



UN TELESCOPIO ED UN'APP PER OSSERVARE I MUONI

LNGS, 13 Novembre 2025

Attanasio Candela

Laboratori Nazionali del Gran Sasso

attanasio.candela@lngs.infn.it

*GLI INGREDIENTI DEL
COSMIC RAYS CUBE
(CRC)*



- ✓ *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)*

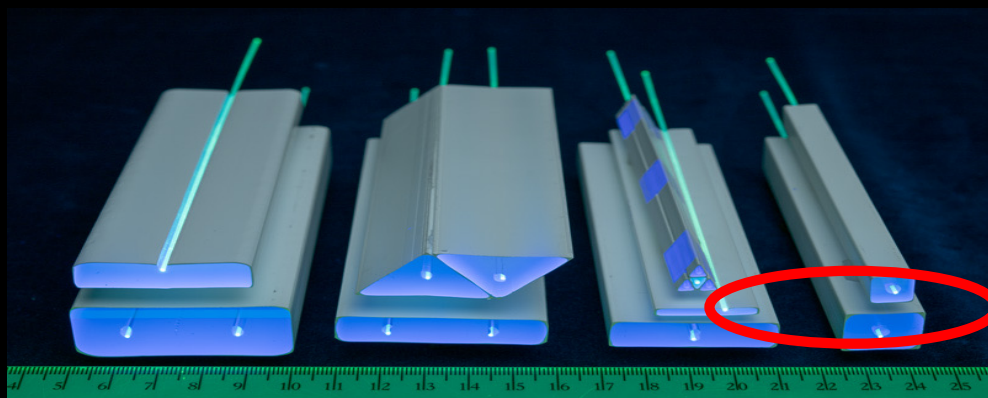


Lo scintillatore plastico

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 con limitata attenuazione



Altre proprietà:

- 1) Emissione spettrale compatibile con i rivelatori di luce
- 2) Linearità (luce emessa proporzionale energia depositata)
- 3) Rapida emissione della luce al passaggio di una particella carica
- 4) Tempo morto corto

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

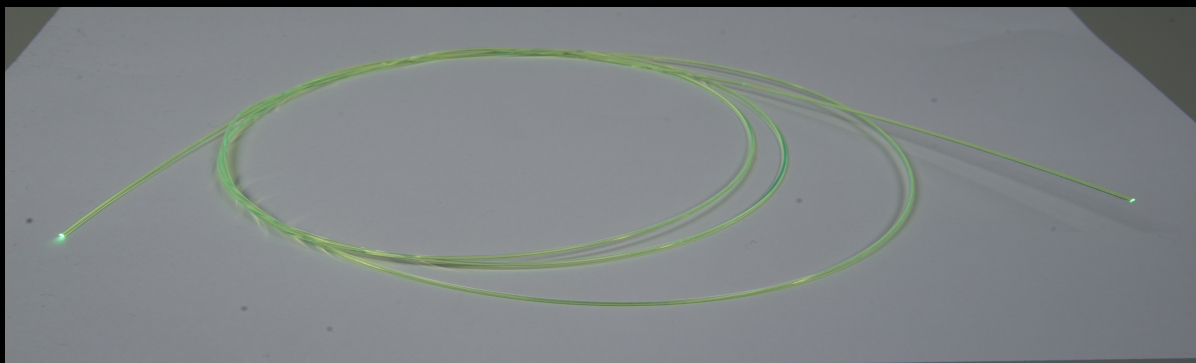
Motivated by a need for lower cost plastic scintillation detectors, we have tested commercially available polystyrene pellets in order to produce scintillating materials that can be extruded into various shapes. Selection of the raw materials is discussed. Two techniques are described that add wavelength 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).



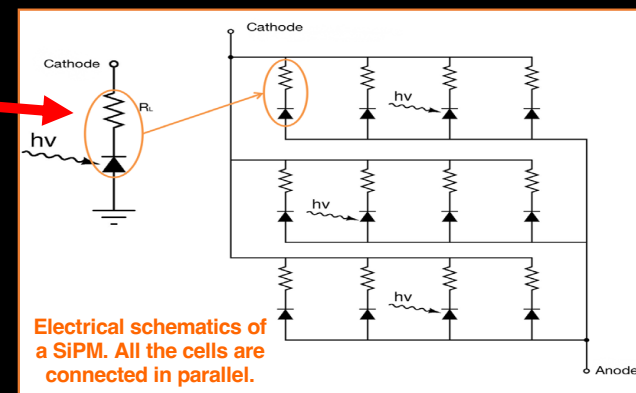
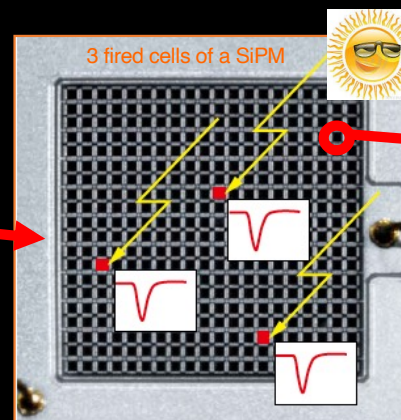
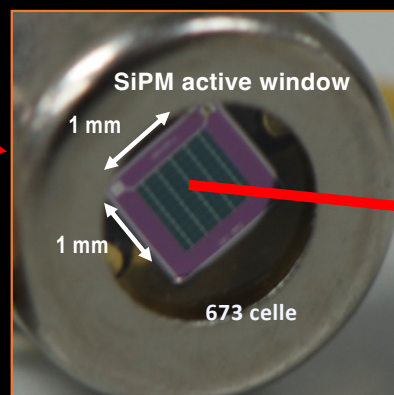
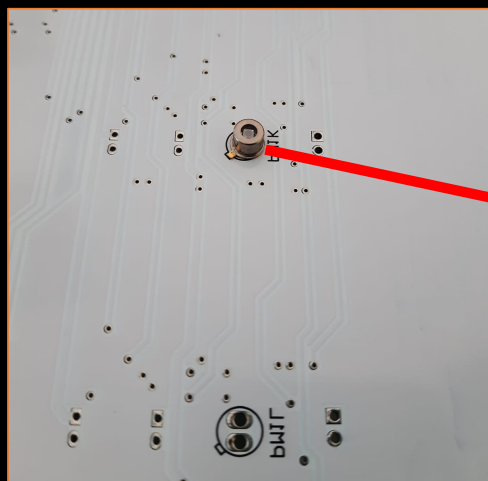
Common Properties of Single-clad Fibers -	
Core material	Polystyrene
Core refractive index	1.60
Density	1.05
Cladding material	Acrylic
Cladding refractive index	1.49
Trapping efficiency, round fibers	3.44% minimum
No. of H atoms per cc (core)	4.82×10^{22}
No. of C atoms per cc (core)	4.85×10^{22}
No. 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

