



***UN TELESCOPIO ED UN'APP
PER OSSERVARE I MUONI***


LNGS, 26 Novembre 2024

Attanasio Candela

Laboratori Nazionali del Gran Sasso

attanasio.candela@lngs.infn.it

*GLI INGREDIENTI DEL
COSMIC RAYS CUBE
(CRC)*

- 
- A satellite view of the Earth from space, showing the continents of Europe and Africa. Two bright, starburst-like patterns of white lines radiate from the top of the frame, representing particle showers or cosmic rays hitting the atmosphere. The background is a dark, starry space.
- ✓ *Scintillatore plastico estruso*
 - ✓ *Fibra Wave-Lenght Shifter (WLS)*
 - ✓ *Silicon PhotoMultiplier (SiPM)*
 - ✓ *Struttura meccanica*
 - ✓ *Cornici in materiale plastico per l'housing di scintillatori e SiPM*
 - ✓ *Elettronica di read-out e di acquisizione (DAQ)*

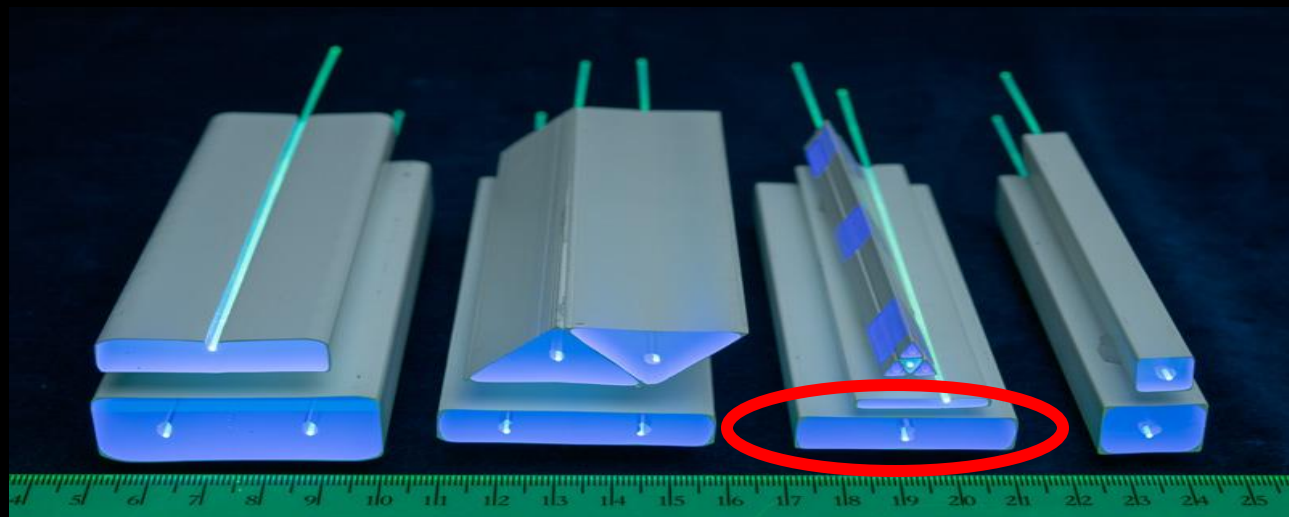


Lo scintillatore plastico

Una particella carica che attraversa uno scintillatore plastico cede parte della propria energia. Tale energia viene convertita in luce all'interno dello scintillatore.

Due importanti proprietà degli scintillatori

- ✓ «*light yield*» --> efficienza di conversione dell'energia persa dalla particella ionizzante in fotoni
- ✓ «*attenuation length*» --> capacità della luce di propagarsi lungo lo scintillatore



Lo scintillatore plastico estruso che usiamo ha una buona *light yield* e una buona *attenuation length*?

SI/NO

“Low cost extruded plastic scintillator”

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900201001772>




Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment



Volume 466, Issue 3, 11 July 2001, Pages 482-491

Low-cost extruded plastic scintillator

Anna Pla-Dalmau, Alan D. Bross  , Kerry L. Mellott

[Show more](#) 

[+](#) Add to Mendeley [🔗](#) Share [📄](#) Cite

[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)00177-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00177-2)

[Get rights and content](#)

Abstract

Motivated by a need for lower cost plastic scintillation detectors, we have tested commercially available polystyrene pellets in order to produce scintillating materials that can be extruded into various shapes. Selection of the raw materials is discussed. Two techniques are described that add wavelength shifting dopants to polystyrene pellets and extrude plastic scintillating bars using these materials. Data on light yield and transmittance are presented.

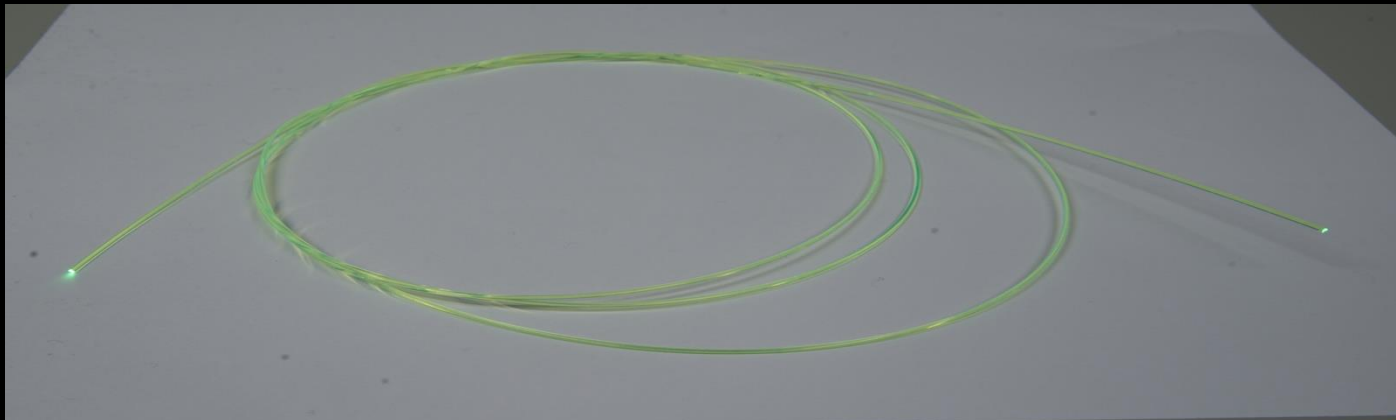
WaveLength Shifter Fiber (WLSF)

A cosa servono:

- compensano la bassa lunghezza di attenuazione dello scintillatore estruso;
- portano la luce alle estremità in modo che possa essere letta da particolari dispositivi optoelettronici (SiPM);
- spostano la lunghezza d'onda della luce di scintillazione (tipicamente il blu) verso lunghezze d'onda che non possono essere riassorbite dallo scintillatore e che sono adeguate alla sensibilità del sensore che andrà a "leggere" la luce (tipicamente verso il verde).

Common Properties of Single-clad Fibers -

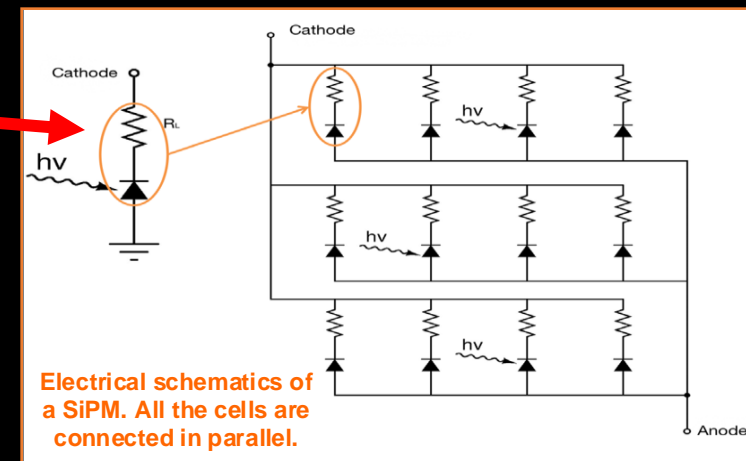
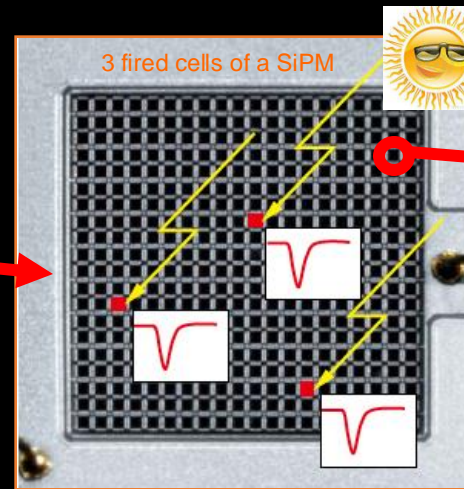
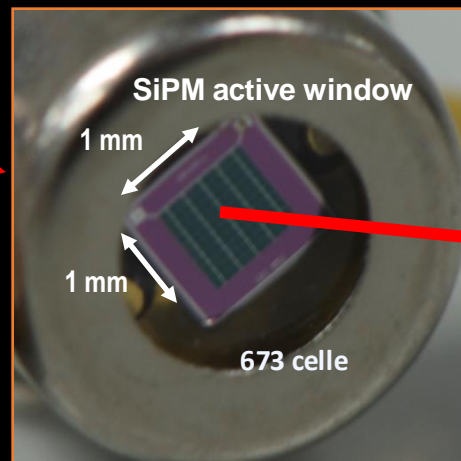
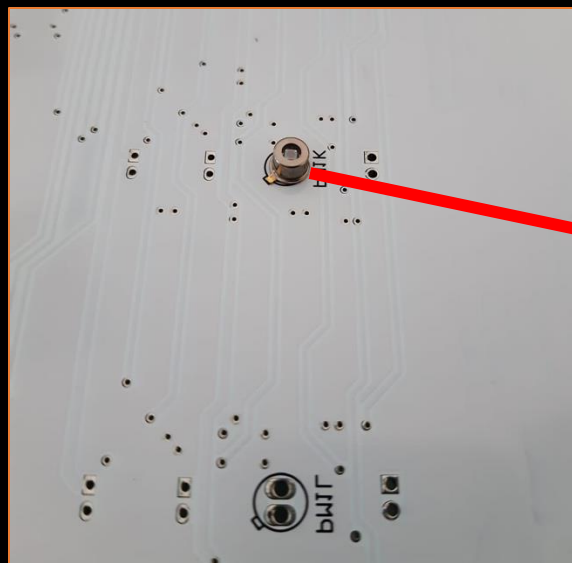
Core material	Polystyrene
Core refractive index	1.60
Density	1.05
Cladding material	Acrylic
Cladding refractive index	1.49
Trapping efficiency, round fibers	3.44% minimum
No. of H atoms per cc (core)	4.82×10^{22}
No. of C atoms per cc (core)	4.85×10^{22}
No. of electrons per cc (core)	3.4×10^{23}
Operating temperature	-20°C to +50°C
Vacuum compatible	Yes



