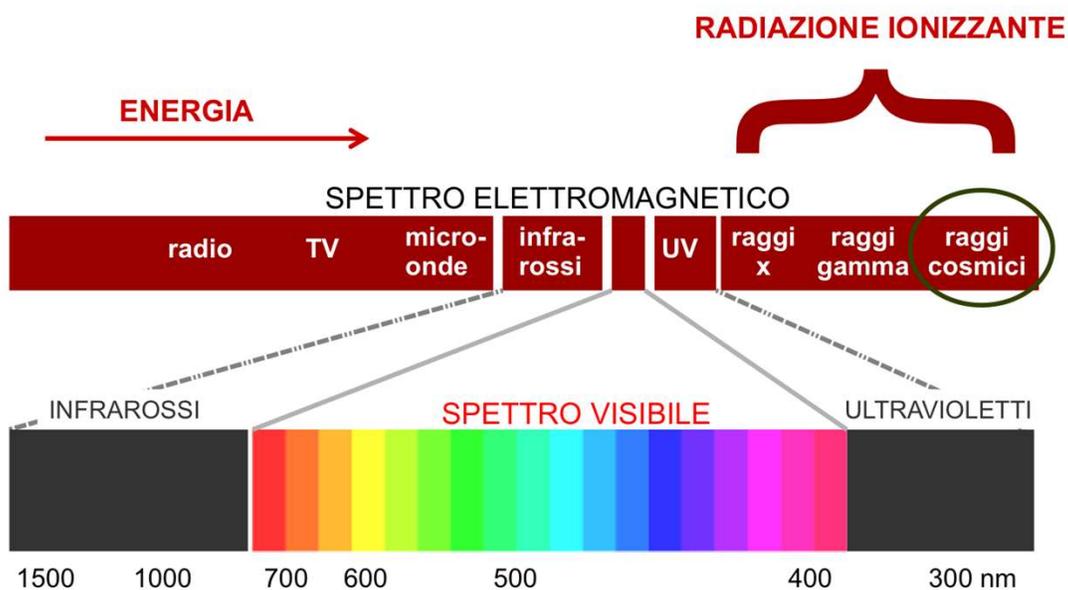
P.I.D. - LNGS, 17-22 Ottobre 2022

Attanasio Candela - LNGS
candela@lngs.infn.it

LA RADIAZIONE COSMICA: UN ECCELLENTE LABORATORIO DIDATTICO



Lo Spettro Elettromagnetico



*Gli ingredienti per
costruire un telescopio
per raggi cosmici*



I RIVELATORI DI PARTICELLE



Il più antico rivelatore di particelle è l'occhio umano

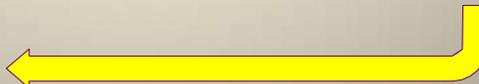
- ✓ Noi vediamo un oggetto perché viene colpito da fotoni (particelle elementari di cui è costituita la luce) che poi rimbalzano e vengono rivelati dal nostro occhio.
- ✓ Come tutti i sensori biologici, l'occhio non risponde in modo proporzionale allo stimolo, ma al logaritmo dello stimolo, in questo modo risulta molto efficiente nel rilevare la luce emessa da sorgenti con luminosità molto diverse (9-10 ordini di grandezza!!!)
- ✓ In linea di principio però l'occhio la luce la misura piuttosto male. L'efficienza quantica dell'occhio è almeno un ordine di grandezza inferiore a quella dei moderni rivelatori elettronici (ma in compenso ha un intervallo di funzionamento decisamente più ampio!)

sorgente



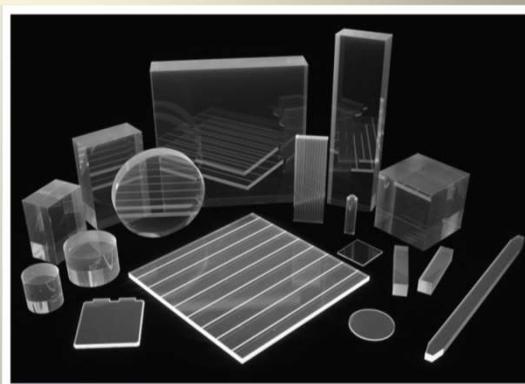
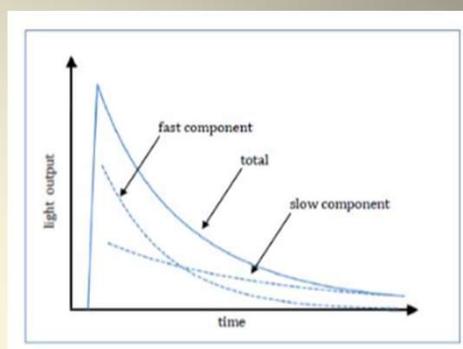
oggetto

occhio



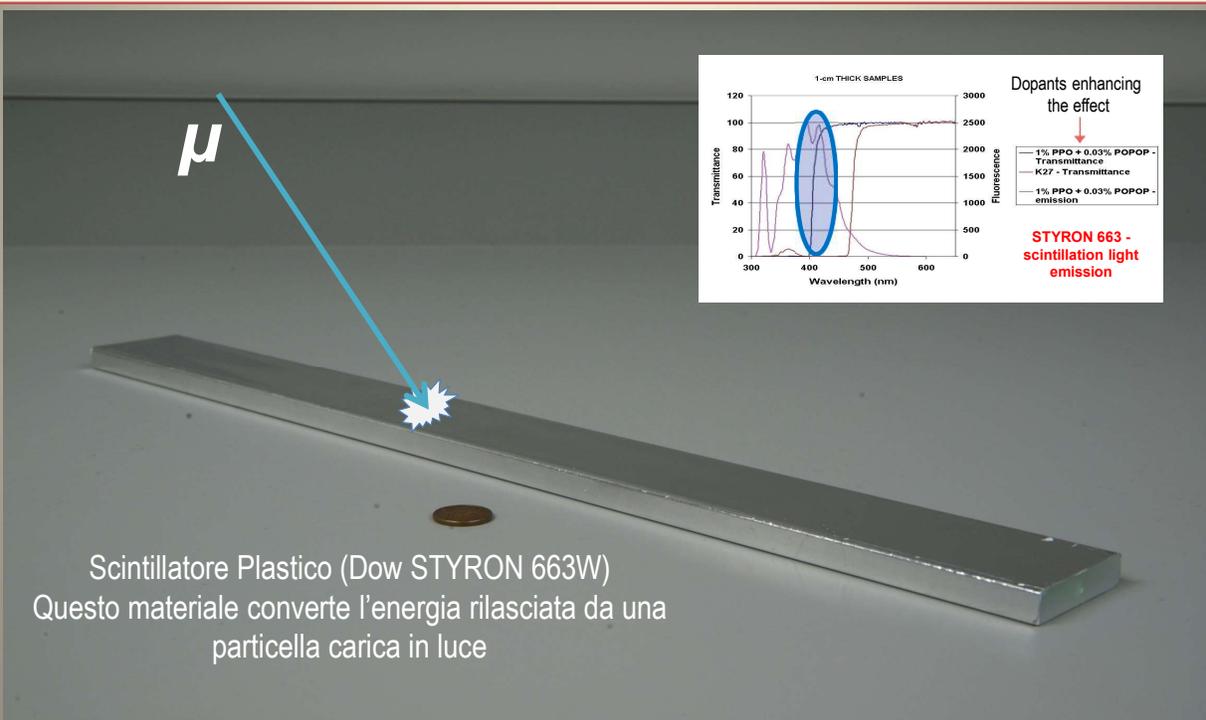
UN PARTICOLARE RIVELATORE CHE CONSENTE DI OSSERVARE I MUONI: **GLI SCINTILLATORI**

- ❑ Gli scintillatori costituiscono un'importante classe di rivelatori usati nella fisica delle particelle. Alla base del loro funzionamento vi è il fenomeno della **luminescenza**. I materiali luminescenti, se esposti a certe forme di energia (luce, radiazione), hanno la capacità di assorbire e rimettere energia sotto forma di luce visibile.
- ❑ Una particella carica incidente cede parte della propria energia allo scintillatore, causando l'eccitazione di un elettrone che si sposta in un livello superiore di energia. Quando l'elettrone decade al livello che occupava prima dell'eccitazione emette un "fotone" di energia relativamente bassa, tipicamente nel visibile.
- ❑ Quasi tutti gli scintillatori hanno 2 componenti di ri-emissione, una componente veloce e una lenta, entrambe hanno un andamento di tipo esponenziale.
- ❑ A seguito della interazione di una particella con lo scintillatore si ha una emissione di luce che dura circa 10^{-8} - 10^{-9} s (1-10 ns): tale processo è chiamato **fluorescenza**; c'è poi anche una emissione di luce che dura più di 100 ms e di lunghezza d'onda maggiore rispetto alla fluorescenza; questo processo si chiama **fosforescenza (o afterglow)**.
- ❑ Non tutti i materiali scintillanti possono essere utilizzati come rivelatori. Infatti, uno scintillatore di buona qualità, deve soddisfare alle seguenti caratteristiche:
 - **alta efficienza di conversione dell'energia persa dalla particella ionizzante in fotoni di scintillazione (light yield);**
 - **una costante di decadimento τ molto breve, ovvero elevata rapidità di risposta all'impatto della particella e quindi buona risoluzione temporale;**
 - **buona trasmissione della luce (lunghezza di attenuazione);**
 - **capacità di emettere su lunghezza d'onda compatibile con il dispositivo con cui si accoppia.**