Lecture consigliate:

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

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

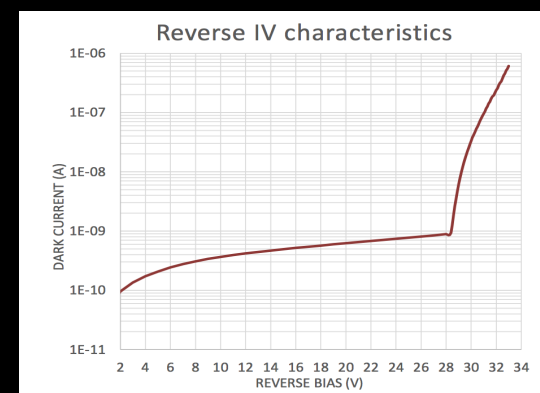
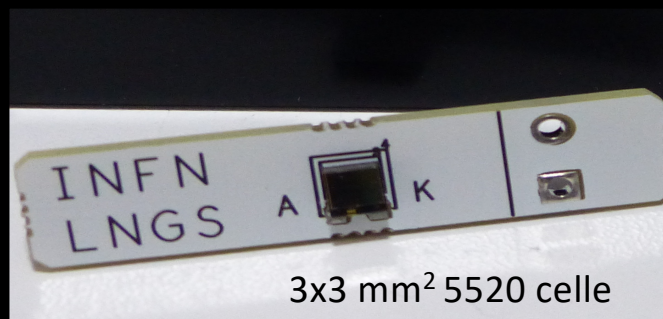
<https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mppc-sipms>



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).

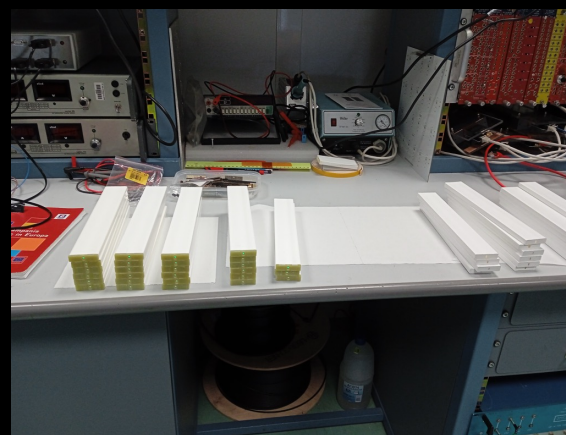
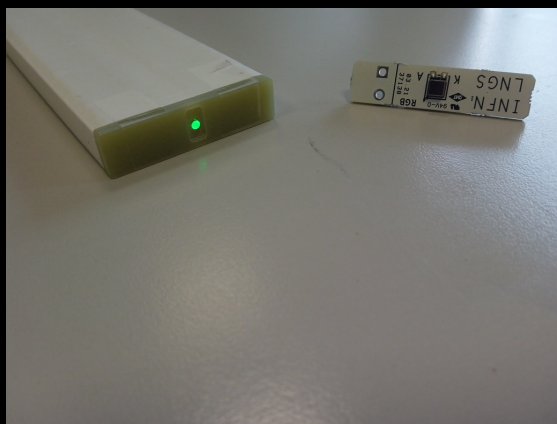
Data sheet dei SiPM usati per il CRC:

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



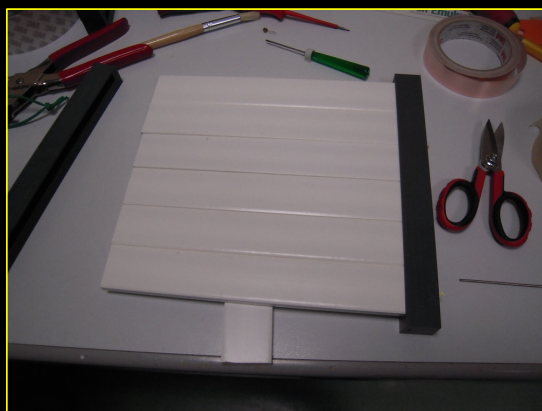
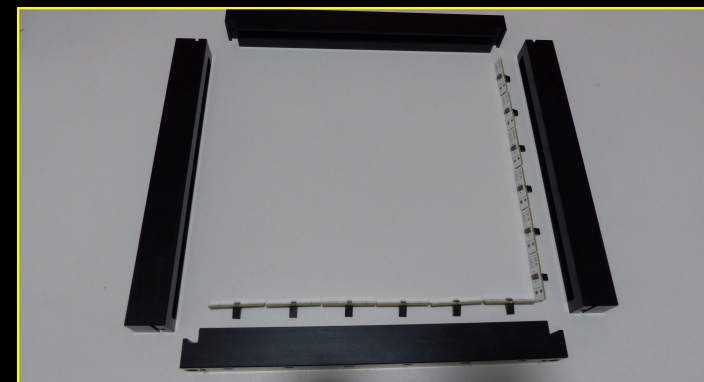
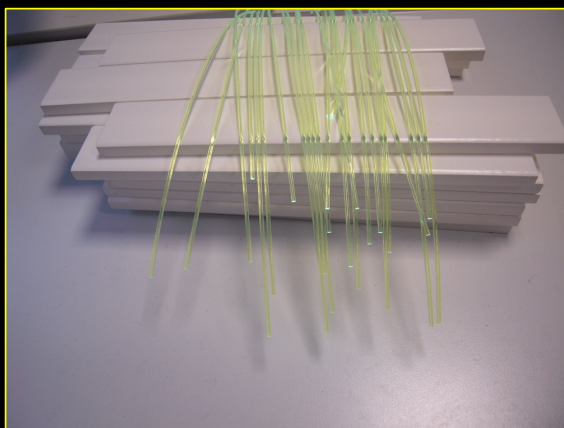