Lettura consigliata: "Performance of Wavelength-Shifting Fibers for the Mu2e Cosmic Ray Veto Detector"

<https://arxiv.org/pdf/1811.04874.pdf>

I Silicon PhotoMultiplier (SiPM)



I SiPM sono essenzialmente una matrice di diodi connessi in parallelo su un substrato di silicio. Per funzionare vengono polarizzati in maniera inversa, ovvero con la tensione positiva applicata al catodo (K)



Il segnale di uscita da un SiPM è la somma analogica dei segnali prodotti da ciascuna cella. Un SiPM perciò fornisce un segnale elettrico che è proporzionale al numero di fotoni incidenti

Letture consigliate:

https://www.first-sensor.com/cms/upload/appnotes/AN_SiPM_Introduction_E.pdf

<https://onsemi.com/pub/Collateral/AND9770-D.PDF>

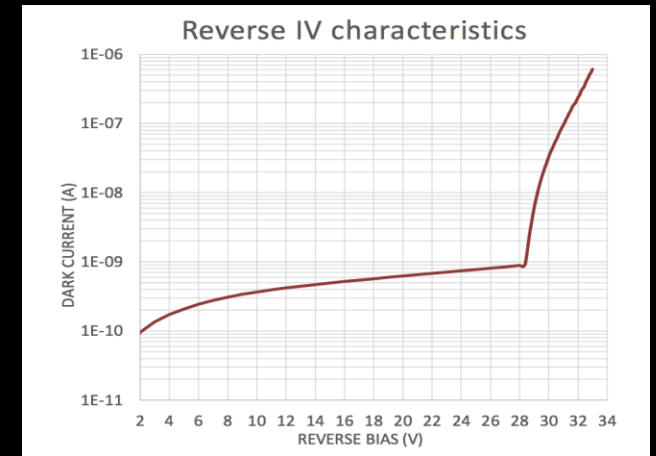
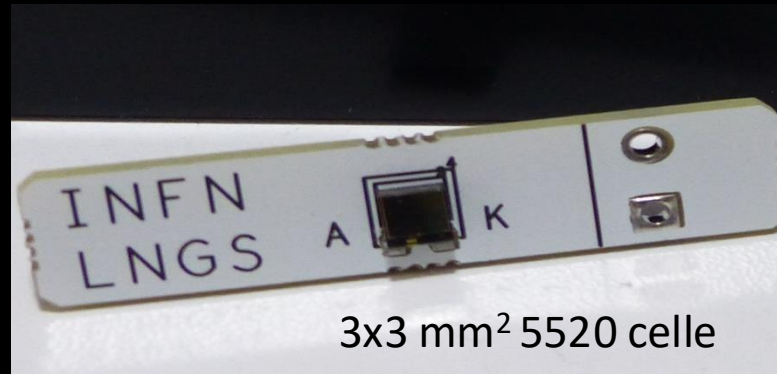
<https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mppc-sipms>



I Silicon PhotoMultiplier (SiPM)

✓ 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).



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).

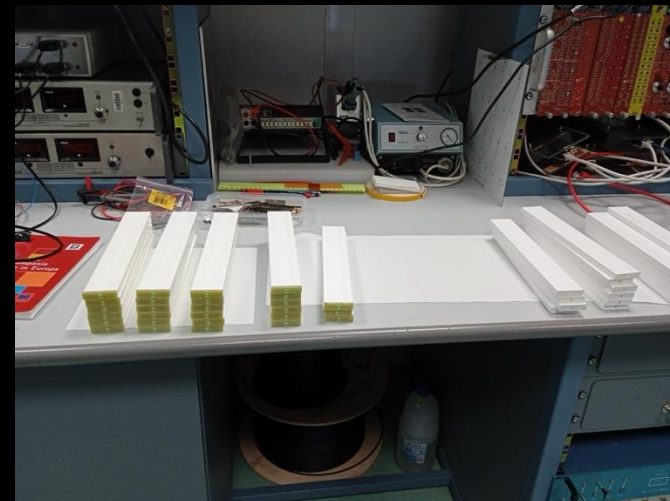
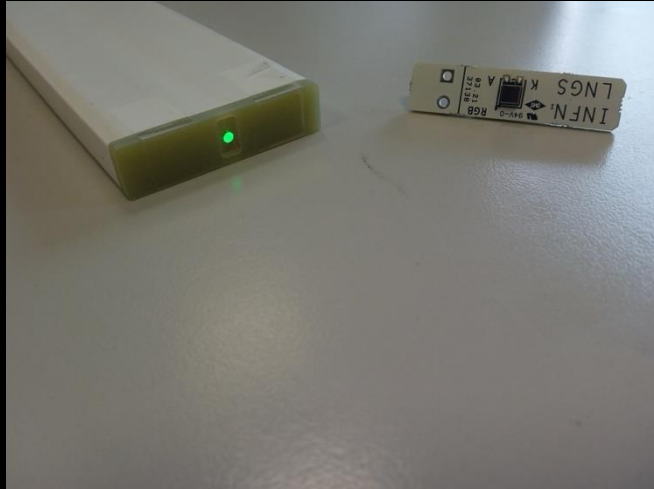
Data sheet dei SiPM usati per il CRC:

https://indico.cern.ch/event/566138/contributions/2287560/attachments/1400219/2139199/Advansid_datasheet_RGB.pdf
Introduction to Silicon Photomultiplier

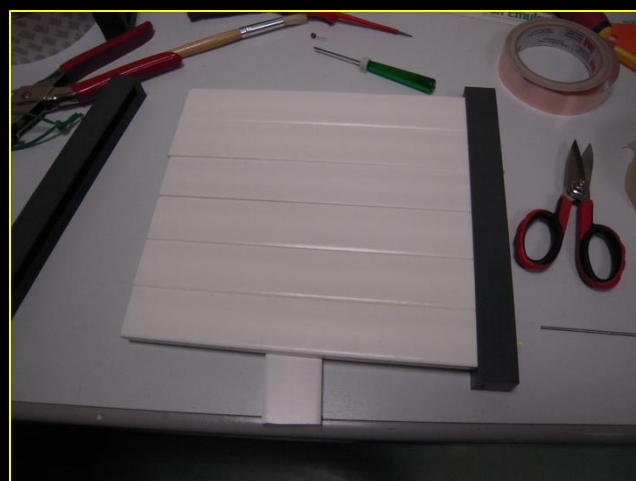
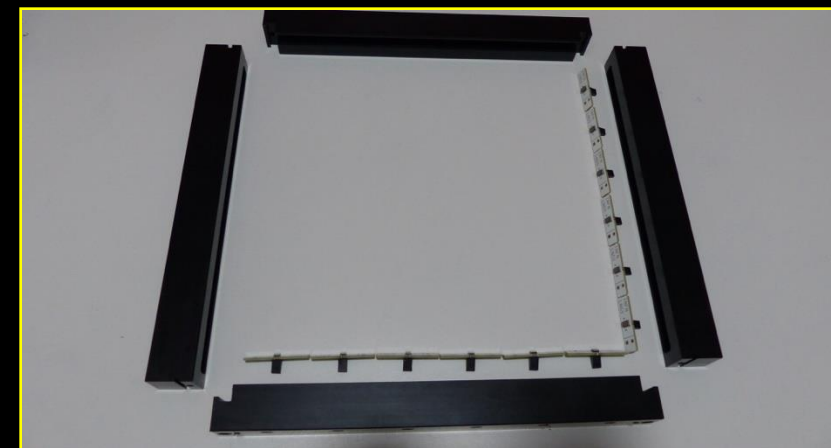
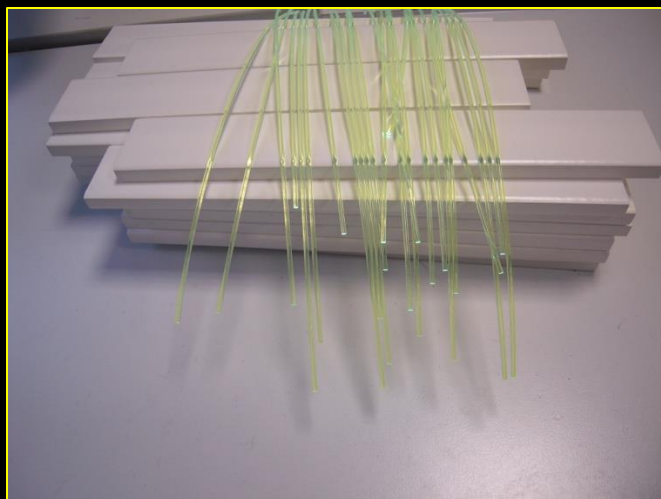