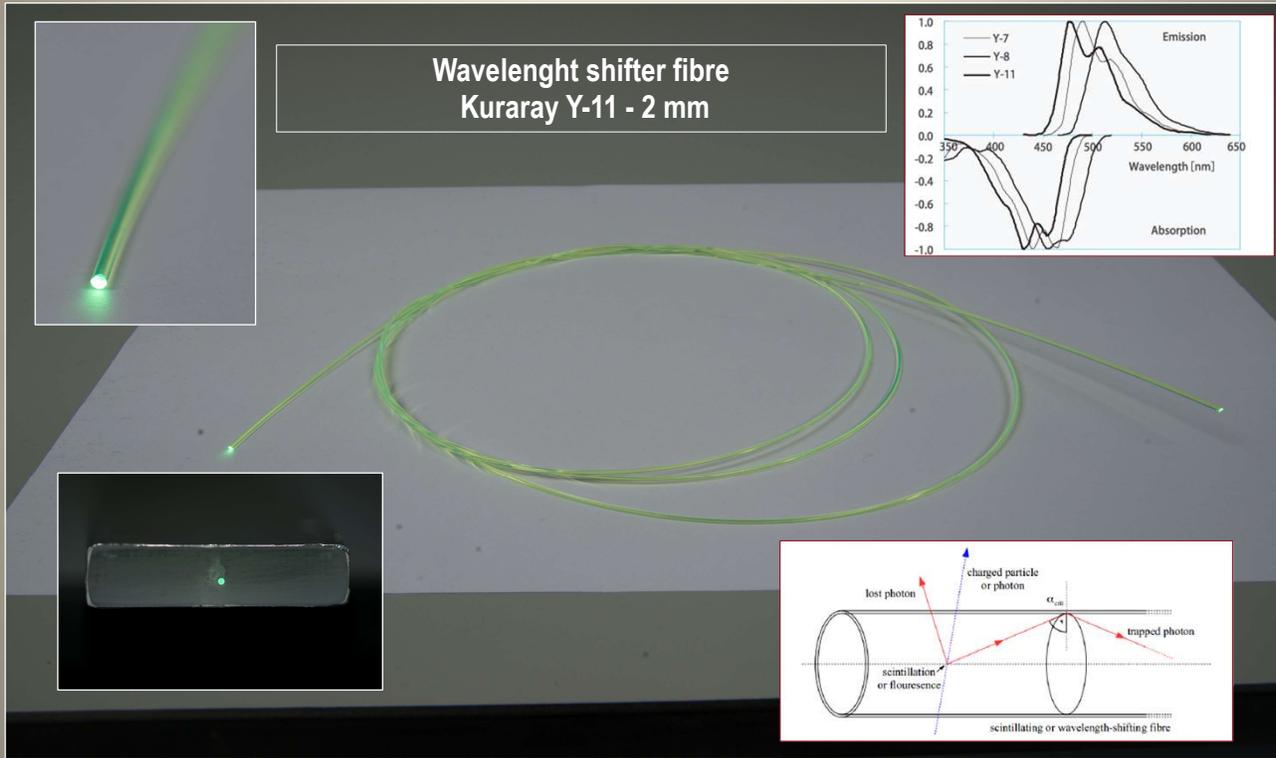
LO SCINTILLATORE USATO PER IL “TELESCOPIO”

- ✓ Scintillatore organico di tipo plastico estruso (impiega polistirene in granuli, circa 2 \$/kg).
- ✓ Già dotato di materiale riflettente (biossido di titanio TiO_2).
- ✓ **Low cost**, ma bassa lunghezza di attenuazione (la distanza in corrispondenza della quale il numero di fotoni emessi dallo scintillatore e che si propagano all'interno del materiale, viene ridotto di un fattore pari a e). Nel nostro caso abbiamo una *attenuation length* di 5 cm per la componente veloce e 24 cm per quella lenta.
- ✓ Bassa *light yield*.
- ✓ invecchiamento precoce del materiale (-30% di luce in 10 anni).

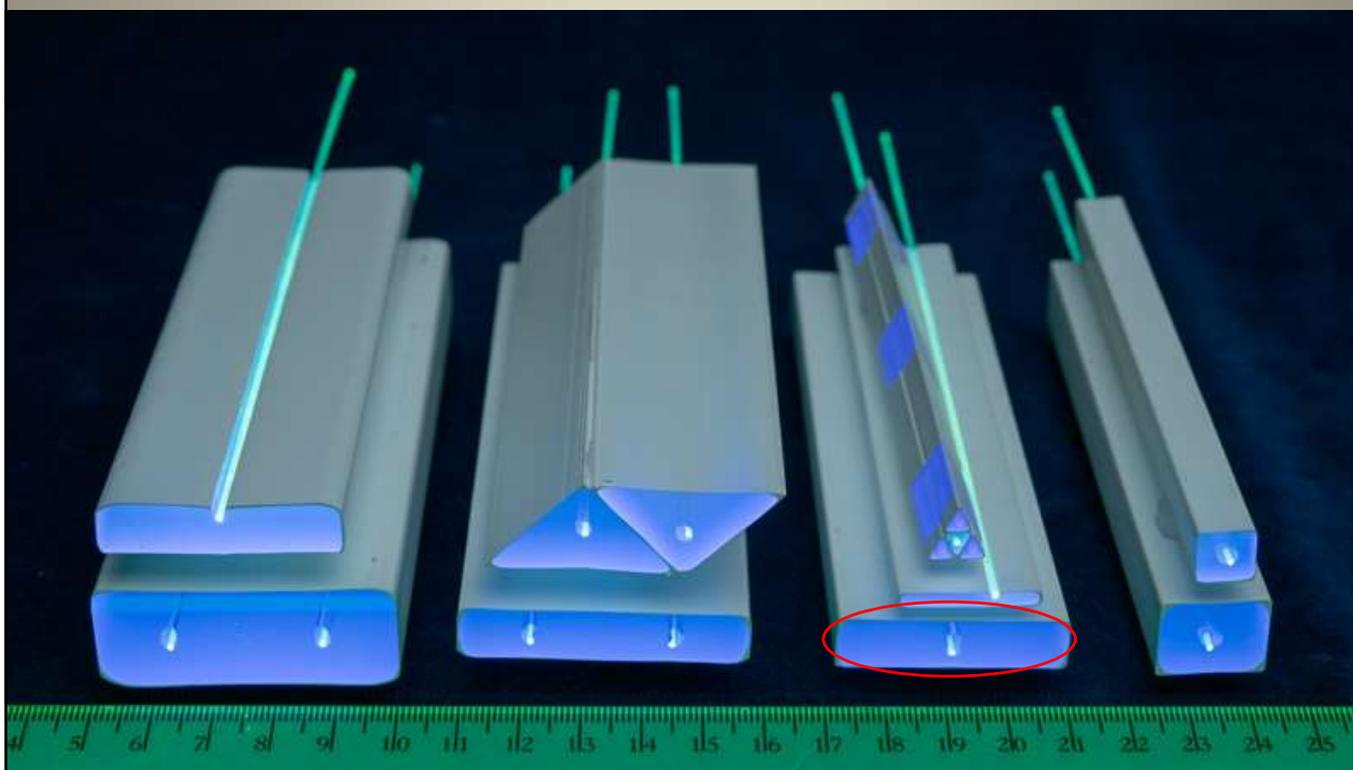


COME RISOLVERE IL PROBLEMA DELLA BASSA LUNGHEZZA DI ATTENUAZIONE???

- ✓ Usiamo particolari fibre simili alle fibre ottiche, chiamate **WLS (Wave Length Shifter)**, in grado di raccogliere la luce in ogni punto dello scintillatore e convertirla in luce di diversa lunghezza d'onda (dal blu al verde);
- ✓ Hanno lunghezza di attenuazione $> 3,5$ m (fattore estremamente importante se il segnale luminoso deve percorrere lunghe distanze prima di essere "letto" da un fotorivelatore sia esso un PMT o un SiPM).



DIVERSE FORME DI SCINTILLATORE ESTRUSO



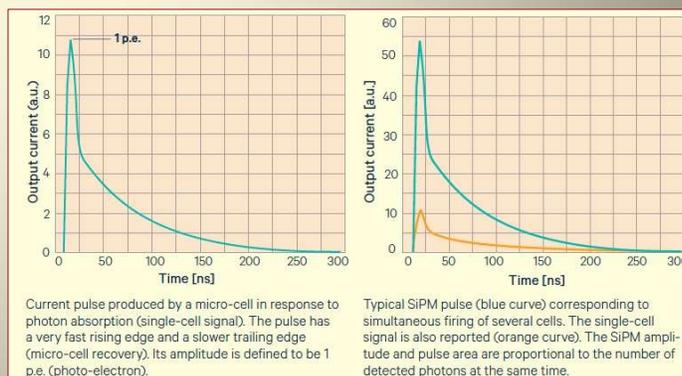
Lettere consigliate:

"Low cost extruded plastic scintillator" <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900201001772>

"A novel polystyrene-based scintillator production process involving additive manufacturing - <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/10/>

COME "LEGGERE" LA LUCE RACCOLTA DALLE WLS

- ✓ Usiamo dispositivi chiamati **SiPM (Silicon PhotoMultiplier)** in grado di convertire la luce raccolta in un segnale elettrico.
- ✓ I SiPM sono dispositivi a stato solido che quando rivelano 1 fotone producono un impulso di corrente della durata di decine di nanosecondi contenenti da 10^5 a 10^6 elettroni. Perciò il SiPM ha un guadagno!!!
- ✓ Il segnale di uscita di un SiPM è un impulso di corrente a doppio esponenziale ed è la somma analogica dei segnali prodotti da ciascuna microcella. Un SiPM perciò fornisce un segnale elettrico proporzionale al numero di fotoni incidenti.



- ✓ Sono essenzialmente realizzati con una **matrice di diodi** connessi in parallelo su un substrato di silicio con in serie una resistenza (detta resistenza di *quenching*).
- ✓ Ogni cella della matrice può avere dimensioni che variano dai 10 ai 100 μm . Di microcelle possono essercene centinaia o addirittura decine di migliaia.
- ✓ Un SiPM ha in genere un'area attiva che varia da 1 mm^2 a 6 mm^2 e può avere una sensibilità spettrale che va dagli UV agli IR (con picco nel visibile tra i 400-500 nm).

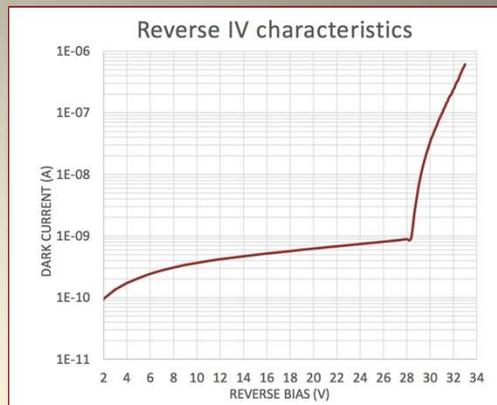


Figure 1

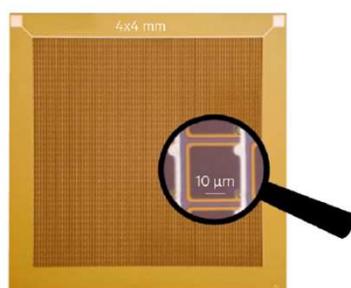
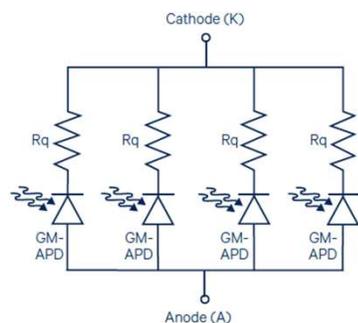


Figure 2



Rispetto ai tradizionali PMT, i SiPM presentano: bassa tensione di funzionamento, insensibilità al campo magnetico (almeno sino a 4 T). Esiste la cosiddetta dark count ovvero un rumore termico statistico presente anche in condizioni di buio (proporzionale all'area attiva del dispositivo).