Fasi di costruzione di un CRC con SiPM 3x3 mm²

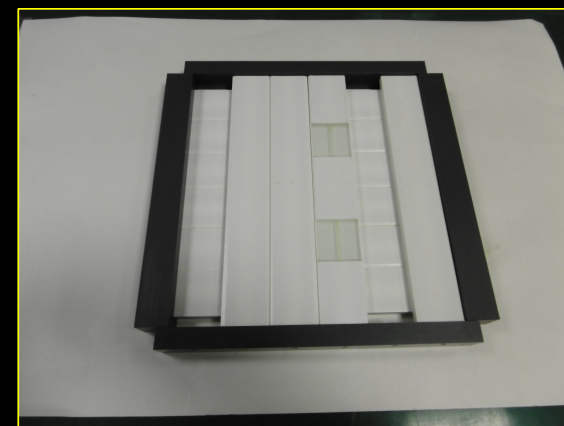




Realizzazione pratica del telescopio

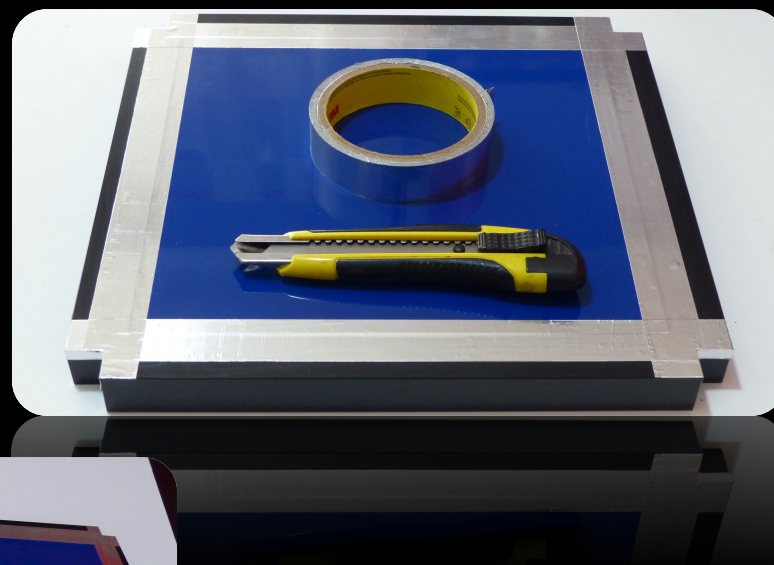


Ogni piano è costituito da 6+6 bacchette di scintillatore plastico estruso poste ortogonalmente tra loro.
In questo modo, conoscendo le coordinate X-Y, è possibile ricostruire la traiettoria dei muoni che hanno attraversato il CRC.



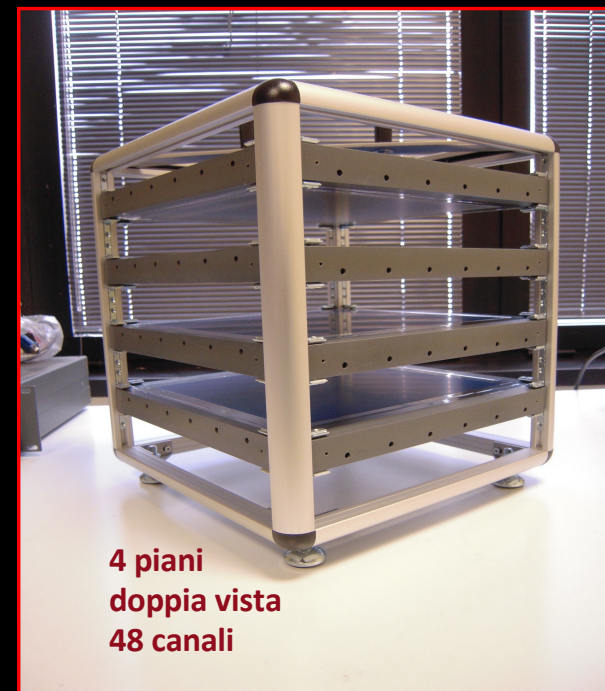
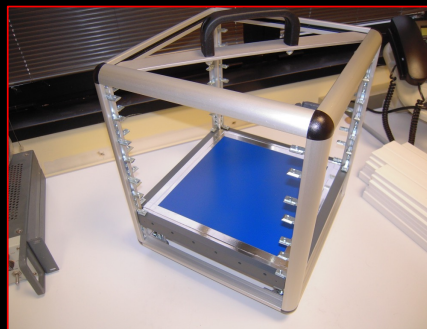
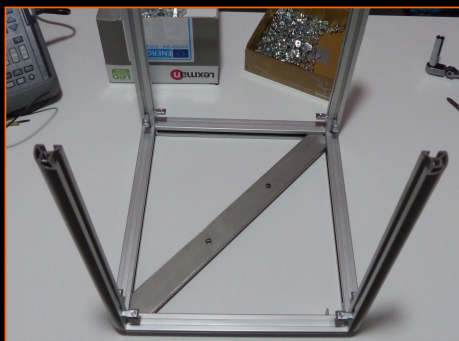