Fasi di costruzione di un CRC con SiPM 3x3 mm²

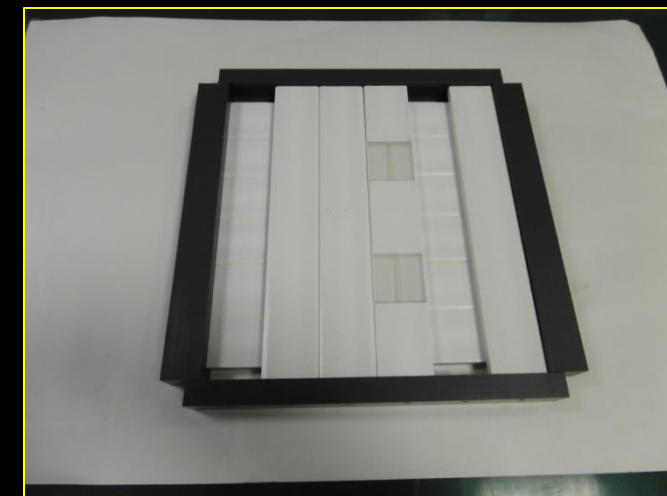


Realizzazione pratica del telescopio



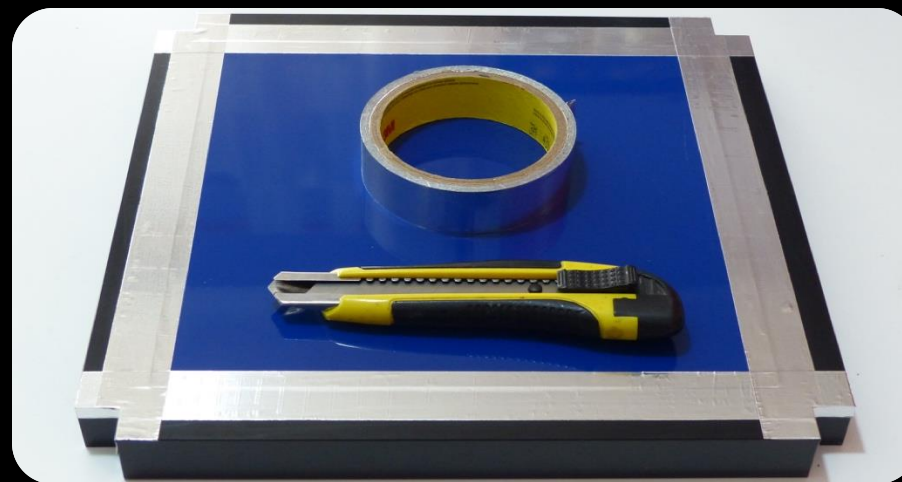
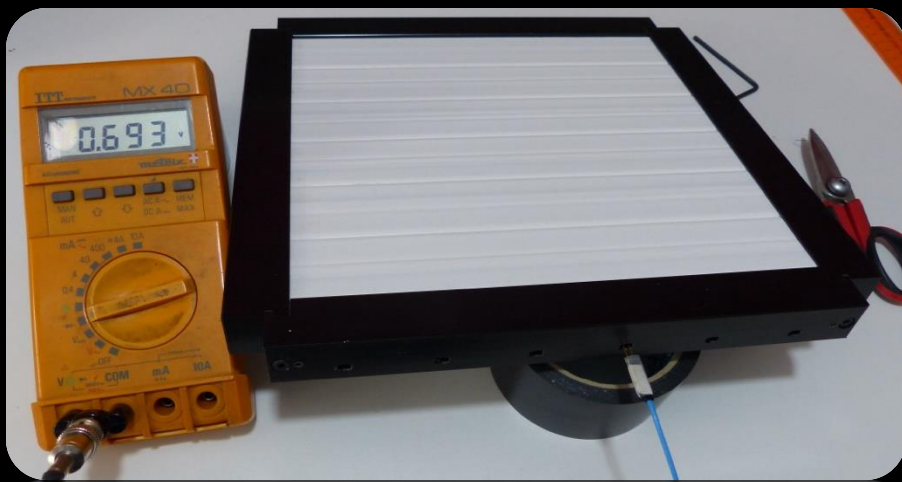
Ogni piano è costituito da 6+6 bacchette di scintillatore plastico estruso poste ortogonalmente tra loro.

In questo modo, conoscendo le coordinate X-Y, è possibile ricostruire la traiettoria dei muoni che hanno attraversato il CRC.



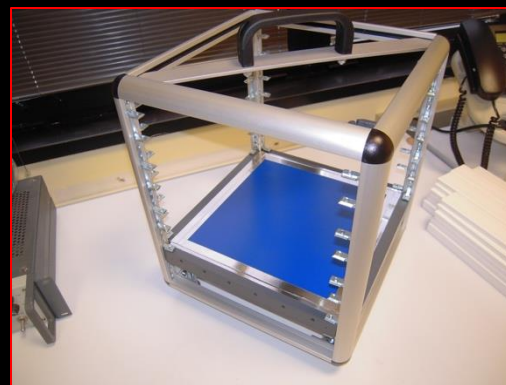
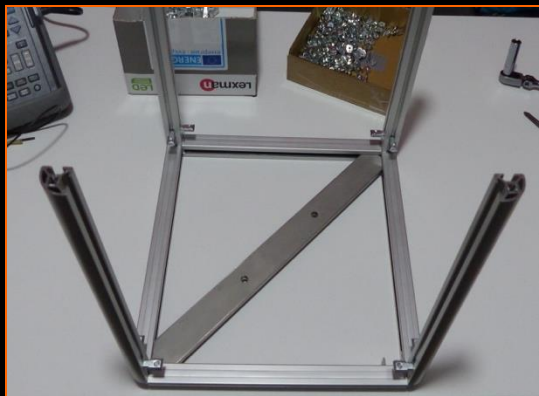