Data sheet dei SiPM usati per il CRC:

http://advansid.com/attachment/get/up_61_1432732739.pdf

Introduction to Silicon Photomultiplier

https://cdn2.hubspot.net/hubfs/3893186/White%20papers/White_paper_Introduction_to_silicon_photomultipliers_SiPMs_EN.pdf

***Parametri di funzionamento dei
SiPM:***

- GUADAGNO (G)
- EFFICIENZA QUANTICA (PDE)
- DARK COUNT RATE (DCR)
- CROSS TALK
- AFTERPULSING

UN SEMPLICE ESERCIZIO

Consideriamo uno scintillatore spesso 1 cm. Uno scintillatore rilascia in media per una particella al MIP (Minimum Ionizing Particle) 2 MeV/cm di energia corrispondente a ~ 40000 fotoni (si hanno quindi ~ 20000 fotoni per MeV).

Se leggiamo lo scintillatore con un SiPM che tipicamente ha una P.D.E. ~ 35% (probabilità che un fotone che arriva sul SiPM produca un segnale in uscita) ho ~ 14000 coppie elettrone-lacuna.

Supponiamo la capacità del fotodiode sia 10 pF.

$$Q = 1.6 \times 10^{-19} \times 14 \times 10^3 \sim 22 \times 10^{-16} \text{ C}$$

$$V = Q/C \sim 22 \times 10^{-16} / 10 \times 10^{-12} \sim 22 \times 10^{-16} \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ V}$$

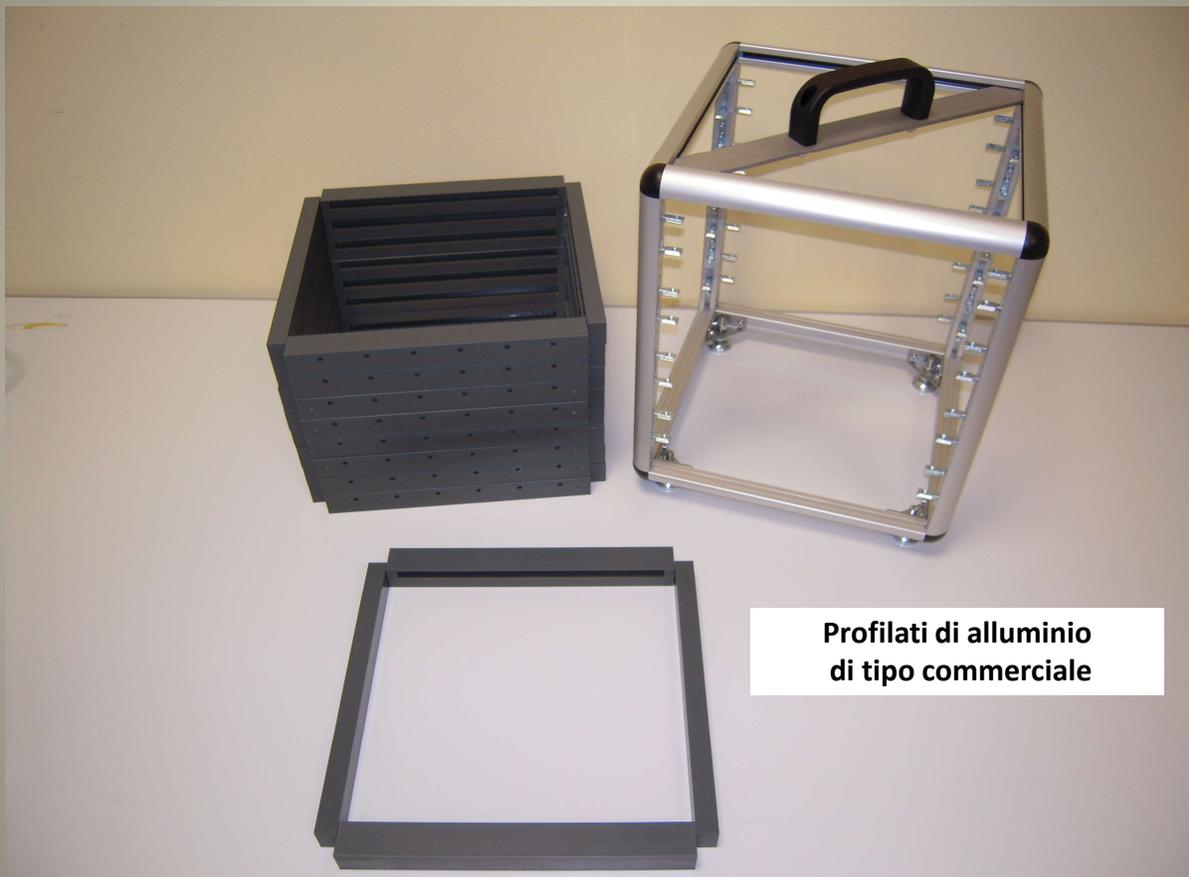


$$V = 50 \mu\text{V}$$



Devo amplificare il segnale

REALIZZAZIONE PRATICA DEL TELESCOPIO



**Profilati di alluminio
di tipo commerciale**

REALIZZAZIONE PRATICA DEL TELESCOPIO

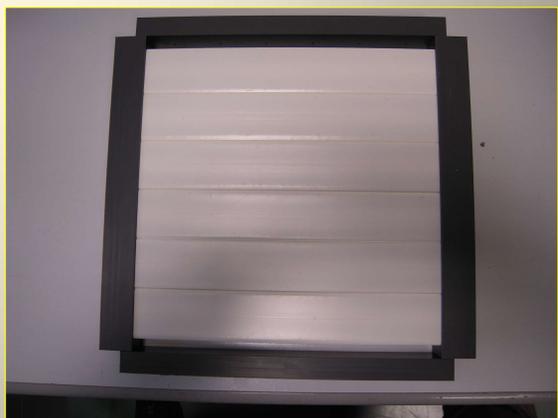
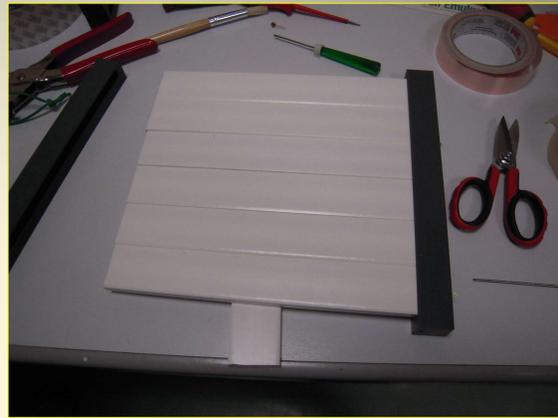
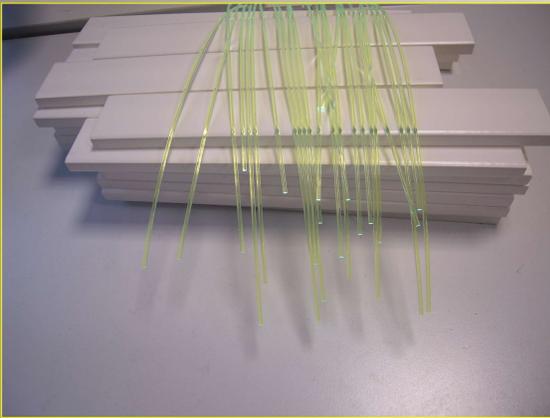


**Supporti dello scintillatore:
4 pezzi di PVC
(lavorati con fresatrice a
controllo numerico)**

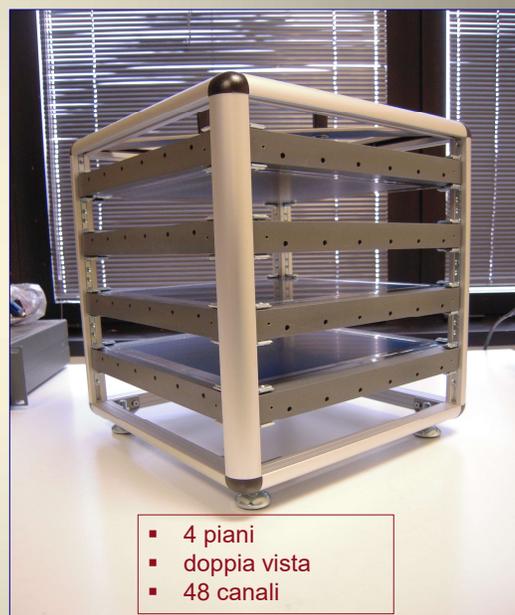
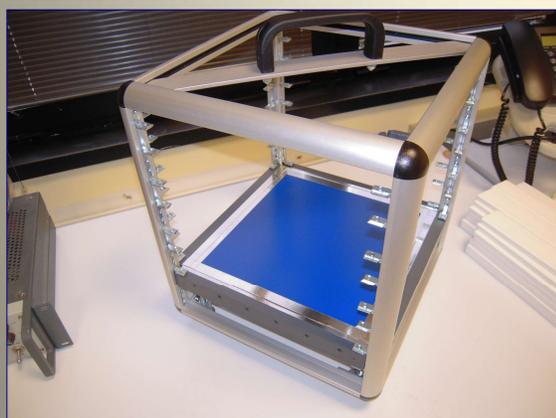
REALIZZAZIONE PRATICA DEL TELESCOPIO