Realizzazione pratica del telescopio





Realizzazione pratica del telescopio

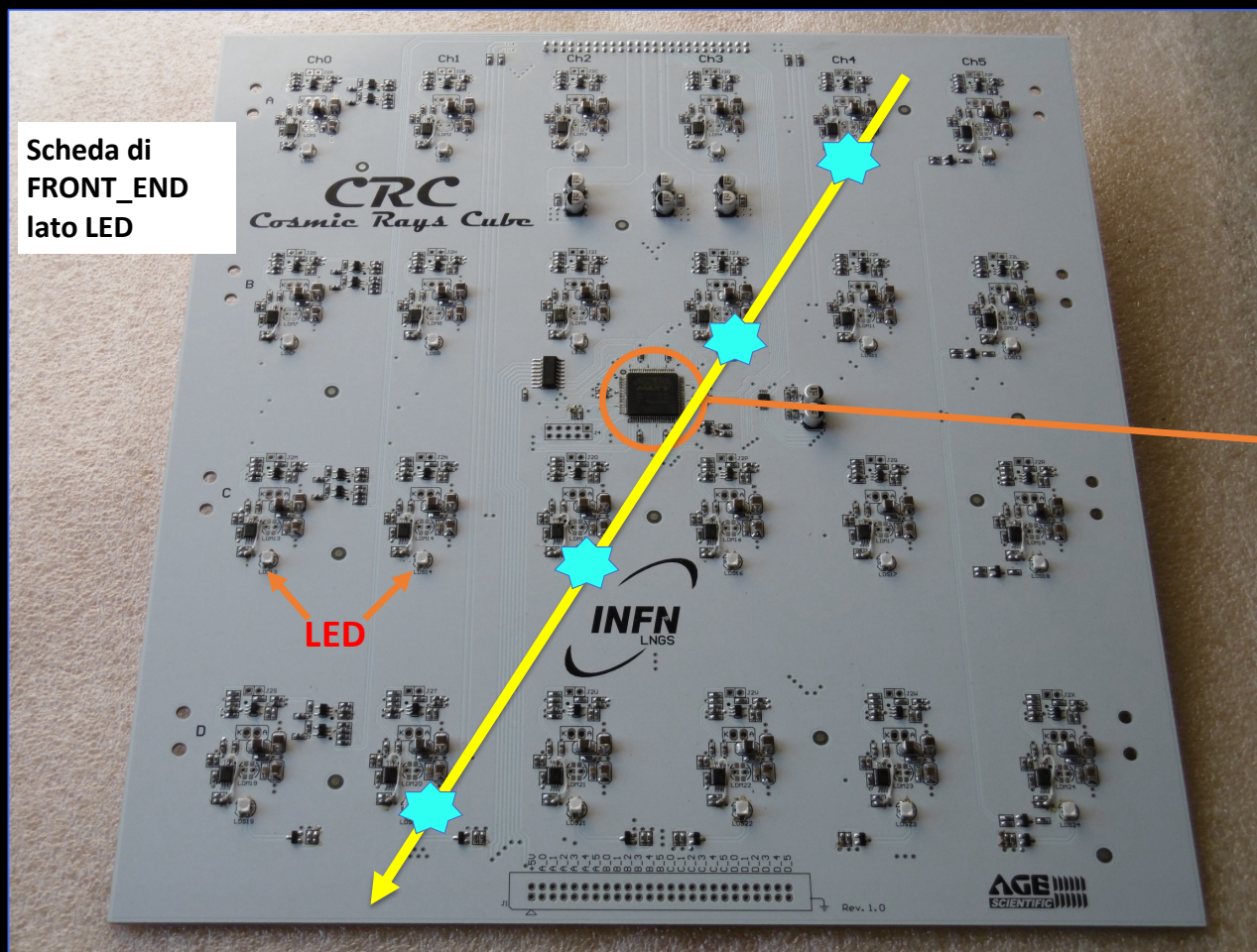


**4 piani
doppia vista
48 canali**

Tutti i piani devono essere a tenuta di luce



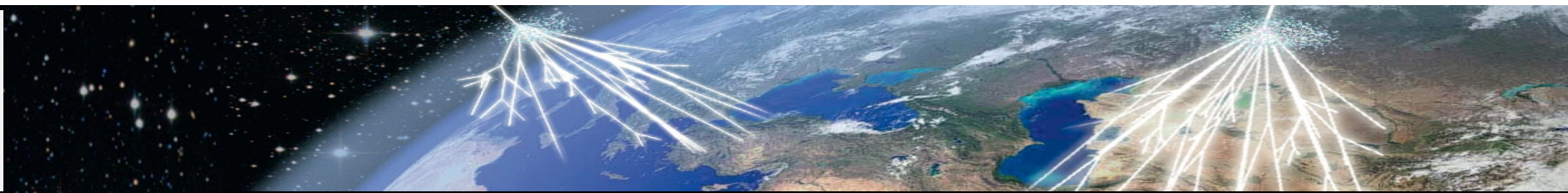
Scheda di
FRONT_END
lato LED



L'elettronica di lettura

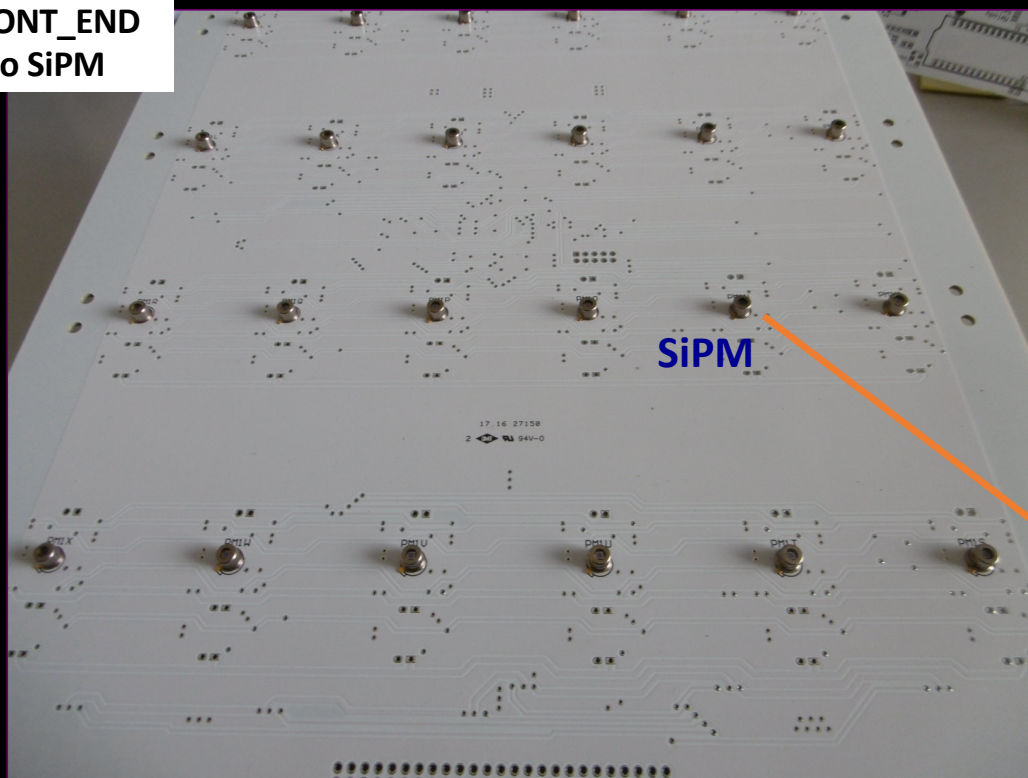


CPLD (Complex Programmable Logic Device) Altera MAX V:
192 macrocelle, 79 I/O, 240 blocchi logici, 100 Pin,
ritardi di propagazione circa 8 ns