Realizzazione pratica del telescopio





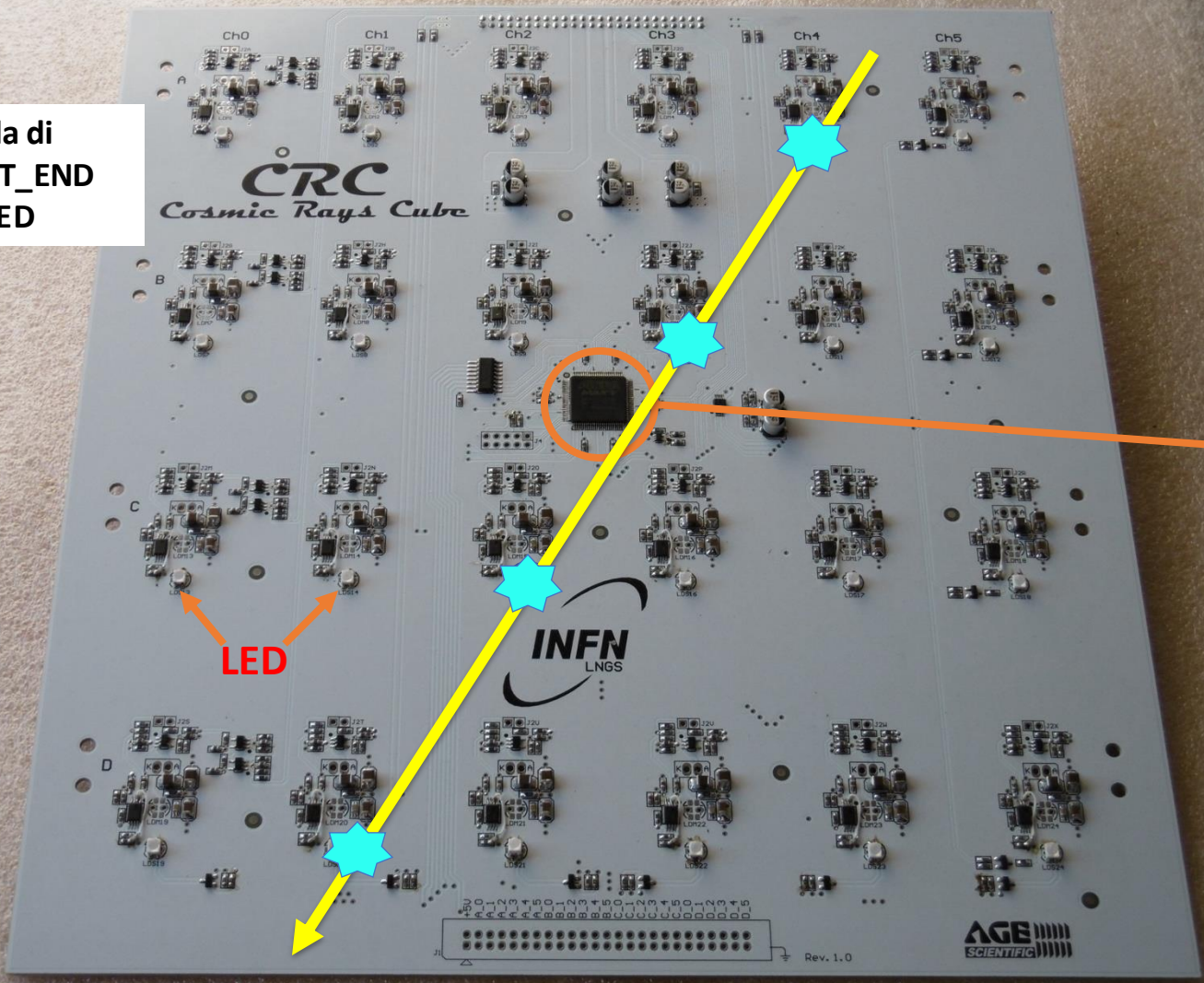
Realizzazione pratica del telescopio



Tutti i piani devono essere a tenuta di luce



Scheda di
FRONT_END
lato LED



L'elettronica di lettura

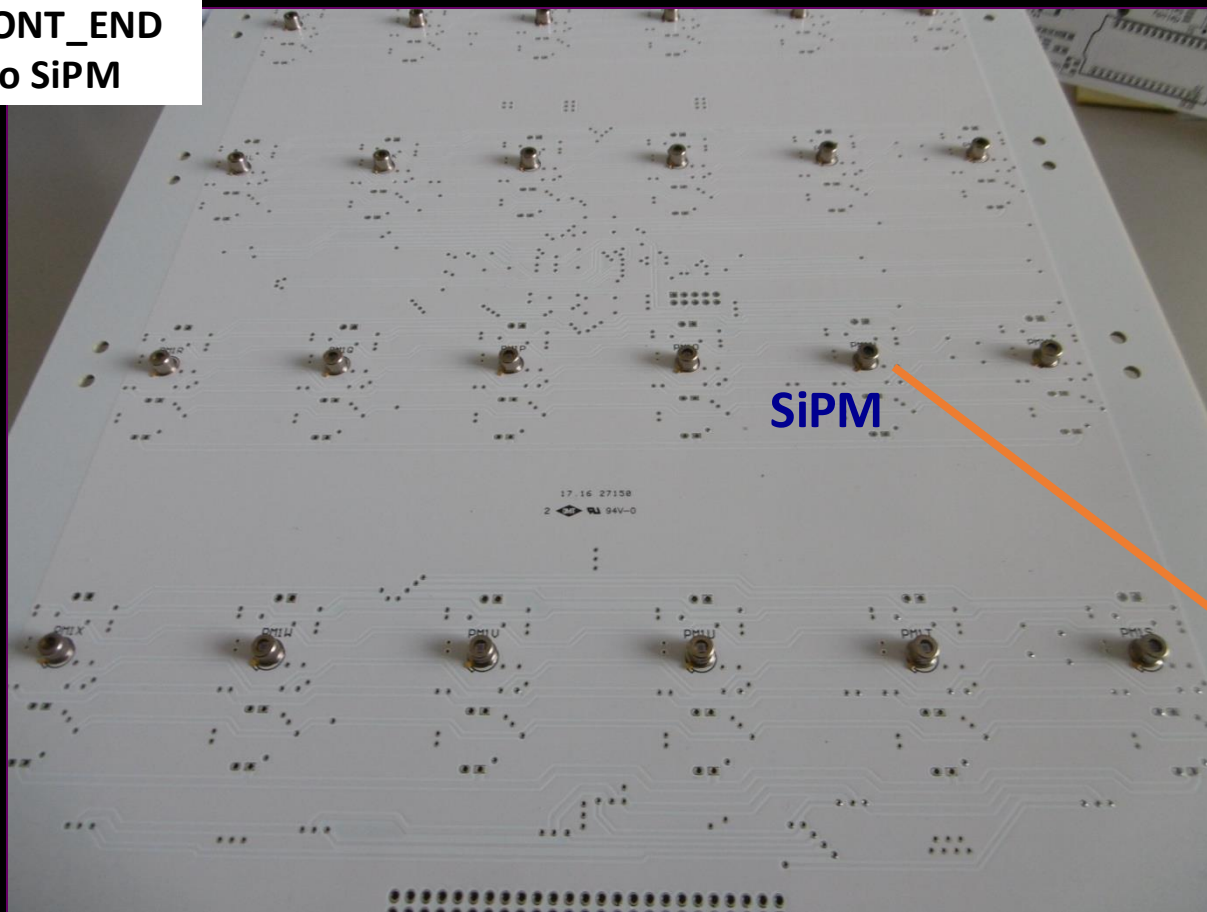


CPLD (*Complex Programmable Logic Device*) Altera MAX V:
192 macrocelle, 79 I/O, 240 blocchi logici, 100 Pin,
ritardi di propagazione circa 8 ns

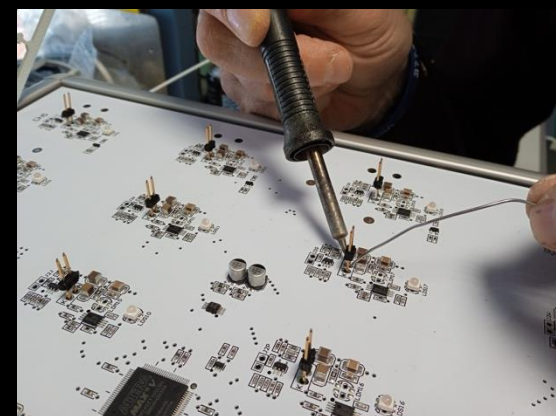


L'elettronica di lettura

Scheda di
FRONT_END
Lato SiPM

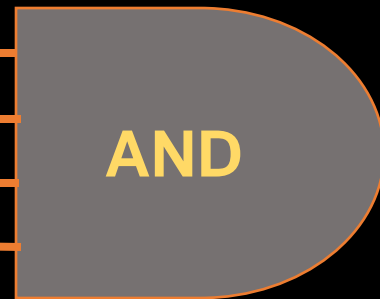
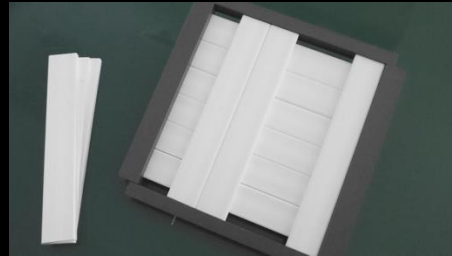
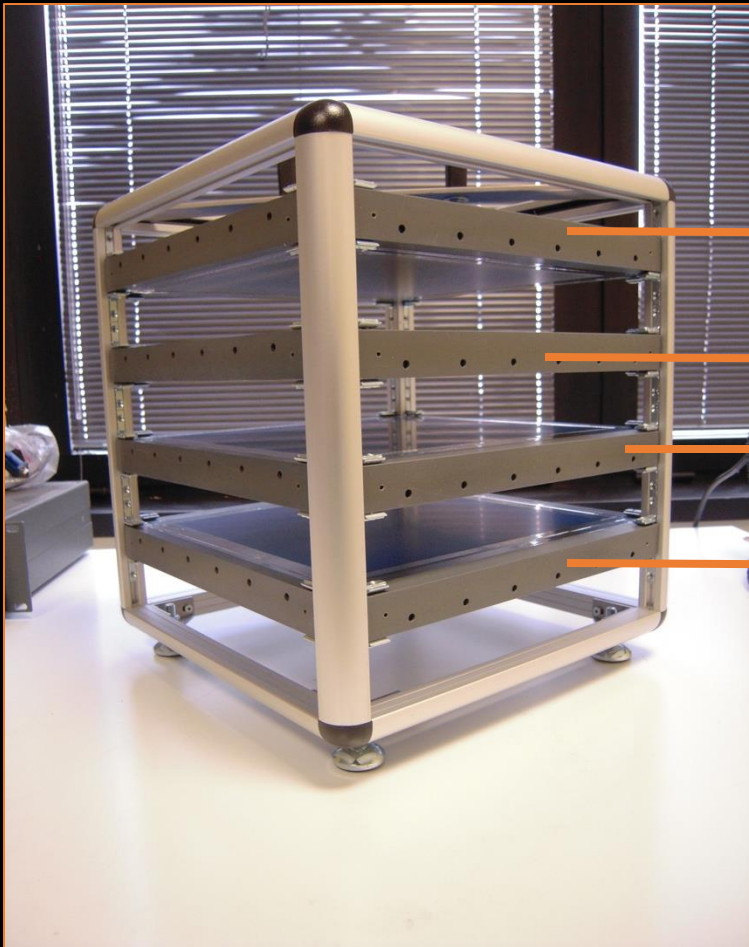


6 SiPM su 4 file. Ogni fila di SiPM viene inserita nel frame risultando così perfettamente accoppiata con le WLS interne alle bacchette scintillanti di ciascun piano.