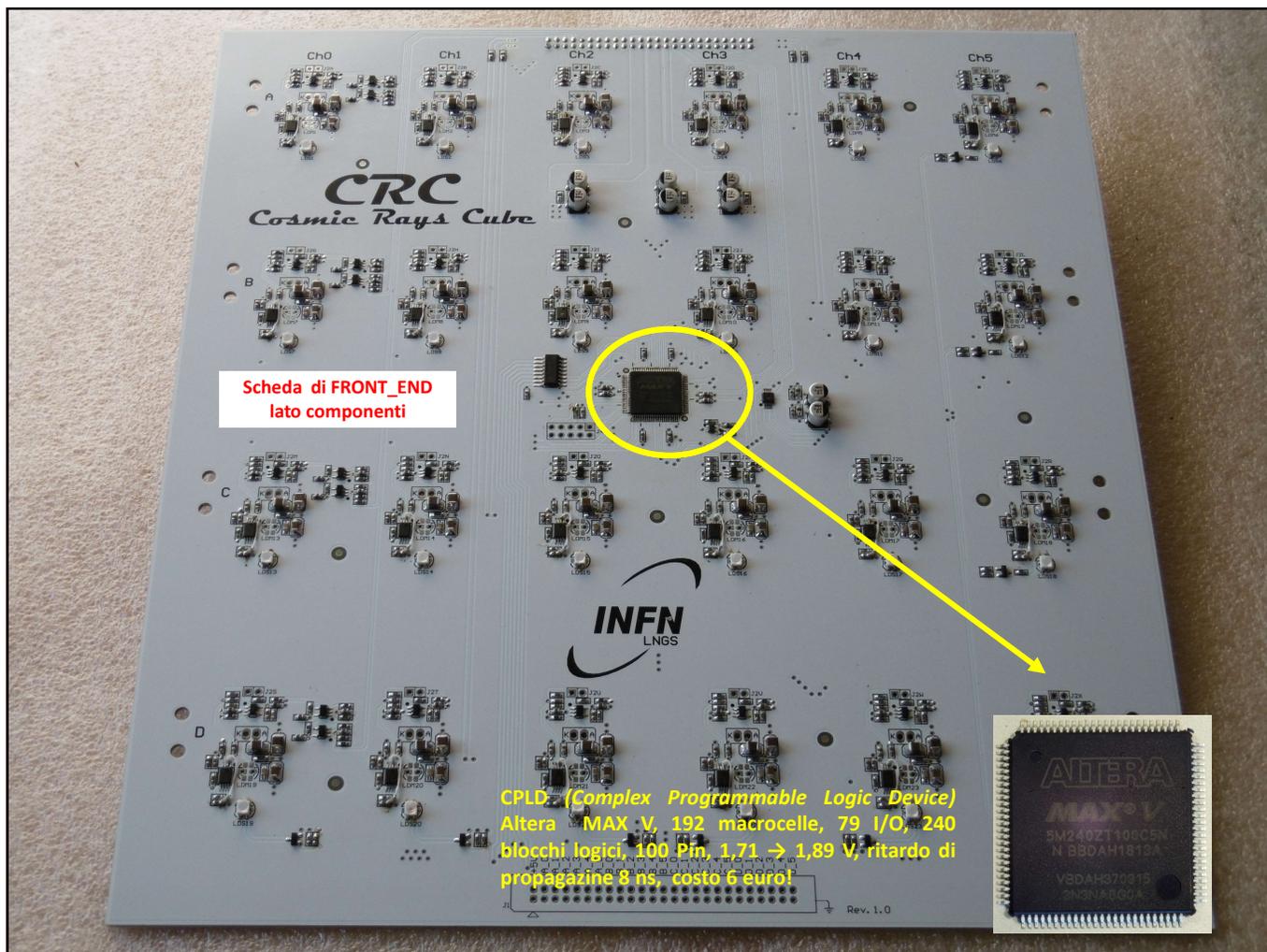
REALIZZAZIONE PRATICA DEL TELESCOPIO

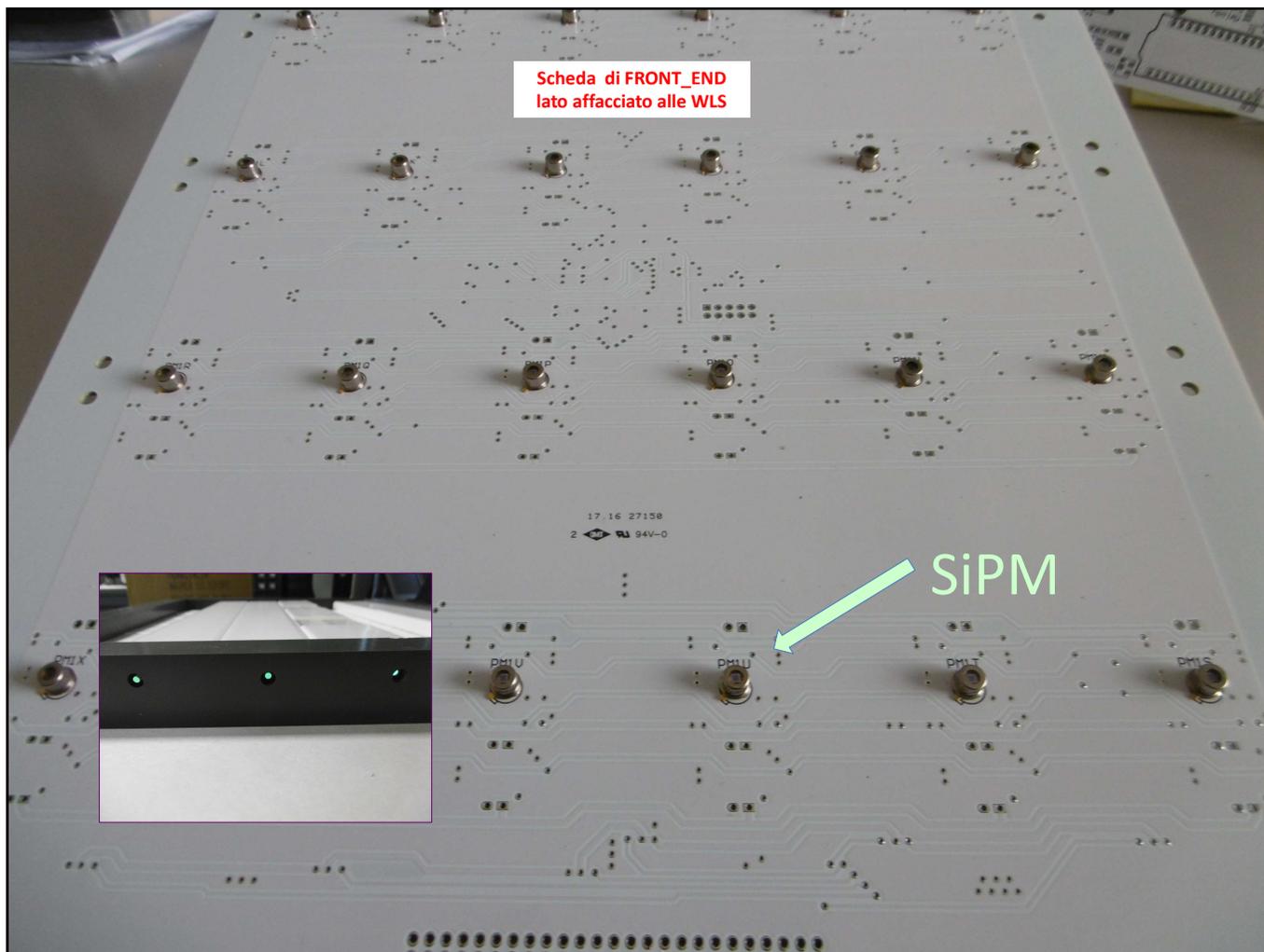


REALIZZAZIONE PRATICA DEL TELESCOPIO

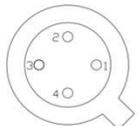


Tutti i piani devono essere a tenuta di luce





ASD-RGB1S-M/MG, ASD-RGB1C-M/MG
TO18 Metallic Package

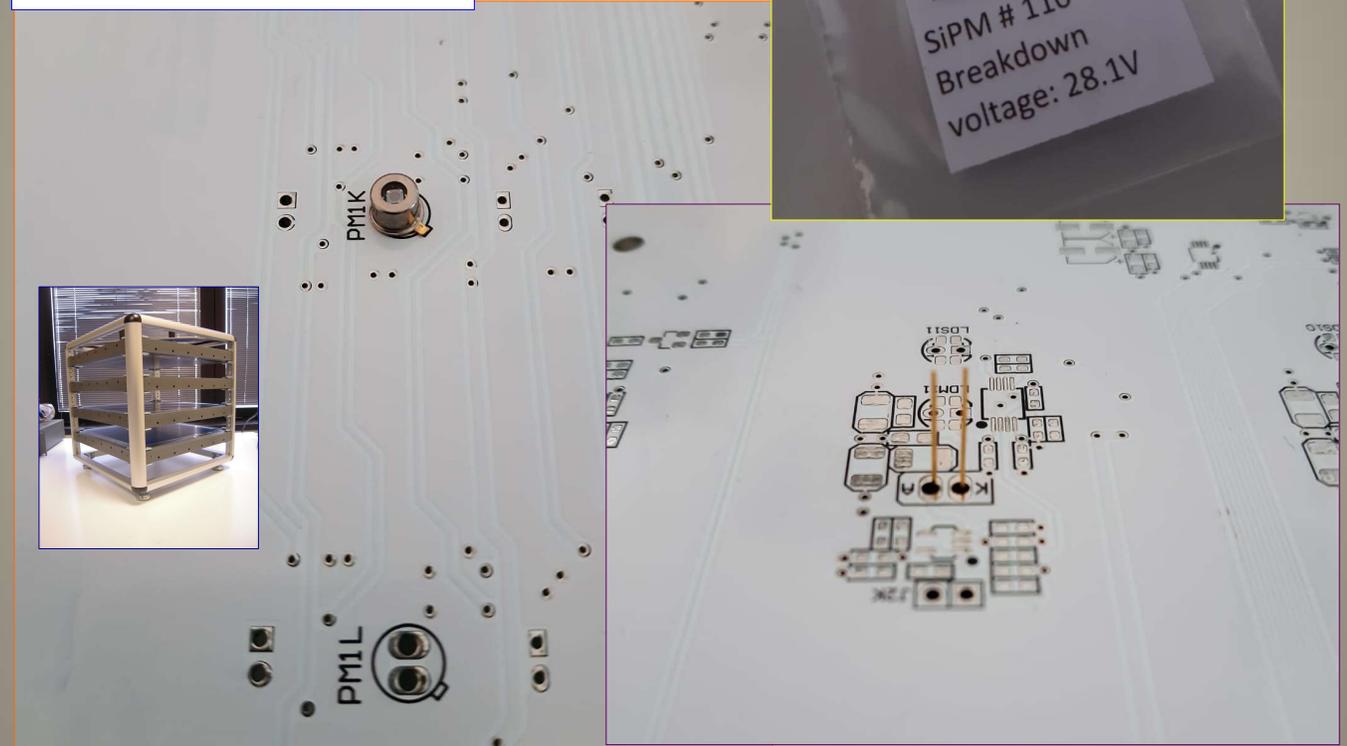


Bottom view

N°	Name	Function
1	A	SiPM Anode
3	K	SiPM Cathode
2,4		Not connected

**Inserzione del SiPM
sulla scheda di Front-end**

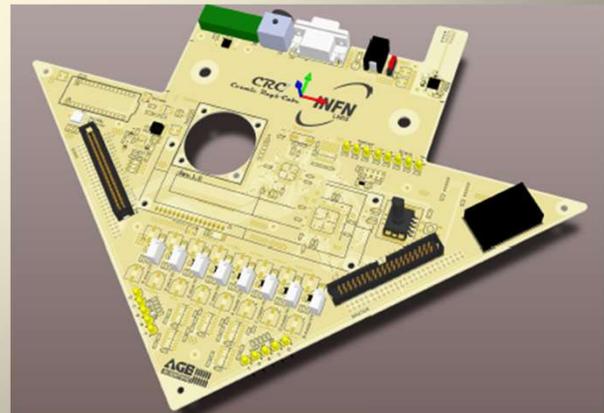
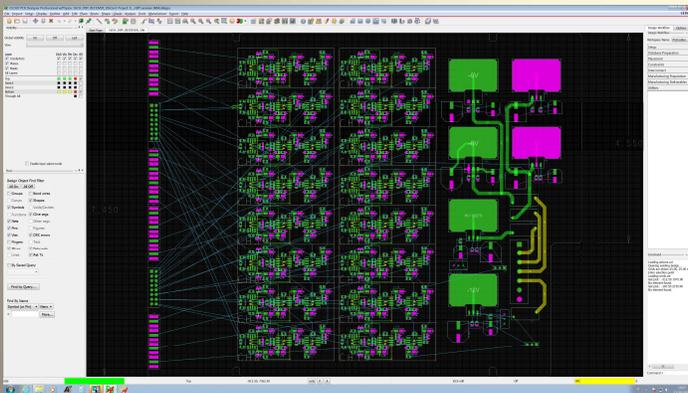
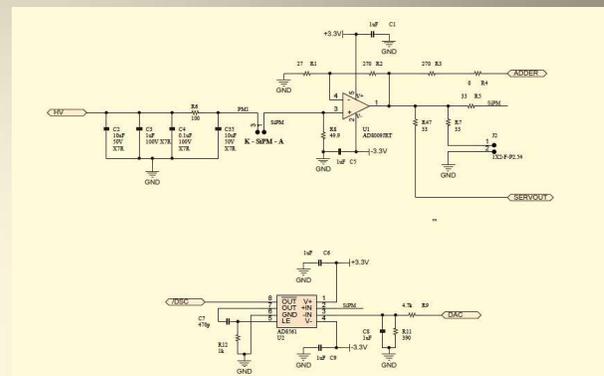




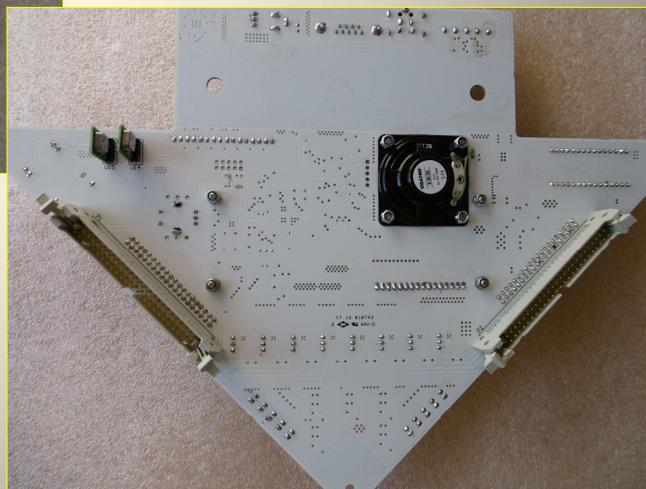
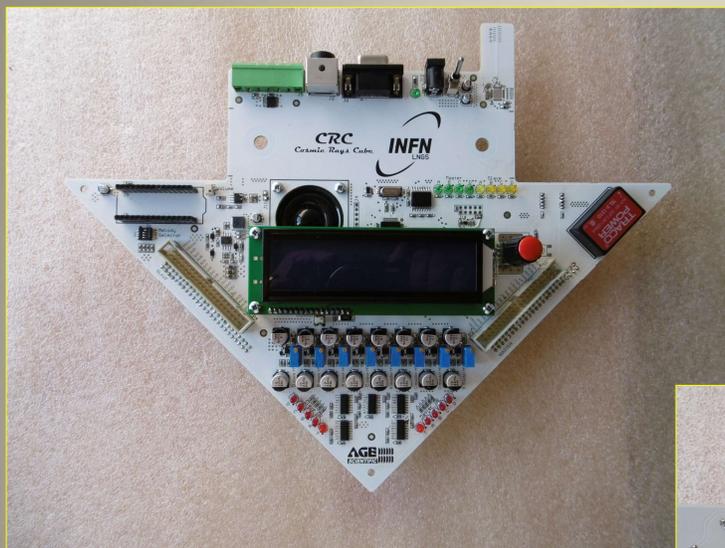


Nel progetto di una scheda di elettronica... c'è il lavoro di tante persone

- Realizzazione dello schema e simulazioni
- Realizzazione al CAD della scheda (produzione di file gerber)
- Produzione finale in collaborazione con aziende che producono PCB



Scheda di Controllo



Alimentazione SiPM (Vbias) = 32 V cc

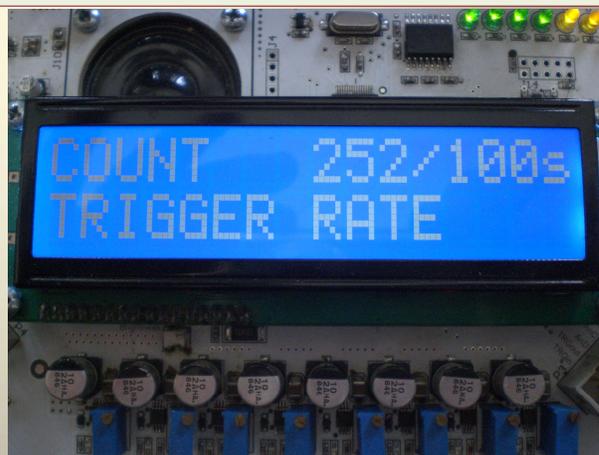
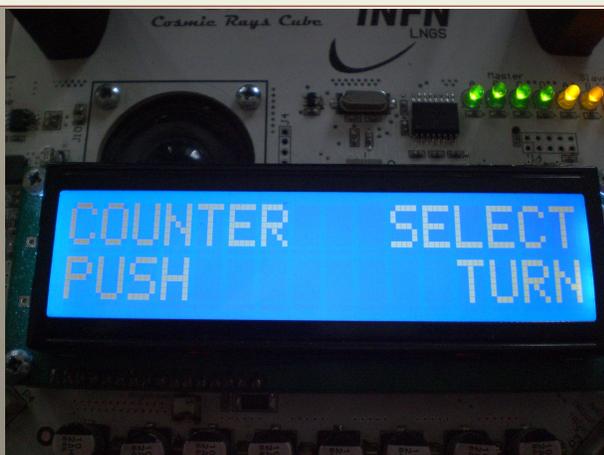
Alimentazioni del telescopio: +12,+5, +3,3, -3,3 V

Tutto con un unico alimentatore commerciale a 12 V !

Collegamento tra le schede con soli 2 flat-cable !

QUALI MISURE POSSIAMO FARE CON IL NOSTRO TELESCOPIO