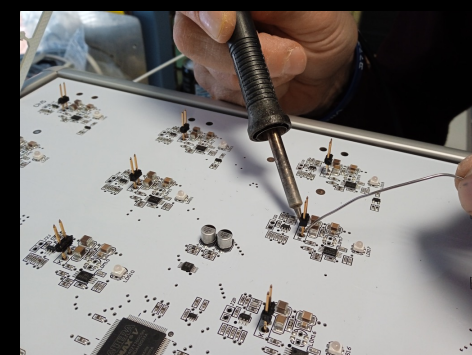


L'elettronica di lettura

Scheda di
FRONT_END
Lato SiPM

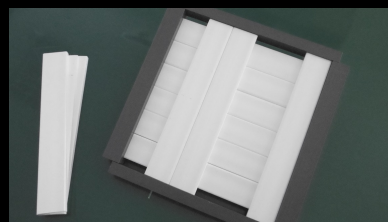
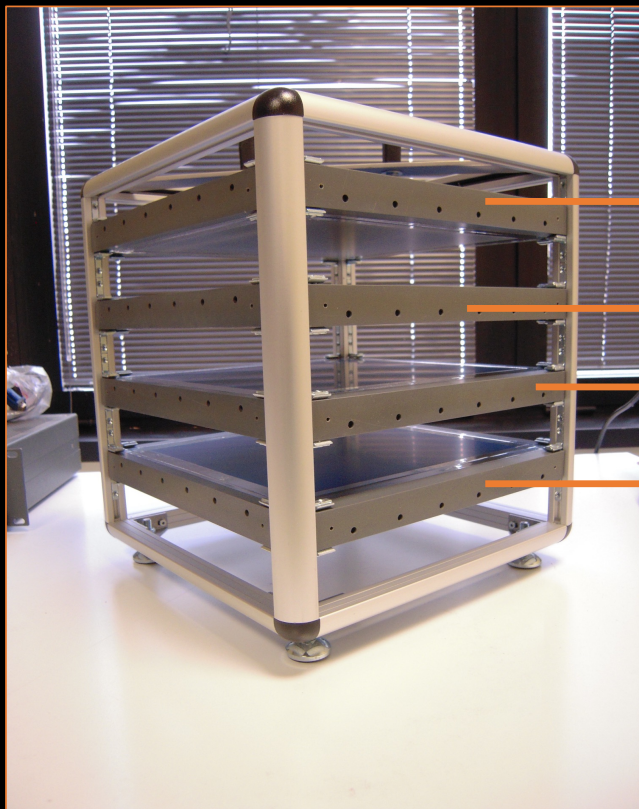


6 SiPM su 4 file. Ogni fila di SiPM viene inserita nel frame risultando così perfettamente accoppiata con le WLS interne alle bacchette scintillanti di ciascun piano.



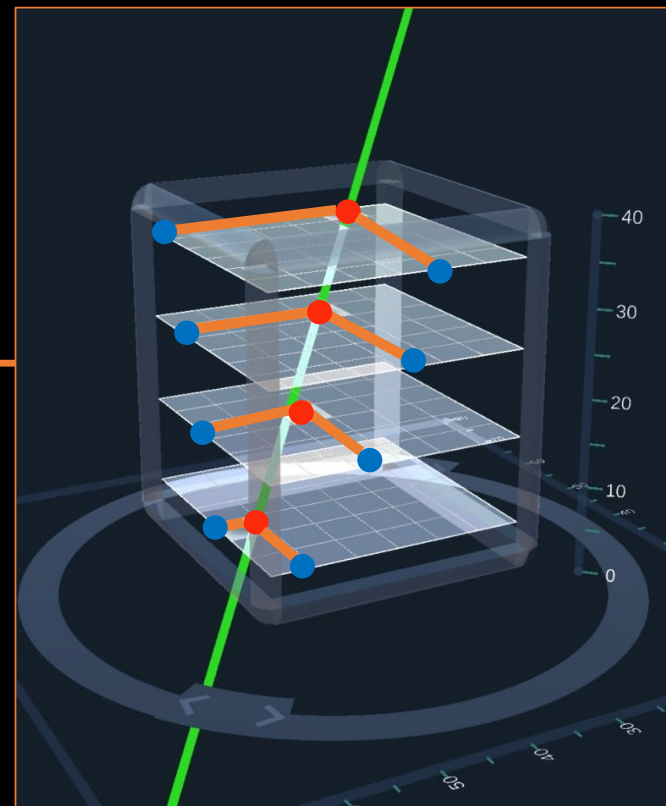


Realizzazione pratica del telescopio



AND

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





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 viene impostato in maniera hardware consentendo di mettere in coincidenza o meno alcuni piani del detector.
- Nei grandi esperimenti di fisica delle particelle esistono più livelli di trigger anche molto complessi con grande utilizzo di software

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.

Nel CRC i piani in coincidenza sono indicati dall’accensione dei led verdi e gialli.





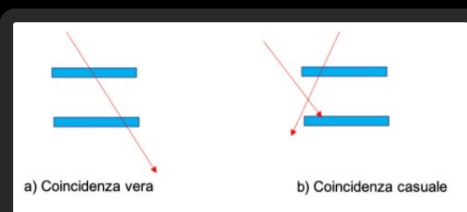
Coincidenza tra piani

Ma attenzione: i conteggi di un singolo rivelatore sono dovuti 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 la particella colpisce entrambi i piani in uno stesso arco temporale fissato a priori (*gate*).

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.

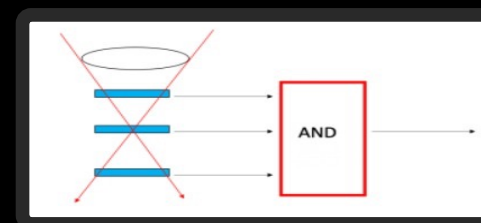


Aggiungendo più rivelatori in coincidenza la rate di coincidenze casuali diminuisce di diversi ordini di grandezza.