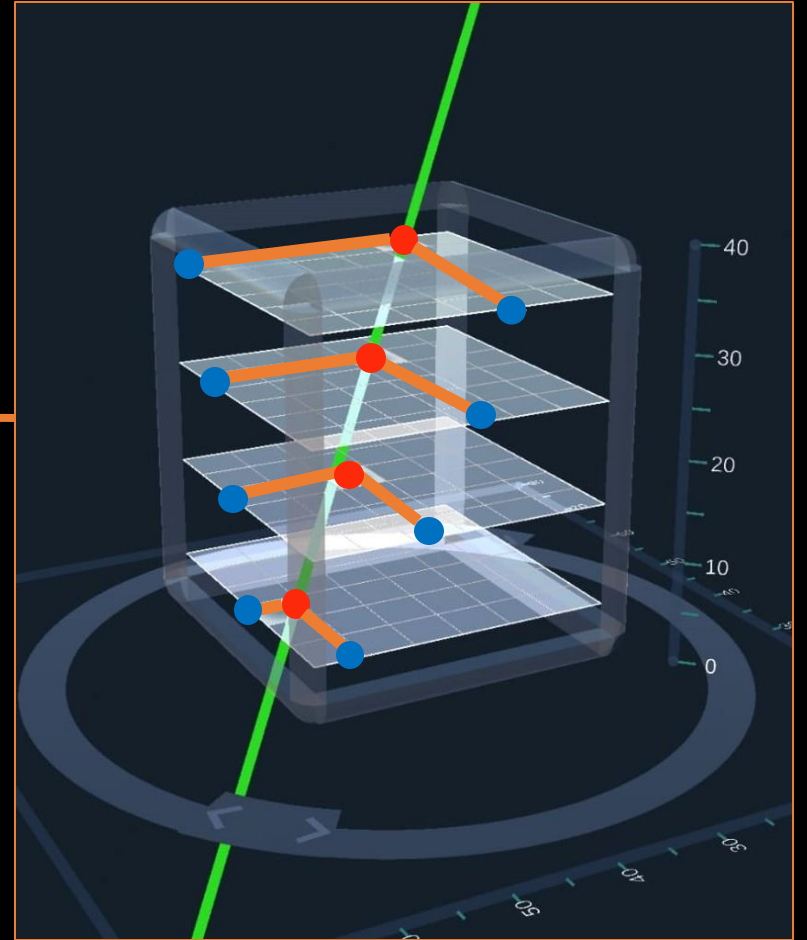




Realizzazione pratica del telescopio



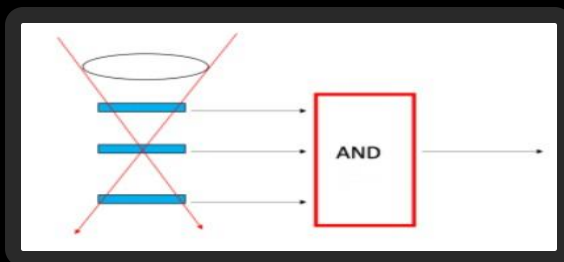
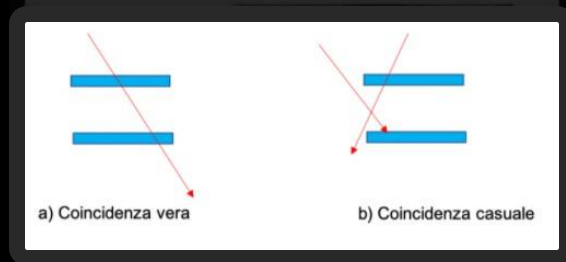
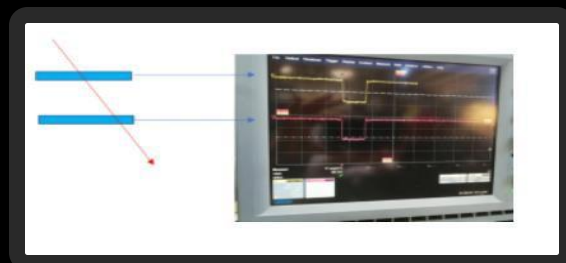
INPUT		OUTPUT
A	B	A AND B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Coincidenza tra piani

I conteggi di un singolo rivelatore sono legati a:

- ✓ Radioattività naturale
- ✓ Passaggio di particelle cariche
- ✓ Noise elettronico (i SiPM usati nel telescopio hanno una Dark Count Rate (DCR) superiore a 100 kHz/mm²).



Per ridurre i conteggi dovuti ad eventi casuali si possono mettere due piani in coincidenza, ovvero generare un segnale solo se in uno stesso arco temporale fissato a priori (gate) la particella colpisce entrambi i piani.

Anche in questo caso però si possono contare eventi casuali. Nella figura a lato si vede che avremo una coincidenza in entrambi i casi, ma nel caso a) si ha una coincidenza vera, nel caso b) una coincidenza casuale. Ecco il motivo per cui si tende ad avere gate dell'ordine di poche decine di ns.

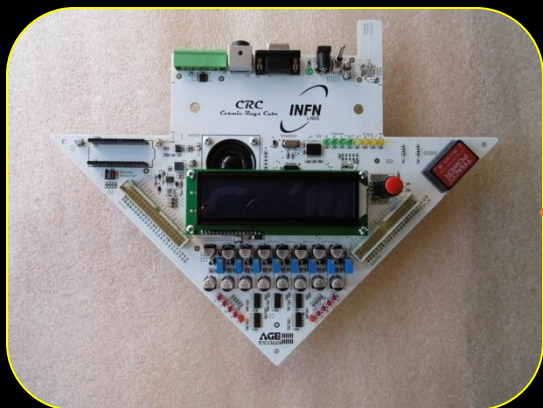
Aggiungendo più rivelatori in coincidenza la rate di coincidenze casuali diminuisce di diversi ordini di grandezza.

La rate delle coincidenze casuali è legata al numero di piani in coincidenza dalla legge:

$$R_C = n \times R_s^n \times T^{n-1}$$

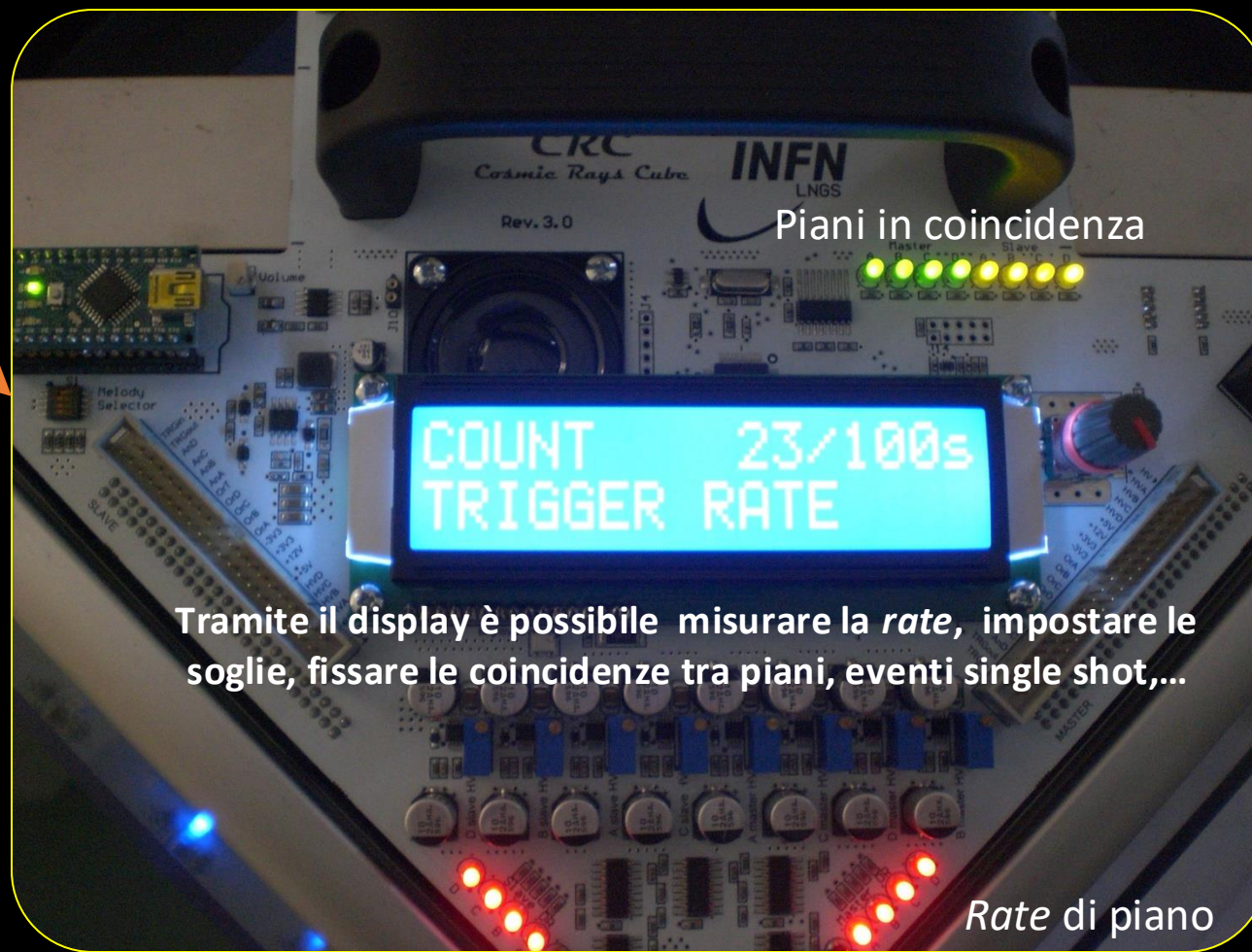
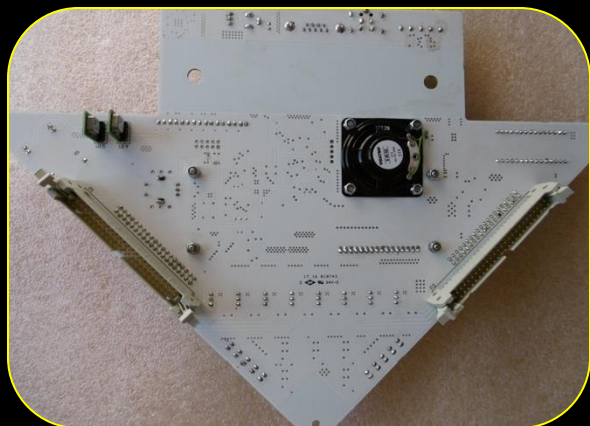
dove n è il numero di piani, T la gate fissata, R_s la rate di singola.