- ✓ con il display selezionato su **TRACKING TURN** si ha il tracciamento a LED;
- ✓ con display su **THRESHOLD SELECT** si può impostare, a step di 5 mV, la tensione di soglia sui segnali;
- ✓ con display su **TRIGGER SELECT** si possono abilitare o disabilitare i piani in coincidenza (si modifica l'accettazione geometrica del rivelatore). Come sottomenù è possibile mettere in coincidenza più telescopi;
- ✓ con display su **TIME BASE SELECT** si può definire la finestra temporale (gate) entro cui fare i conteggi (1 s, 10 s, 100s);
- ✓ con display su **COUNTER SELECT** è possibile contare il numero di trigger, il numero di eventi per canale, per piano e dell'intera vista;
- ✓ con display su **DEADTIME SELECT** si può inserire un tempo morto tra due acquisizioni (100 ms o 1 s) e si può mettere il telescopio in configurazione "single shot" (visualizzazione di un evento alla volta).
- ✓ si possono inoltre, attraverso connettori posti sulla scheda controller, monitorare le alimentazioni, i segnali analogici di ciascun SiPM, la somma analogica di ciascun piano e i segnali digitali di ciascun piano (Digital OR);
- ✓ si può connettere un GPS;
- ✓ si possono acquisire i dati tramite PC mediante un collegamento tra la porta seriale del telescopio ed un ingresso USB di un PC, oppure spedire i dati via wireless.