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

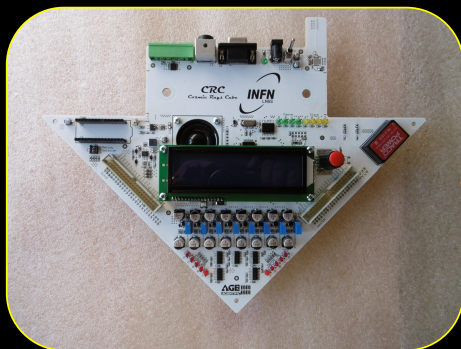
$$R_c = n \times R_s^n \times T^{n-1}$$

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



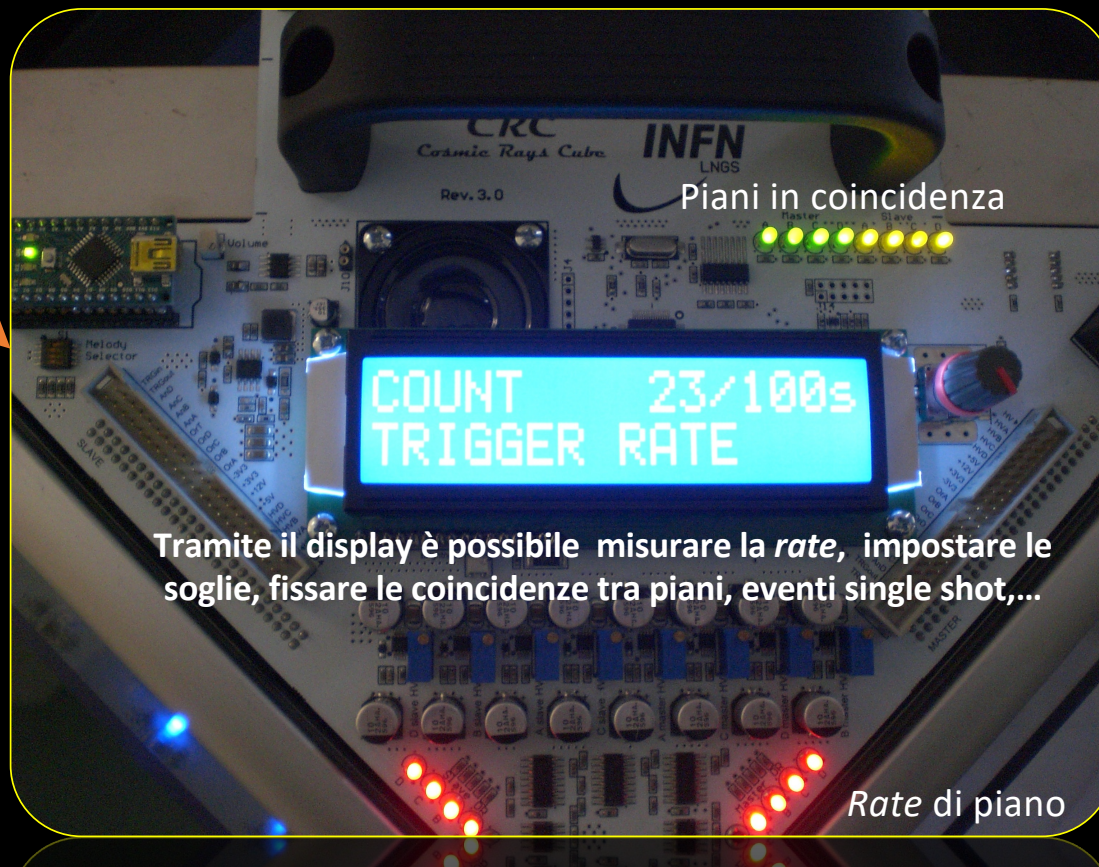
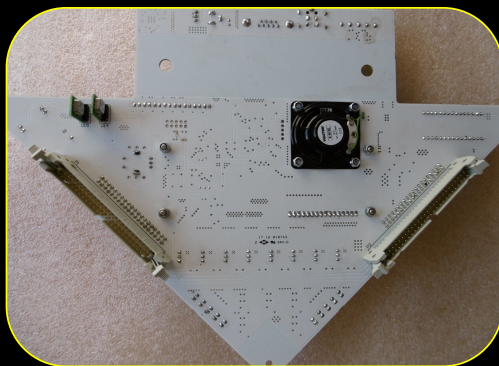


L'elettronica di controllo e di acquisizione (DAQ)



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 da 12 V
Collegamento tra le schede con soli 2 flat-cable !



*IMPARIAMO AD
USARE L'APP*



Cosa abbiamo fatto con il CRC

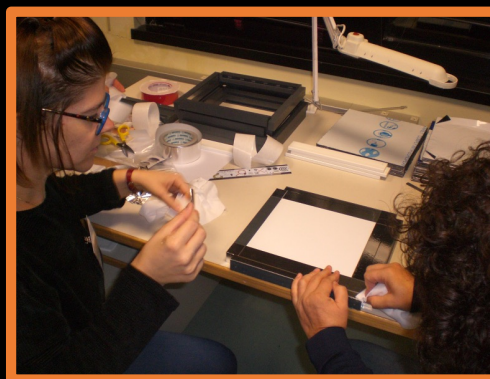


Misure al variare dell'angolo durante
l'ICD (*International Cosmic Day*)



Musica cosmica con il CRC

[https://www.youtube.com/watch?v=J6Wf4haFZhw
&feature=youtu.be](https://www.youtube.com/watch?v=J6Wf4haFZhw&feature=youtu.be)



Insegnanti di scuole superiori
hanno costruito dei 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



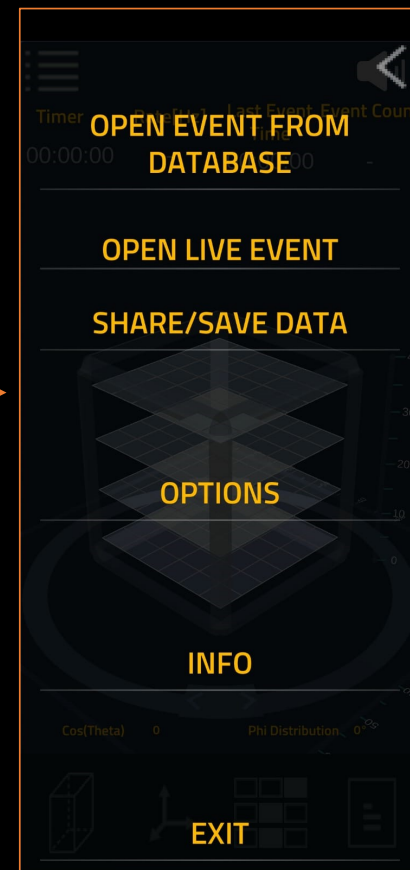
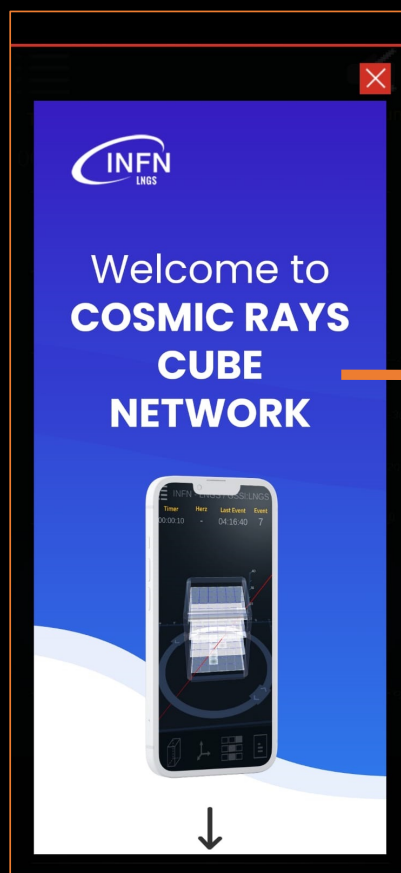
Scarichiamo l'App «Cosmic Rays Live»



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

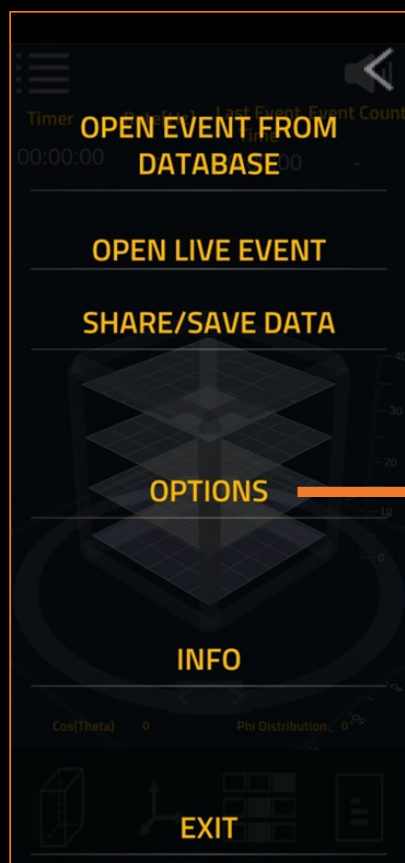


L'App «Cosmic Rays Live»





L'App «Cosmic Rays Live»





Timer 00:00:00

Rate[Hz] -

Last Event Time 00:00:00

Event Count 0

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 0

University of Innsbruck, Institut Nord

LSC

Centro

Sud

Standby

Online

Offline

SELECTION

Timer 00:00:00

Rate[Hz] -

Last Event Time 00:00:00

Event Count 0

DO YOU WANT TO CONNECT TO WHICH TELESCOPE ?