L'elettronica di controllo e di acquisizione (DAQ)



SCHEMA DI CONTROLLO

- Alimentazione SiPM (Vbias) = 32 V cc
- Alimentazioni del telescopio: +12,+5, +3,3, -3,3 V
- Tutto con un unico alimentatore commerciale da 12 V
- Collegamento tra le schede con soli 2 flat-cable !



Tramite il display è possibile misurare la *rate*, impostare le soglie, fissare le coincidenze tra piani, eventi single shot,...

Concetto di trigger

- Un “trigger” seleziona gli eventi interessanti fra tutti gli eventi presenti e decide se l’evento deve essere letto e registrato. Nel CRC il trigger è impostato in maniera hardware.
- Per misurare il flusso (rate) dei μ con un telescopio di scintillatori è sufficiente mettere in coincidenza più scintillatori e contare i segnali sopra un certo livello di soglia.
- Nei grandi esperimenti esistono più livelli di trigger anche molto complessi.
- Nel CRC i piani in coincidenza sono indicati dall’accensione dei led verdi e gialli.



Cosa abbiamo fatto con il CRC



Misure al variare dell'angolo durante
l'ICD (*International Cosmic Day*)



Musica cosmica con il CRC

<https://www.youtube.com/watch?v=J6Wf4haFZhw&feature=youtu.be>



Insegnanti di scuole superiori
hanno costruito quattro CRC ai LNGS



Misure a diverse altitudini del flusso di muoni



Misure di flusso dei raggi cosmici all'interno
delle gallerie del Monte Soratte (Roma)
https://www.academia.edu/66003600/Measurement_of_the_muon_flux_in_the_bunker_of_Monte_Soratte_with_the_CRC_detector

*IMPARIAMO AD
USARE L'APP*



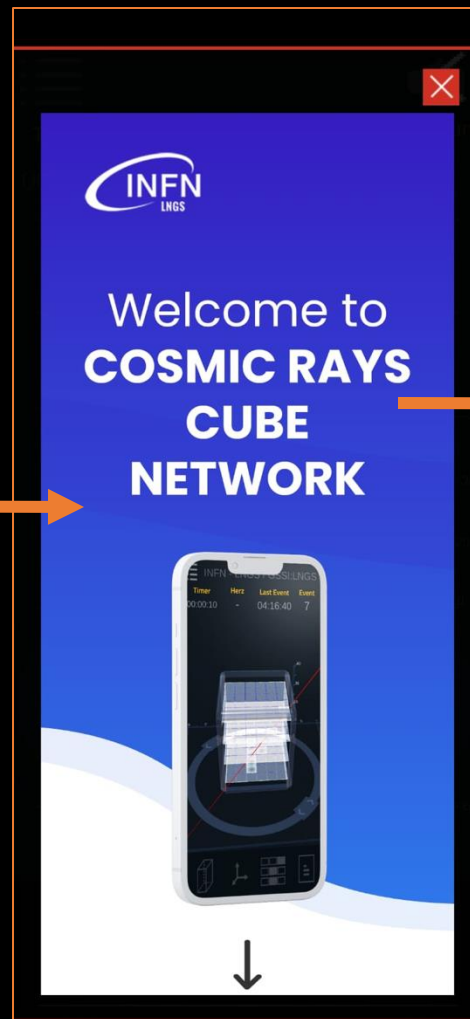
Scarichiamo l'App «Cosmic Rays Live»



Oggi, il vostro smartphone, sarà lo strumento da usare per osservare i raggi cosmici in tempo reale !!!

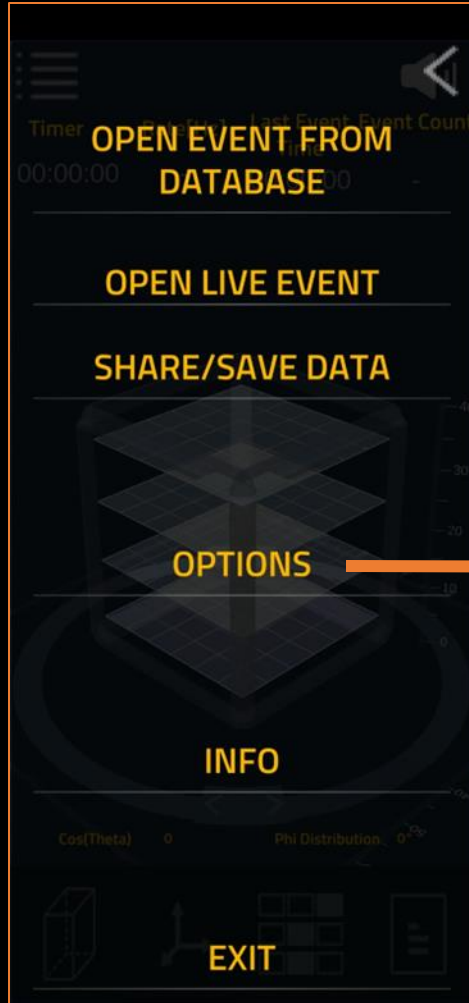


L'App «Cosmic Rays Live»





L'App «Cosmic Rays Live»





Timer 00:00:00

OPEN EVENT FROM DATABASE

OPEN LIVE EVENT →

SHARE/SAVE DATA

OPTIONS

INFO

Cos(Theta) 0 Phi Distribution 0°

EXIT



Timer 00:00:00 Rate[Hz] - Last Event Time 00:00:00 Event Count -

Milano Bicocca

Genova - Festival della Scienza

LSC

INFN - LNGS / GSSI

INGV - Roma

INFN - NAPOLI

Standby Online Offline

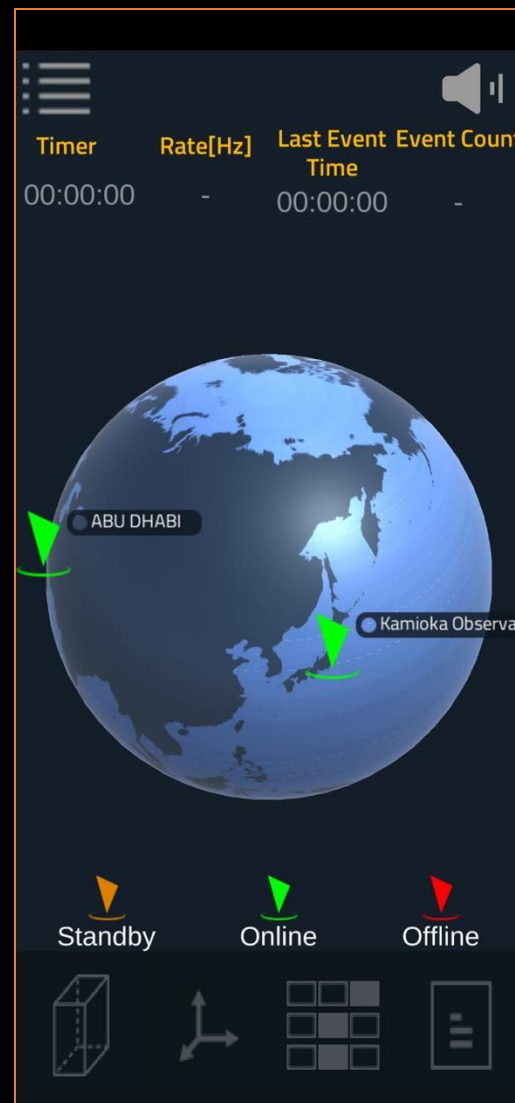


Timer 00:00:00 Rate[Hz] - Last Event Time 00:00:00 Event Count -

Kamioka Observatory (surface)

SNOLAB

Standby Online Offline



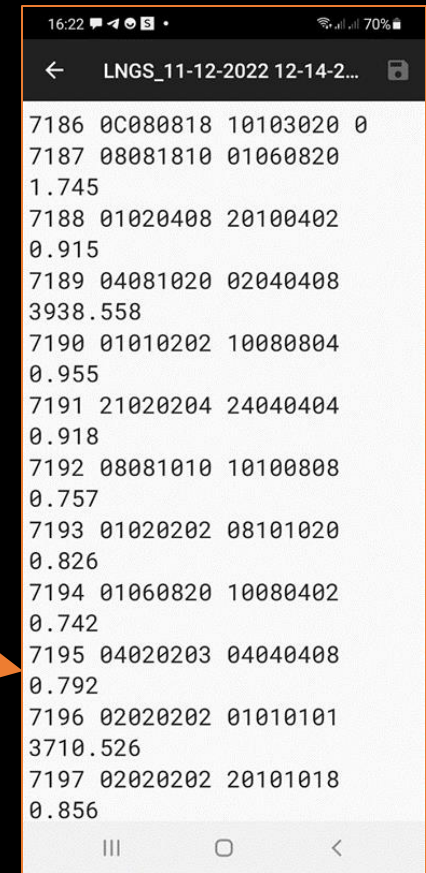
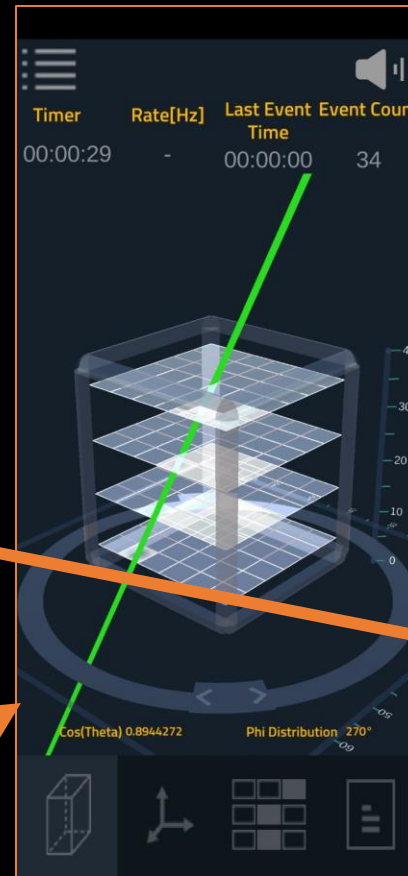
Timer 00:00:00 Rate[Hz] - Last Event Time 00:00:00 Event Count -

ABU DHABI

Kamioka Observat

Standby Online Offline

L'App «Cosmic Rays Live»: dove trovo i dati?