CONCETTO DI EFFICIENZA DI UN RIVELATORE

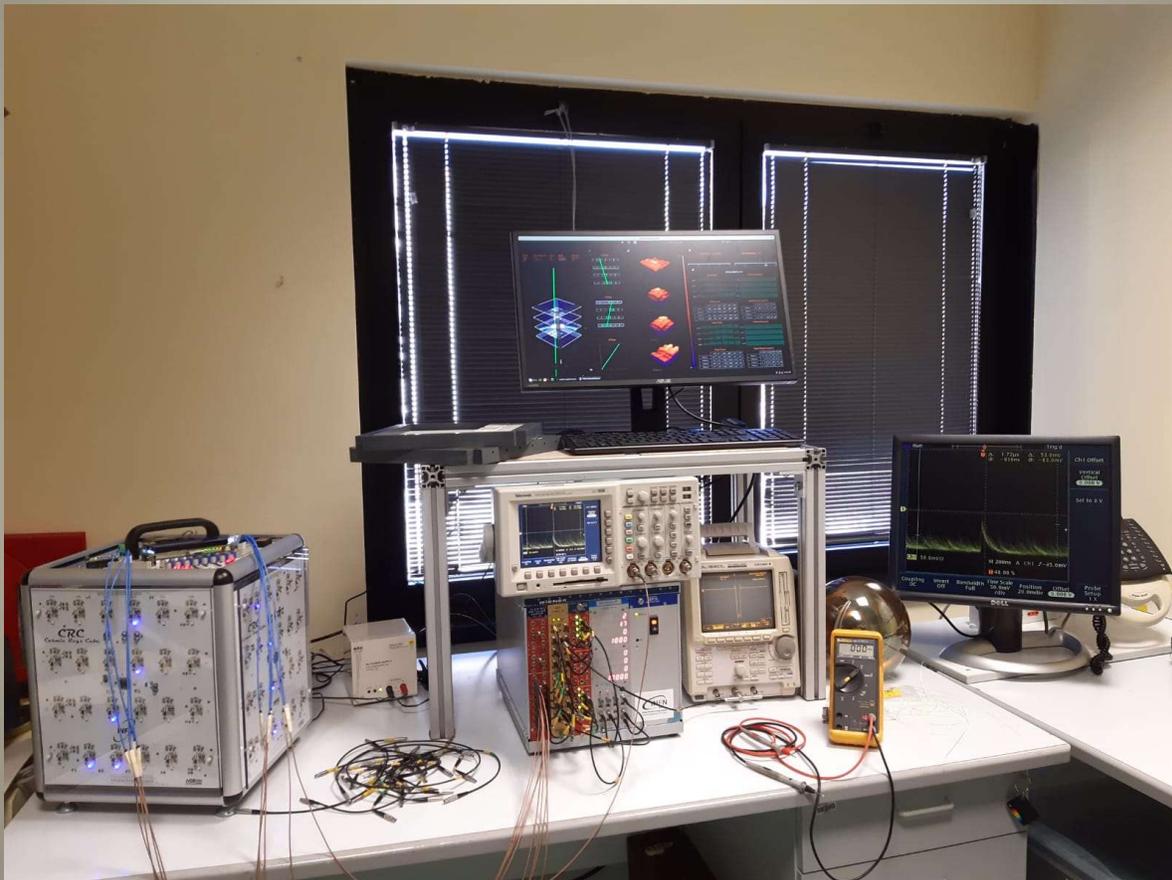
L'efficienza assoluta dipende fortemente dalla geometria della misura e dalle proprietà del rivelatore. E' data dal rapporto:

$$E_{\text{ass}} = \text{numero di particelle registrate} / \text{numero di particelle emesse dalla sorgente}$$

L'efficienza intrinseca di un rivelatore dipende dal materiale del rivelatore, dall'energia della radiazione incidente, dallo spessore del rivelatore nella direzione di incidenza della radiazione ed è definita come:

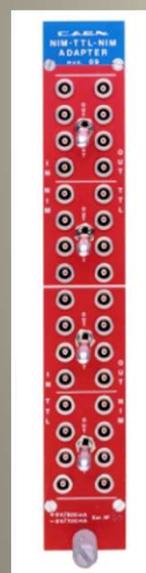
$$E_{\text{in}} = \text{numero di particelle registrate} / \text{numero di particelle incidenti sul rivelatore}$$

MISURE CON IL TELESCOPIO: il nostro set-up



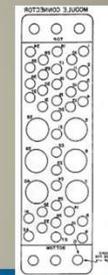
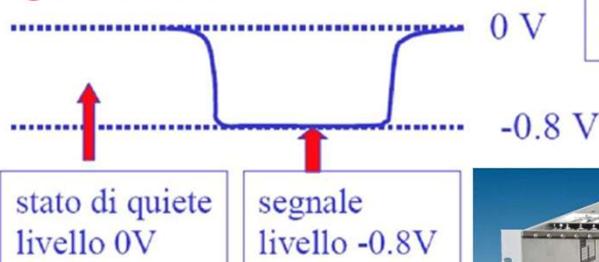
LA STRUMENTAZIONE

Crate NIM e convertitore TTL-NIM-TTL: la sigla NIM sta per Nuclear Instrument Module. E' stato il primo standard usato in fisica delle particelle. Sono stati realizzati con questo standard moltissimi moduli e degli appositi cestelli in grado di contenerli (crate). La modulistica NIM si basa su uno standard che stabilisce alimentazioni, tipologia dei connettori, impedenza (50 ohm) e livello logico dei segnali di input ed output. Lo standard NIM prevede uscite in corrente con un livello negativo di - 800 mV per il livello "1" logico. Il convertitore NIM/TTL/NIM trasforma il livello del segnale TTL (0, +5V) nello standard NIM (0, -800 mV) e viceversa. Nel nostro caso i segnali d'ingresso al convertitore sono gli OR digitali in logica TTL di un piano del telescopio (6 SiPM).



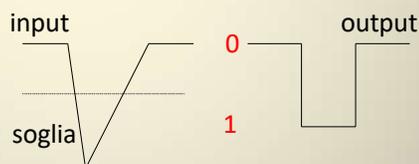
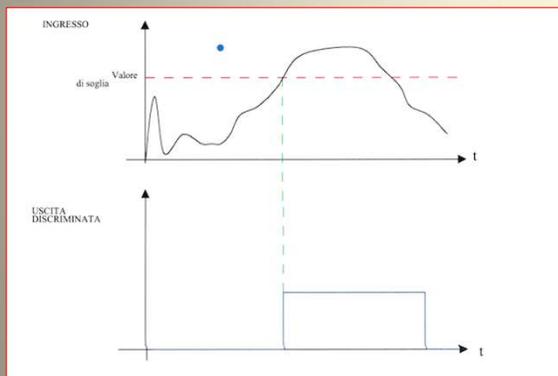
PIN	FUNCTION
1	RESERVED
2	RESERVED
3	DN GATE
4	RESERVED
5	
6	
7	
8	+200 V D.C.
9	SPARE
10	+6 V
11	-6 V
12	RESERVED
13	SPARE
14	SPARE
15	RESERVED
16	+12 V
17	-12 V
18	SPARE
19	RESERVED
20	SPARE
21	SPARE
22	RESERVED
23	RESERVED
24	RESERVED
25	RESERVED
26	SPARE
27	SPARE
28	+20 V
29	-24 V
30	SPARE
31	SPARE
32	SPARE
33	117 V A.C. (HOT)
34	POWER RETURN GND
35	RESET
36	GATE
37	SPARE
38	
39	
40	
41	117 V A.C. (NEUTRAL)
42	HIGH-QUALITY GND
G	GROUND GUIDE PIN

il segnale standard:



LA STRUMENTAZIONE

Discriminatore: è un dispositivo che risponde solo quando il segnale di ingresso è maggiore di un determinato valore di tensione (tipicamente in mV): tale valore può essere opportunamente fissato tramite un trimmer fissato sul pannello frontale. Se l'ampiezza è minore del valore prefissato, il discriminatore non darà alcun segnale in uscita. In genere è possibile fissare anche la durata del segnale in uscita.



La discriminazione viene fatta normalmente sul tempo di salita del segnale analogico (leading edge). Questo sistema può dare problemi di temporizzazione sia per la presenza di jitter del segnale, sia per il fatto che segnali di ampiezza diversa superano la soglia in tempi diversi.

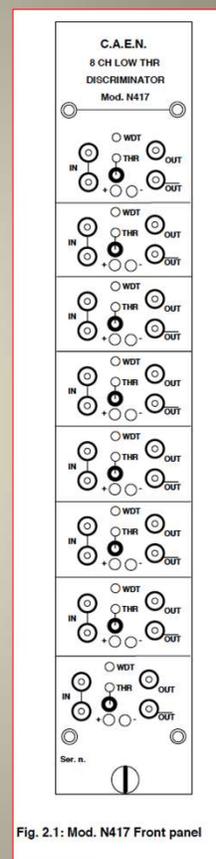


Fig. 2.1: Mod. N417 Front panel

LA STRUMENTAZIONE

Scaler: non è altro che un contatore di impulsi digitali. Ovviamente è possibile azzerare il conteggio tramite un pulsante di CLEAR. In ingresso accetta segnali in standard NIM e spesso è collegato all'uscita di un discriminatore.

Four 8-digit up-counters with 250 MHz max counting rate
 One 7-digit down-counter with 80 MHz max counting rate
 NIM and TTL inputs
 One LED display per section
 Up to three sections can be cascaded for 24-digit counting



CONCETTO DI TRIGGER

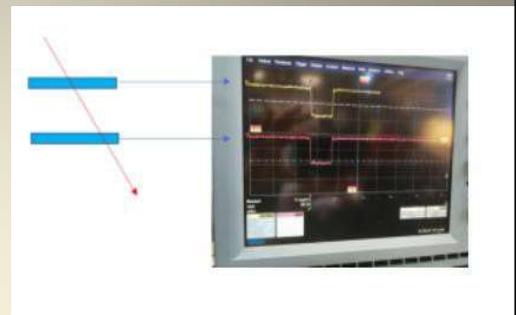


- Un “trigger” seleziona gli eventi interessanti fra tutti gli eventi presenti e decide se l’evento deve essere letto e registrato.
- Se vogliamo misurare il flusso (rate) di μ a livello del mare con un telescopio di scintillatori è sufficiente mettere in coincidenza più scintillatori (per abbattere il rumore) e contare i segnali sopra un certo livello di soglia. Per i SiPM usati nel telescopio la Dark Count Rate (DCR) è superiore a 100 kHz/mm^2
- In esperimenti più complicati esistono più livelli di trigger.

TECNICA DELLE COINCIDENZE

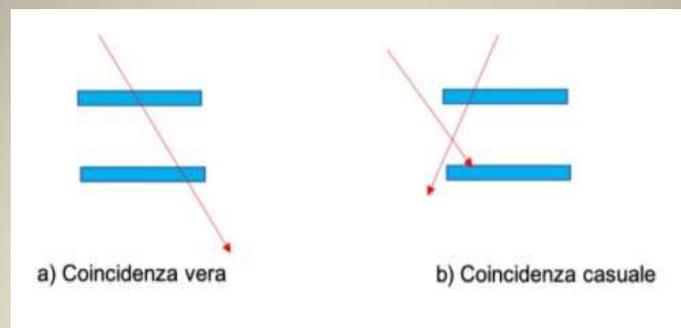
I conteggi di un singolo rivelatore sono legati a:

- Radioattività naturale
 - Passaggio di particelle cariche
 - Noise elettronico
 - Eventi casuali non correlati tra loro
-
- Per ridurre eventi casuali e discriminare le particelle cariche si usa la tecnica delle coincidenze.