LNGS

GSSI

INFN - Roma 1

INFN - Roma 2

INFN - Roma 3

INGV - Roma

LNGS

Timer 00:00:20

Rate[Hz] -

Last Event Time 10:06:47

Event Count 33

184 PM

Cos(Theta) 0,978232

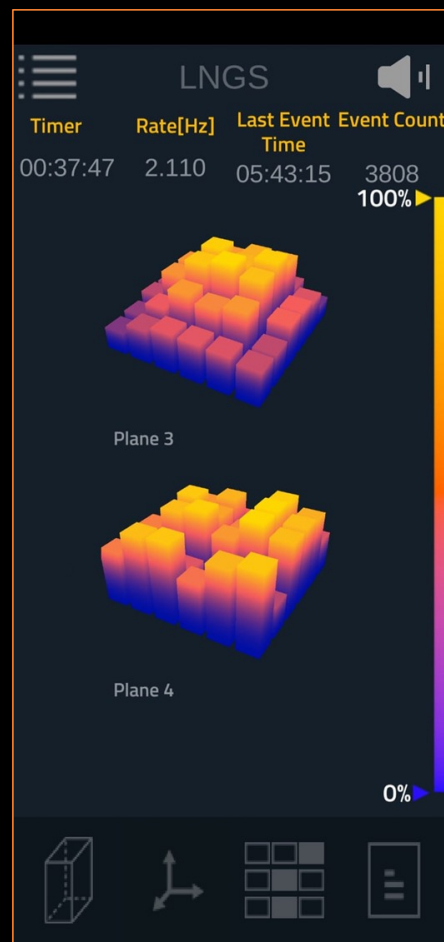
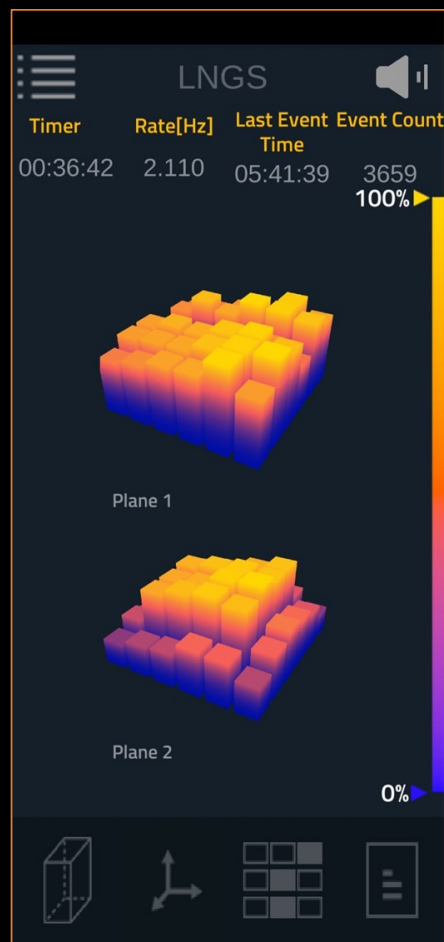
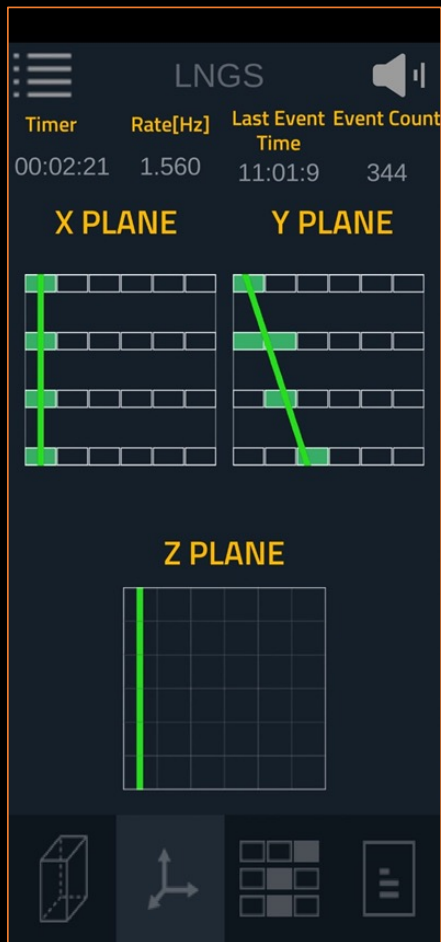
alt angle

Phi Distribution 315°

Lat

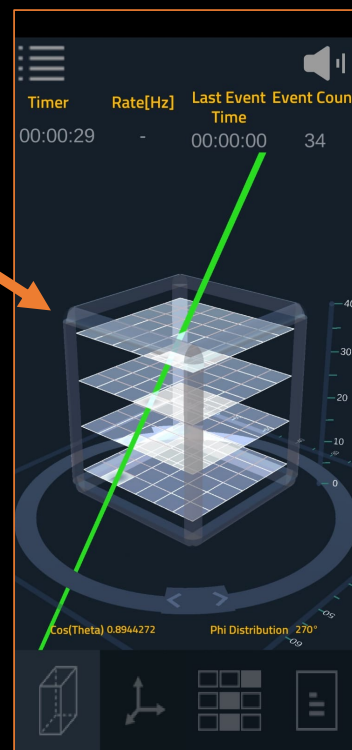
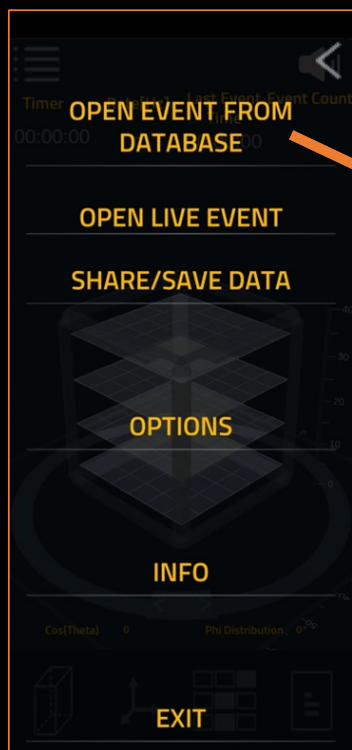
Lon

temp





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.