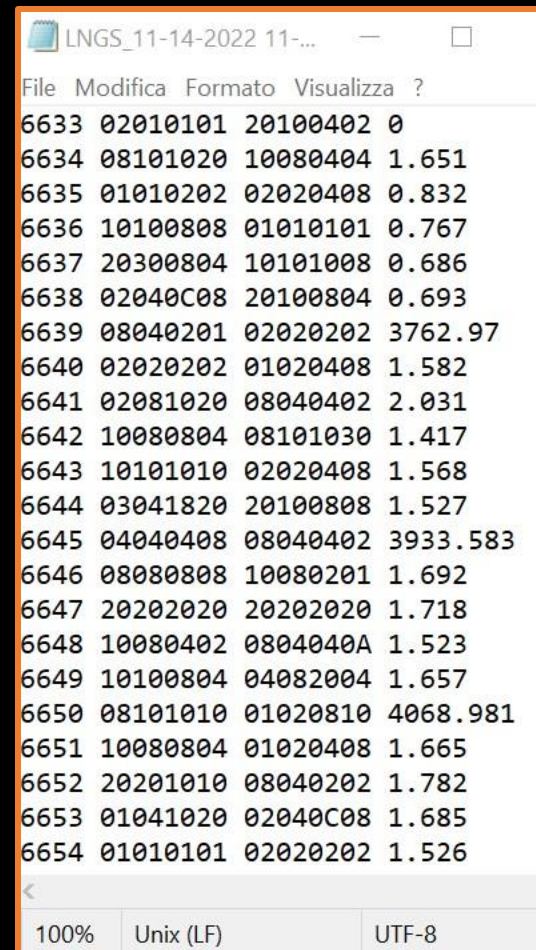


Per il sistema Android: andare nella cartella download (si trova in genere nella cartella File Manager), cercare la cartella CRC. Lì si trovano i dati che vengono salvati automaticamente ogni volta che si clicca su un CRC funzionante in rete.

L'App «Cosmic Rays Live»... ...per chi ha un i-phone

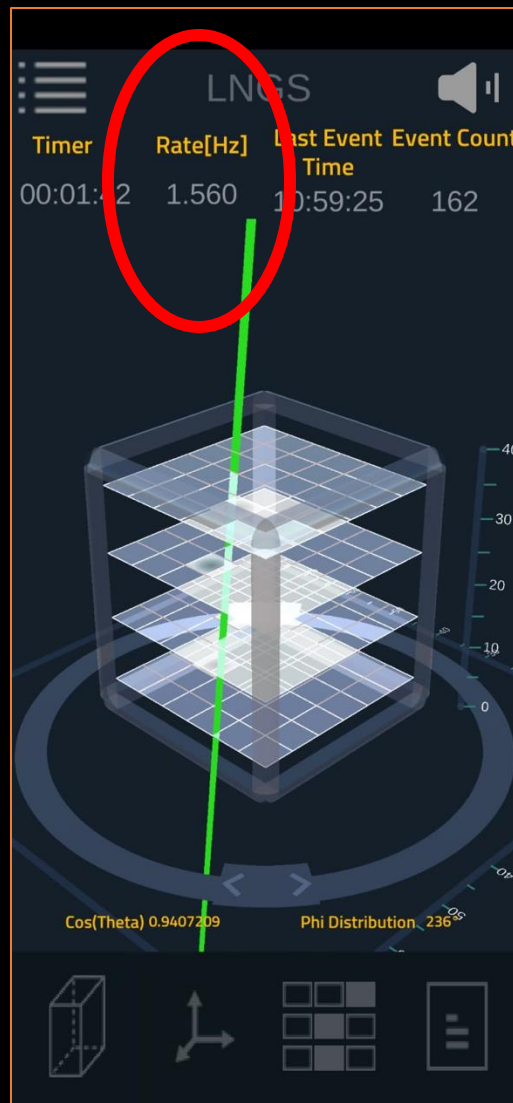


Per il sistema i-OS l'unico modo semplice per salvare i dati è questo:
attraverso il menu selezionare OPEN LIVE EVENT e scegliere un CRC in rete. Dopo aver raccolto il numero di eventi desiderato, anziché uscire con EXIT, andare nel menù e scegliere SHARE/SAVE DATA. Quindi selezionare la modalità di condivisione (e-mail, whatsApp,...). Il file sarà salvato in formato txt.



File	Modifica	Formato	Visualizza ?
6633	02010101	20100402	0
6634	08101020	10080404	1.651
6635	01010202	02020408	0.832
6636	10100808	01010101	0.767
6637	20300804	10101008	0.686
6638	02040C08	20100804	0.693
6639	08040201	02020202	3762.97
6640	02020202	01020408	1.582
6641	02081020	08040402	2.031
6642	10080804	08101030	1.417
6643	10101010	02020408	1.568
6644	03041820	20100808	1.527
6645	04040408	08040402	3933.583
6646	08080808	10080201	1.692
6647	20202020	20202020	1.718
6648	10080402	0804040A	1.523
6649	10100804	04082004	1.657
6650	08101010	01020810	4068.981
6651	10080804	01020408	1.665
6652	20201010	08040202	1.782
6653	01041020	02040C08	1.685
6654	01010101	02020202	1.526