Una coincidenza è il segnale emesso in contemporanea da più rivelatori collegati tra loro.

COINCIDENZE CASUALI



In entrambi i casi si parla di coincidenza ma nel primo si ha una coincidenza vera mentre nel secondo una coincidenza casuale. Aggiungendo più rivelatori in coincidenza la rate di coincidenze casuali diminuisce di diversi ordini di grandezza.

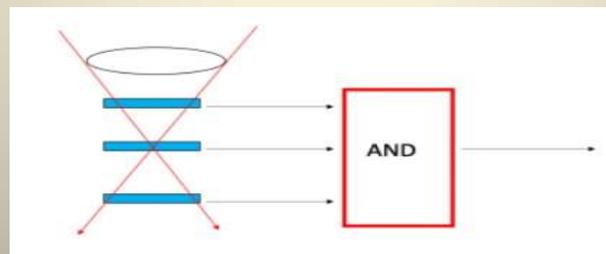
$$R_c = n \cdot R_s^n \cdot \tau^{n-1}$$

TECNICA SPERIMENTALE

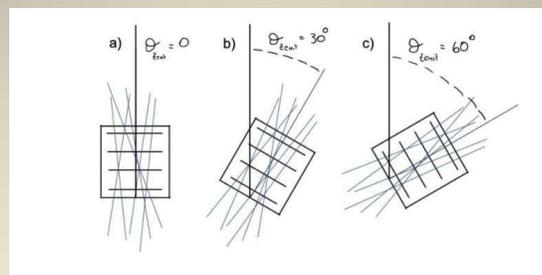
Il dispositivo più semplice per rivelare raggi cosmici è costituito da 2 contatori messi uno sopra l'altro in configurazione telescopica, cioè con i centri allineati su una linea retta chiamata asse, e connessi ad un circuito di coincidenza.

Questo permette di:

- selezionare una particolare direzione di provenienza all'interno dell'angolo solido individuato dall'accettanza geometrica (più i piani sono distanti più l'angolo solido è piccolo, più precisa è la direzione ma minore il campo visivo);
- selezionare il tipo di particella in funzione del numero di piani di rivelatori (più sono i piani, più le particelle che li attraversano in coincidenza sono penetranti).



TECNICA SPERIMENTALE



- **RATE**: Numero di muoni (conteggi C) incidenti sul rivelatore in un tempo T

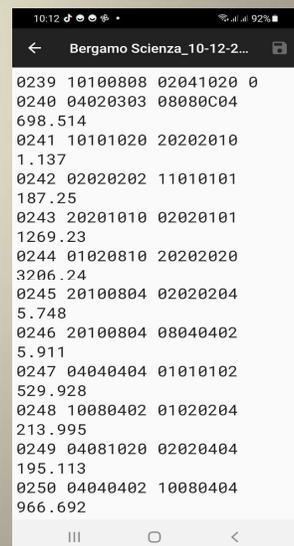
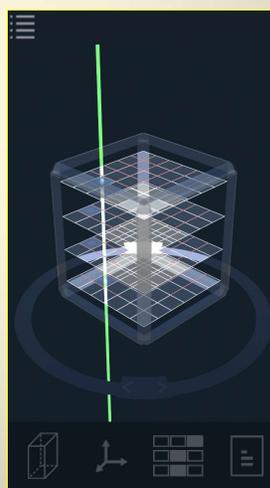
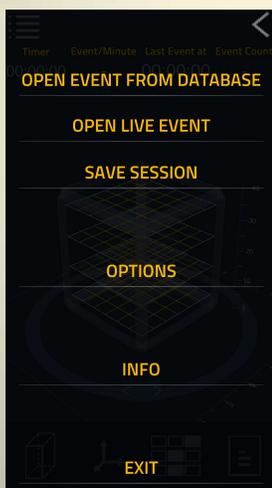
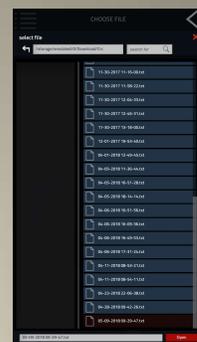
Scopo della misura: misura della rate in Hz (conteggi al secondo)

- Posiziono il rivelatore ad un certo angolo θ rispetto allo zenit
- Prendo dati per un tempo T
- Conto il numero di particelle registrate relativamente dalla coincidenza impostata
- Calcolo il Rate delle particelle: $R=C/T$ (part/sec)
- Cambio angolo e ripeto la misura...

Cosmic Rays Live: «muoni» in un'APP

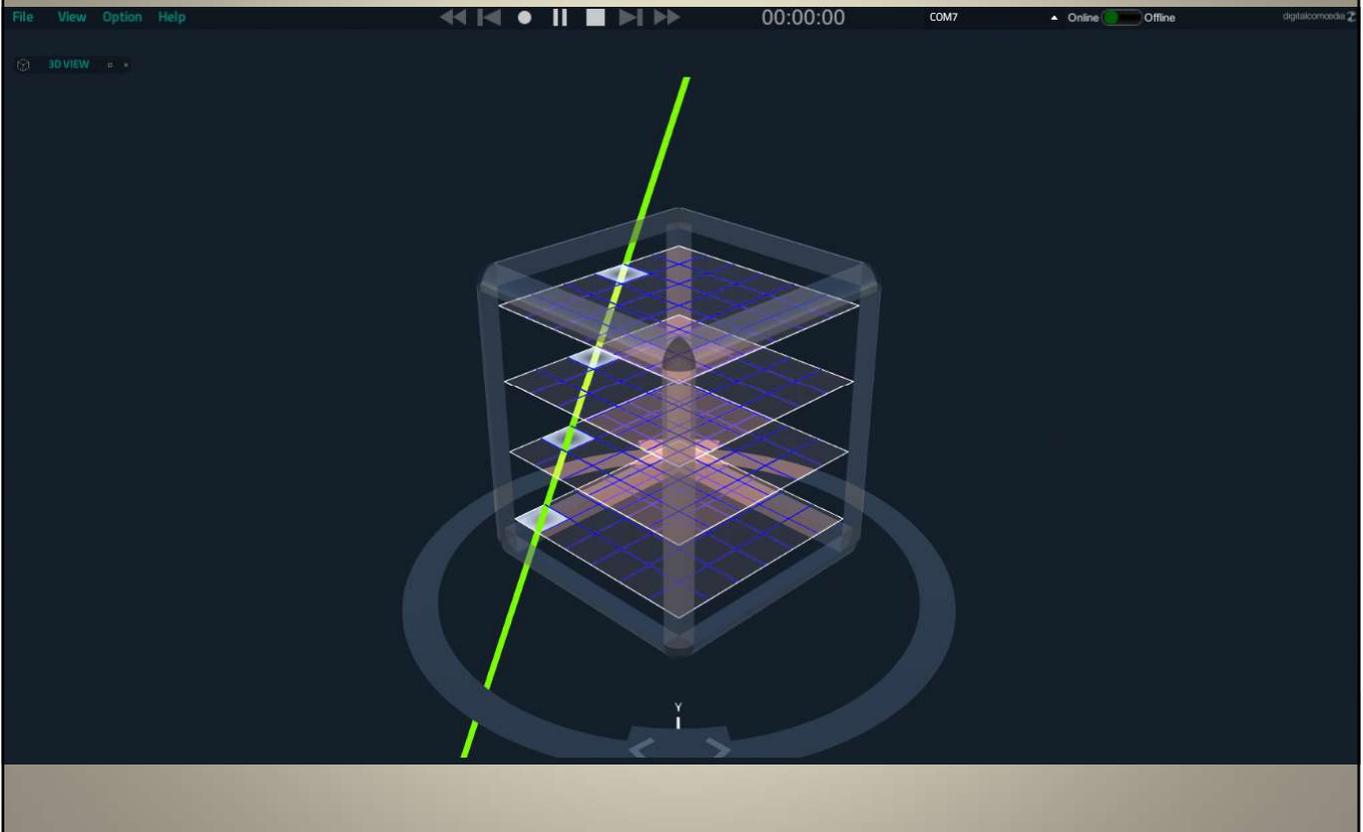


Abbiamo in rete diversi telescopi sia per istituzioni italiane che straniere





Event display visto dall'App



Schermata completa dell'App

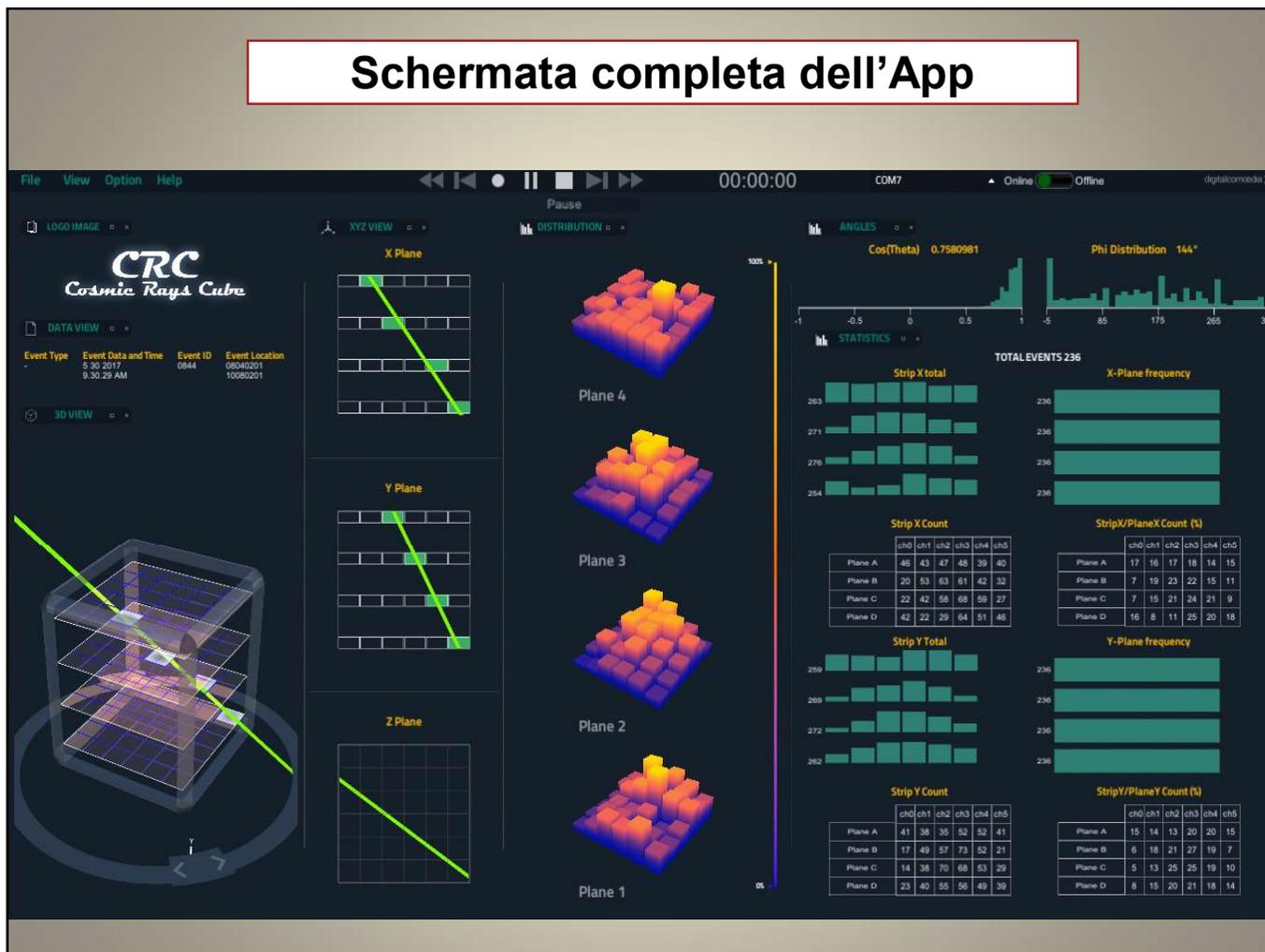
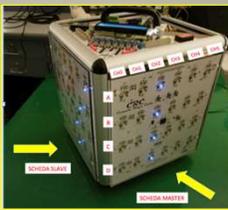