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.



Struttura dei dati

21:57 100% 0.34 kbit/s 40%

← STDataViewer_LNGS_...

3024 10080808 20301010
11/11/2025 09:56:22.129
PM _;-;-;-;-

3025 10080804 02020203
11/11/2025 09:56:24.817
PM

_;-;-;-;-;0,976795;142°
3026 01030602 01030202
11/11/2025 09:56:25.311
PM

_;-;-;-;-;0,9520971;105°

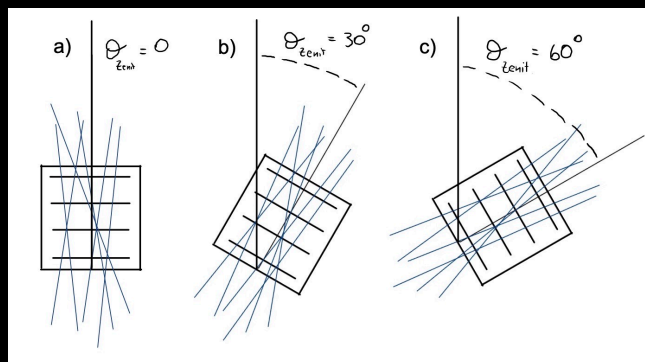
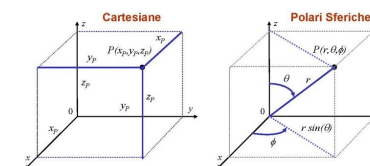
3027 02050901 01060804
11/11/2025 09:56:27.637
PM

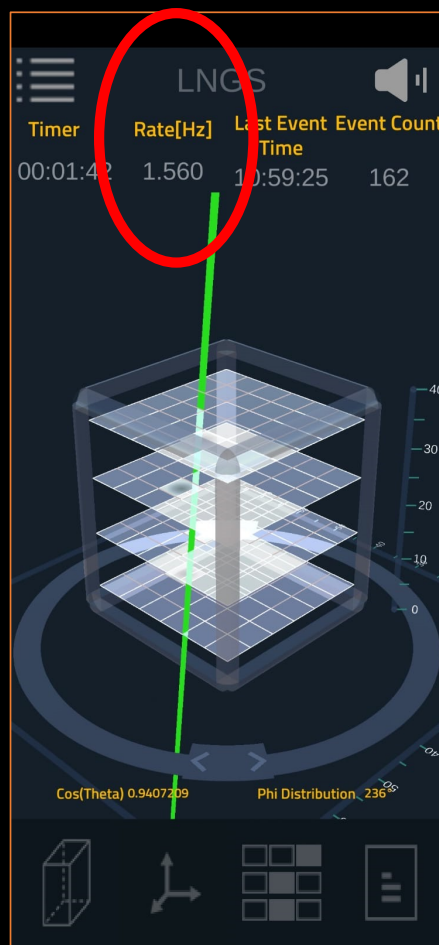
_;-;-;-;-;0,9589341;307°

3028 10080402 10080404
11/11/2025 09:56:27.733
PM

_;-;-;-;-;0,9242375;11°

EventID **CRCdataMaster/(vistaX)**
CRCdataSlave/(vistaY) **DATE-TIME**
Alt;Lat;Lon;Angle;Temp;Cos(Theta);PhiDistribution°





Rate in Hz è il numero di muoni al secondo visti dal CRC selezionato (LNGS nel nostro caso). Il valore in Hz si aggiorna ogni 100 secondi. Possiamo prendere 3 misure per ciascun angolo, prendendo tre valori consecutivi di rate per angolo a 100 s (1m e 40 s), a 200 s (3m e 20 s) se a 300 s (5 m). Poi facciamo la media e calcoliamo l'errore di misura.

Per azzerare il contatore (**Timer**) basta cliccare su Event Count.

PROVIAMO A DECODIFICARE E TRACCIARE...

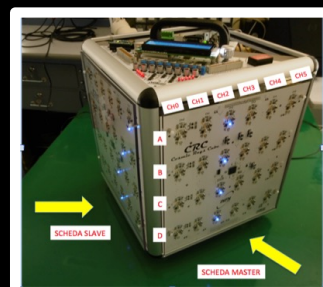
USIAMO EXCEL E GEOGEBRA

Un singolo dato di CRC è costituito essenzialmente da un numero di evento, da due stringhe esadecimali e da un time stamp basato sull'ora del PC. 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. Ad ogni numero o lettera esadecimale corrispondono 4 cifre binarie. Alla fine avremo due stringhe (di soli «1» e «0») lunghe 32 bit;

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

```

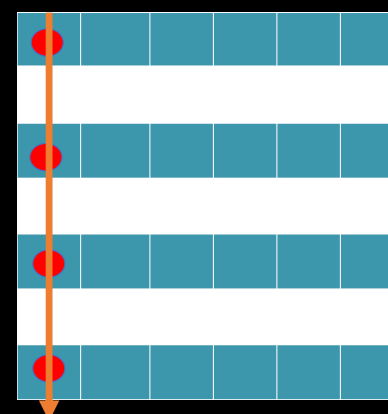
2999 02040820 02040808
3000 06020202 20101008
3001 08040202 20202020
3002 01040810 01010101
3003 10101008 10101010
3004 20100402 10102020
3005 01020408 01010101
3006 20100802 01020810
3007 01010202 01010101
3008 01010101 01020202
3009 01010101 02020201
3010 03020408 01030408
3011 02020202 10080402
3012 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 02040201 01020606
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

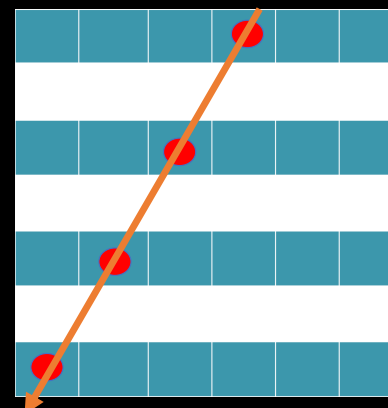
Tabella di conversione
Esadecimale-Binario

Scheda SLAVE o vista X



Riga 1

Scheda MASTER o vista Y



Evento n. 3022



...e adesso passiamo alle misure

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

(Socrate)

attanasio.candela@lngs.infn.it

Qualche sito di informazione e divulgazione scientifica

- ❑ <http://scienzaper tutti.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.lswr.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).