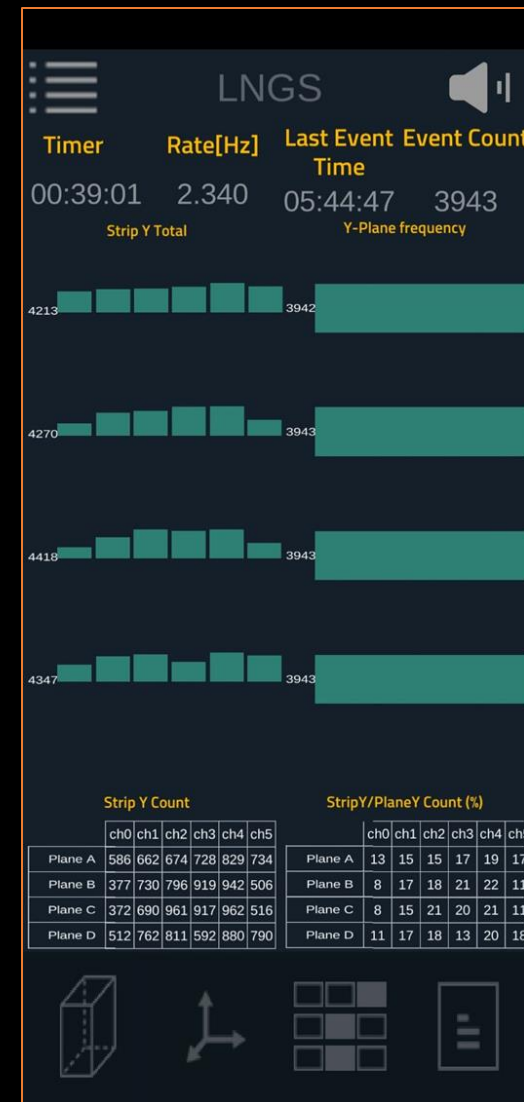
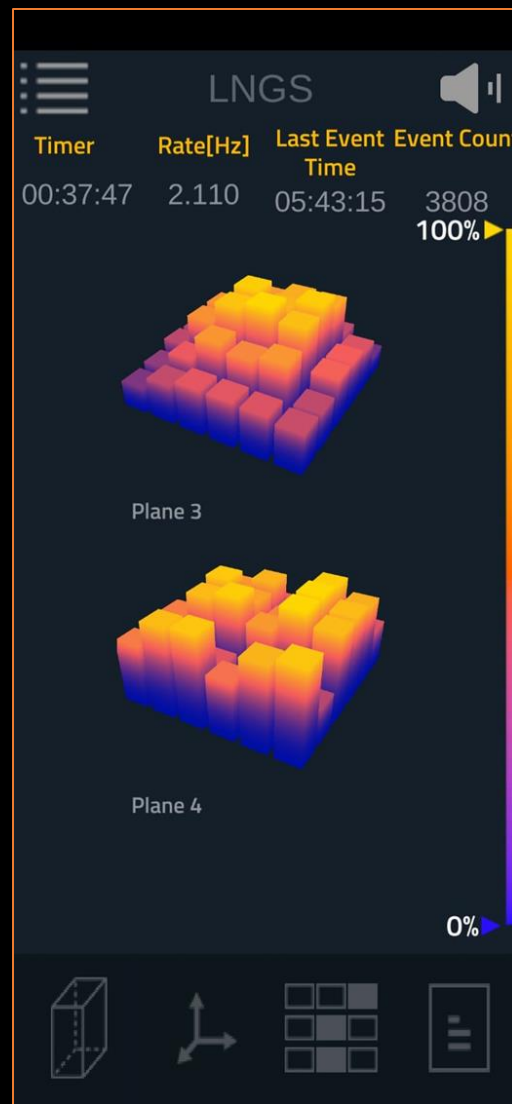
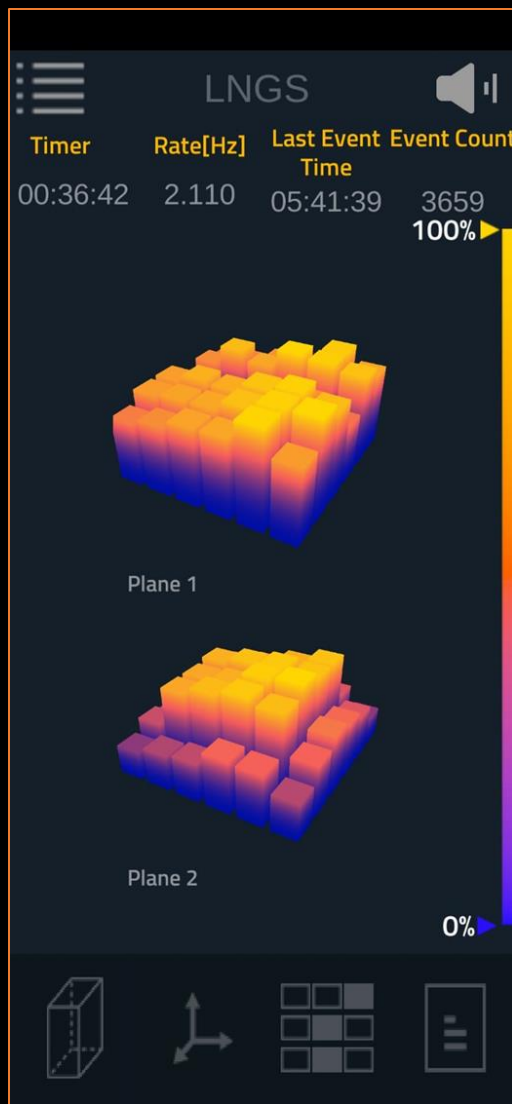
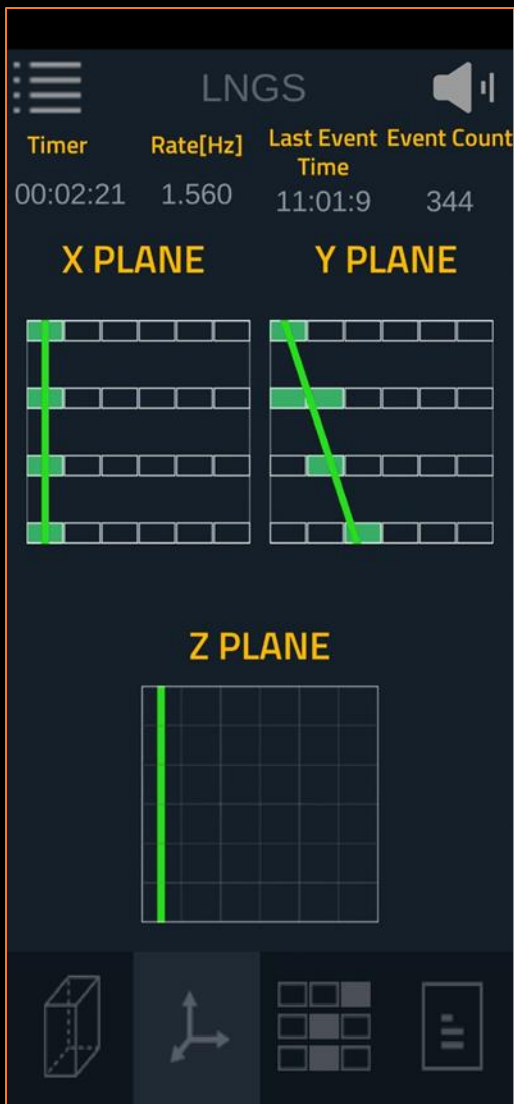
100% Unix (LF) UTF-8



Rate in Hz è il numero di muoni al secondo visti dal CRC selezionato (LNGS nel nostro caso). Il valore si aggiorna ogni 100 secondi. Gli anni scorsi abbiamo fatto 3 misure per ciascun angolo, prendendo tre valori consecutivi di rate per angolo. Il flusso al secondo di muoni per il nostro CRC sarà pari a:

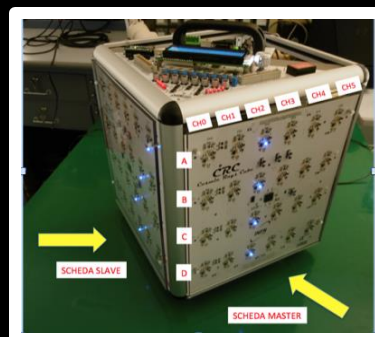
$$\text{Event Count}/300$$

Per azzerare il contatore (Timer) usciamo e rientriamo dal CRC LNGS cliccando prima in alto a sx e poi su EXIT.



PROVIAMO A DECODIFICARE E TRACCIARE... USIAMO EXCEL E GEOGEBRA

- Un singolo dato di CRC è costituito da un numero di evento, da due stringhe esadecimali e dal ΔT tra un vento e l'altro. La prima stringa esadecimale si riferisce alla scheda slave (vista X, guardando il telescopio è la scheda a sx), la seconda stringa si riferisce alla scheda master (vista Y, guardando il telescopio è quella a dx). Per individuare la barra di scintillatore colpita dal muone si fa così:
 - si convertono le due stringhe esadecimali in binario, usando Excel.
 - partendo dalla sinistra delle due stringhe di 32 bit, si tolgono gli zeri posizionati ai posti 1, 2, 9, 10, 17, 18, 25, 26. Si ottengono due stringhe di 24 bit;
 - la sequenza dei primi 6 bit relativa alla scheda slave va posizionata da sx verso dx nella riga più in alto della matrice 6x4 (numero delle bacchette di scintillatore x numero di piani) della scheda slave, la seconda sequenza di 6 bit nella seconda riga e così via sino alla quarta riga. Gli altri rimanenti 24 bit vanno posizionati con la stessa logica nella matrice 6x4 della scheda master.



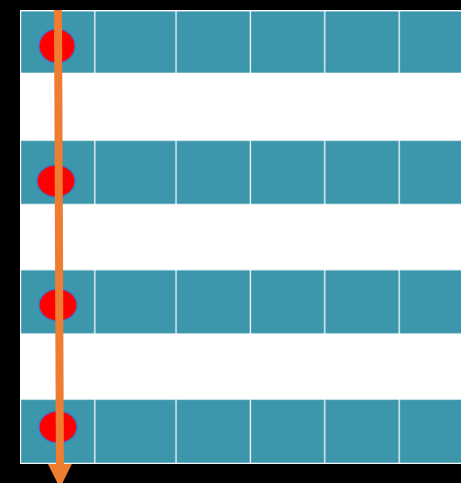
```

01-09-2021 19-47-17.txt
2999 02040820 02040808
3000 06020202 20101008
3001 08040202 20202020
3002 01040810 01010101
3003 10101008 10101010
3004 20100402 10102020
3005 01020408 01010101
3006 20100802 01020810
3007 01010202 01010101
3008 01010101 01020202
3009 01010101 02020201
3010 03020408 01030408
3011 02020202 10080402
3012 20080A09 040C0808
3013 10080804 02020204
3014 02020404 20202020
3015 02060202 01041020
3016 20101008 20202020
3017 04060606 0808080C
3018 04040808 02010001
3019 08080404 06030404
3020 08101010 10100804
3021 08101010 02040808
3022 20202020 04081020
3023 08040201 01020806
3024 02020404 20100818
    
```

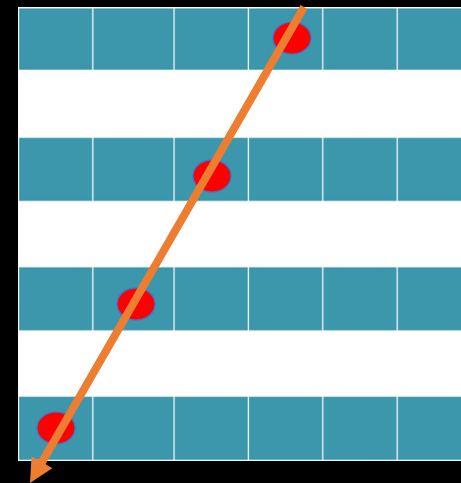
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
A	1	0	1	0
B	1	0	1	1
C	1	1	0	0
D	1	1	0	1
E	1	1	1	0
F	1	1	1	1

Tabella di conversione Esadecimale-Binario

Scheda SLAVE o vista X



Scheda MASTER o vista Y





...e adesso passiamo alle misure

*La vera saggezza sta in colui
che sa di non sapere*

(Socrate)

Qualche sito di informazione e divulgazione scientifica

- ❑ <http://scienzapertutti.inf.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.scienzagiovane.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).