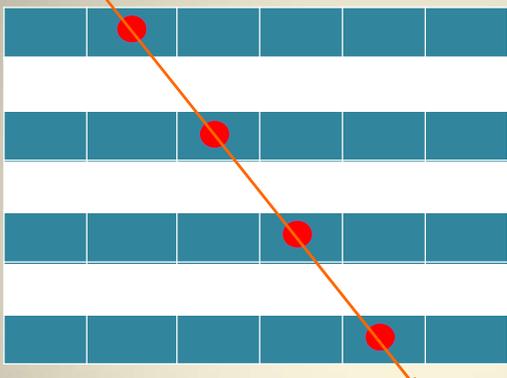
Tabella di conversione hex-binario

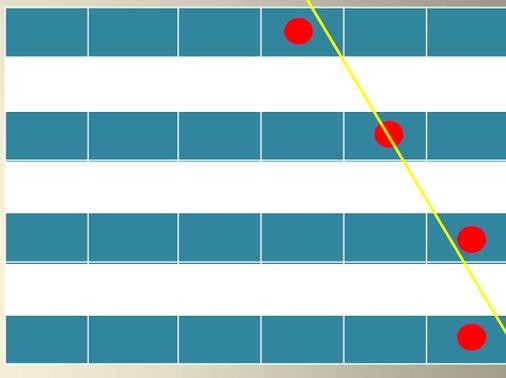
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
A	1	0	1	0
B	1	0	1	1
C	1	1	0	0
D	1	1	0	1
E	1	1	1	0
F	1	1	1	1

Scheda SLAVE



Scheda MASTER





1165	10080402	04020101
n. evento	dati scheda slave	dati scheda master

PIANO	HEX Scheda SLAVE	BINARIO Scheda SLAVE	HEX Scheda MASTER	BINARIO Scheda MASTER
A	10	0001 0000	04	0000 0100
B	08	0000 1000	02	0000 0010
C	04	0000 0100	01	0000 0001
D	02	0000 0010	01	0000 0001

Il numero binario che si ottiene da ogni coppia di numeri esadecimali va considerato eliminando il MSB e ed il successivo bit

Qualche sito di informazione e divulgazione scientifica

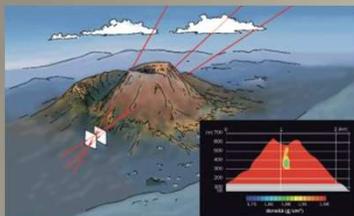
- <http://scienzapertutti.lnf.infn.it> (è il sito realizzato dalla comunità dei ricercatori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) per rendere accessibili a tutti i temi della scienza e della tecnologia. Vengono proposti concorsi a premi mensili);
- <https://www.asimmetrie.it> (è una rivista di informazione e divulgazione dell'INFN, ricca di curiosità e approfondimenti sulla fisica delle particelle con infografiche e immagini utili alla didattica. Ogni numero di Asimmetrie è una monografia che si sviluppa attorno ad un tema scientifico. La rivista esce con cadenza semestrale, ad aprile e a ottobre di ogni anno, ci si può abbonare in maniera gratuita);
- <https://collisioni.infn.it> (è lo spazio web dedicato alle attività culturali ed educational dell'INFN);
- <http://www.scienzaiovene.unibo.it> (questo sito web è rivolto principalmente a studenti degli ultimi anni delle medie superiori e dei primi anni di Università e ha lo scopo di aggiornare i giovani su argomenti di attualità scientifica e tecnologica);
- <https://www.lsw.n.it> (questo sito, con articoli e approfondimenti a tema, tenta di avvicinare il grande pubblico alla scienza e alle sue scoperte. Gli argomenti trattati vanno dalla robotica alla medicina, dalla genetica all'ecologia e, sebbene presentati con taglio professionale, sono di facile comprensione);
- <http://www.scienzainrete.it> (è possibile restare informati su tutto ciò che accade nel mondo della scienza e della ricerca senza dover per forza essere un fisico con tanto di dottorato in astrofisica particellare!);
- <https://www.scientificast.it> ("scientificast" è stato il primo podcast indipendente a tema scientifico in Italia. Fondato nel 2007 si propone di diffondere la cultura scientifica, rivolgendosi soprattutto a coloro che ne sono più lontani adottando uno stile divulgativo semplice, divertente, ma al tempo stesso rigoroso);
- <http://www.agorascienza.it/> (il sito crea spazi e occasioni di confronto tra il mondo della ricerca e la società, affinché maturi una reale cittadinanza scientifica e tutti possano partecipare attivamente al costruire una società della conoscenza);
- <http://www.ilsussidiario.net/News/Emmeciquadro> (la rivista Emmeciquadro è essenzialmente rivolta ai docenti di tutte le discipline scientifiche e si propone come strumento di lavoro in grado di fornire suggerimenti didattici e itinerari di approfondimento guidato sui temi di ricerca più attuali);
- <https://www.scienzaonline.com/> ("scienzaonline" è un giornale di scienza online a cura di studiosi ed esperti con un articoli scientifici sui più svariati argomenti).
- <https://www.agi.it/blog-italia/scienza> (Agenzia Giornalistica Italia: il blog dà notizie di interesse scientifico - e non solo - validate da esperti del settore).



*Il bello della scienza è che se anche una cosa l'hai studiata a lungo, non la conoscerai mai davvero al 100%.
C'e' sempre da imparare e da scoprire!!!*

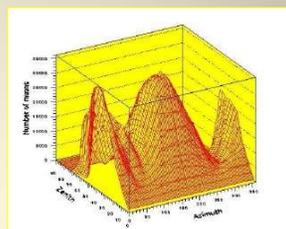
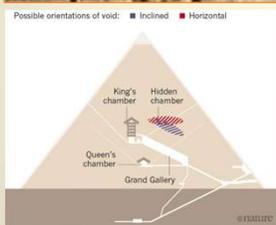
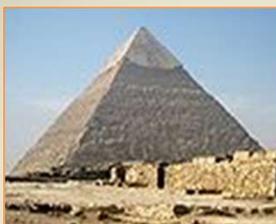
Grazie per l'attenzione

candela@lngs.infn.it

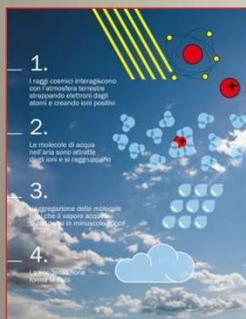


Ecco come è visto il vulcano giapponese Satsuma Iwojima attraverso la radiografia muonica. In Italia il progetto **MURAVES** (MUon-RAdiography-of-VESuvius) prevede il posizionamento di un telescopio a muoni alle pendici del Vesuvio in modo da studiare la struttura sommitale del vulcano. Sono possibili anche applicazioni in campo archeologico attraverso telescopi a muoni.

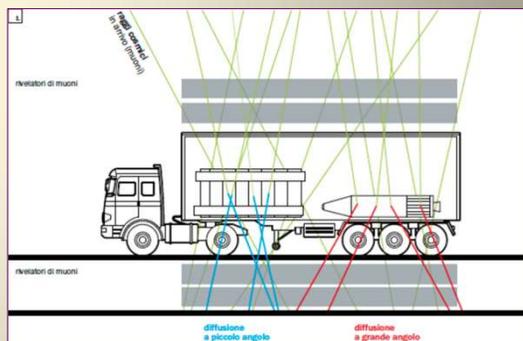
Con la **Muon Radiography** è possibile evidenziare stanze nascoste all'interno di tunnel o scoprire masse disomogenee prossime o sovrastanti grotte naturali. Nel 1970, il premio Nobel Luis Alvarez ebbe l'idea di evidenziare con i muoni stanze non ancora scoperte dagli archeologi nella Piramide di Chephren (Egitto). Di recente è stata individuata nella Piramide di Cheope una cavità grazie a rivelatori a muoni. L'esatta posizione della zona vuota non è stata ancora ben definita.



Radiografia muonica del Monte Aquila (massiccio del Gran Sasso) fatta dall'esperimento **MACRO** ai LNGS.



Gli esperimenti **CLOUD** (Cosmic Leaving Outdoor Droplets) al CERN e **SKY** (nuvola) all'Istituto dello Spazio di Copenhagen, hanno evidenziato l'influenza dei raggi cosmici sulla formazione delle nubi. Urtando le particelle di atmosfera aumenta il grado di ionizzazione degli strati bassi atmosferici favorendo così l'addensarsi delle nubi. Il flusso di raggi cosmici dipende anche dall'attività solare.



MUON PORTAL PROJECT - Un rivelatore per l'ispezione dei container per la ricerca di materiale radioattivo (uranio, plutonio...). I muoni vengono deflessi a grande angolo in presenza di materiali ad elevato numero atomico.