

***Let's look at muons !!!
Come costruire un rivelatore...
2a parte***



LNGS, 8-12 Aprile 2024

***Attanasio Candela
Laboratori Nazionali del Gran Sasso
candela@lngs.infn.it***

LNGS OUTREACH TRACKING SYSTEMS HISTORY

Presidency of the Council of Ministers
Presidenza del Consiglio dei Ministri



The Art of Italian Expertise
L'Arte del saper fare bene italiano



**Exhibited at G8 Summit in L'Aquila
(luglio 2009)**

**2008-2009
(Gran Sasso National Laboratory)**

**10 Glass Resistive Plate Chambers, 20 strip panels, 320
Readout Channels, 20 Front End Boards, 1 Controller Board,
DAQ on BOARD**

LNGS OUTREACH TRACKING SYSTEMS HISTORY

Exhibited at: LNGS Visitor Center,
International Meetings, TV Documentaries,
Institutional Events.



2010-2012

(Gran Sasso National Laboratory)

- 320 Plastic Scintillator Bars
- 320 Readout Channels
- 40 Front End + Interconn. Boards
- 1 Controller Board
- DAQ on BOARD

(50% funded through Government Grant)

Exhibited at: Toledo Railway Station (Naples),
Think Science-Dubai, Space Congress-Abu Dhabi,
Institutional Events.



2013-2019

(Gran Sasso National Laboratory and INFN NA)

- 200 Plastic Scintillator Bars
- 200 Readout Channels
- 2 Front End/Ctrl Boards
- DAQ on BOARD
- 2 detectors in UAE
- 1 detector in ITALY (Naples)
- 1 detector in SPAIN (LSC)

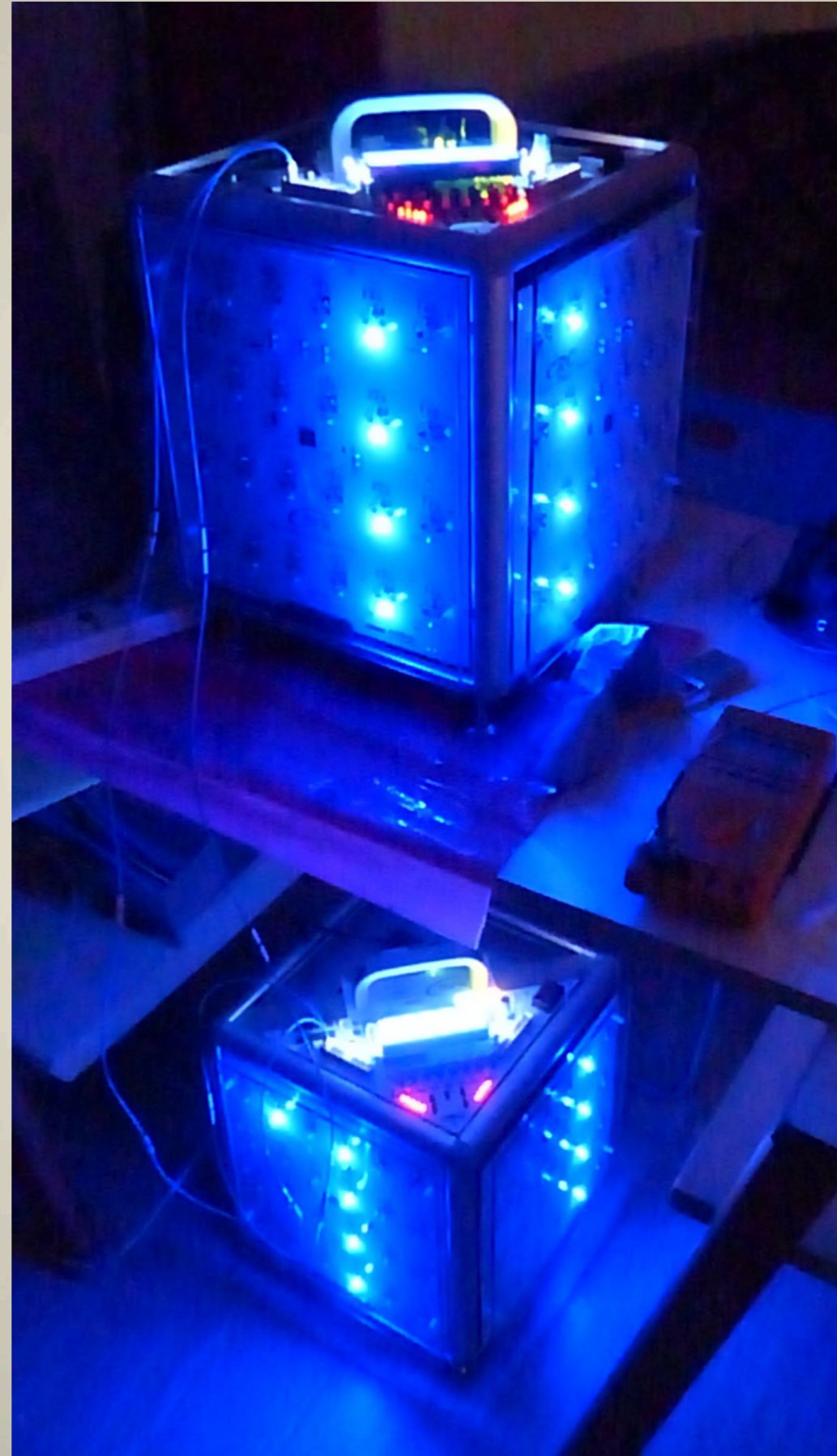


LNGS OUTREACH TRACKING SYSTEMS HISTORY



Rivelatori realizzati dai LNGS alla NYU di Abu Dhabi (UAE)

E FINALMENTE SIAMO ARRIVATI AL CRC PORTATILE!!!



CHI HA UN CRC ?

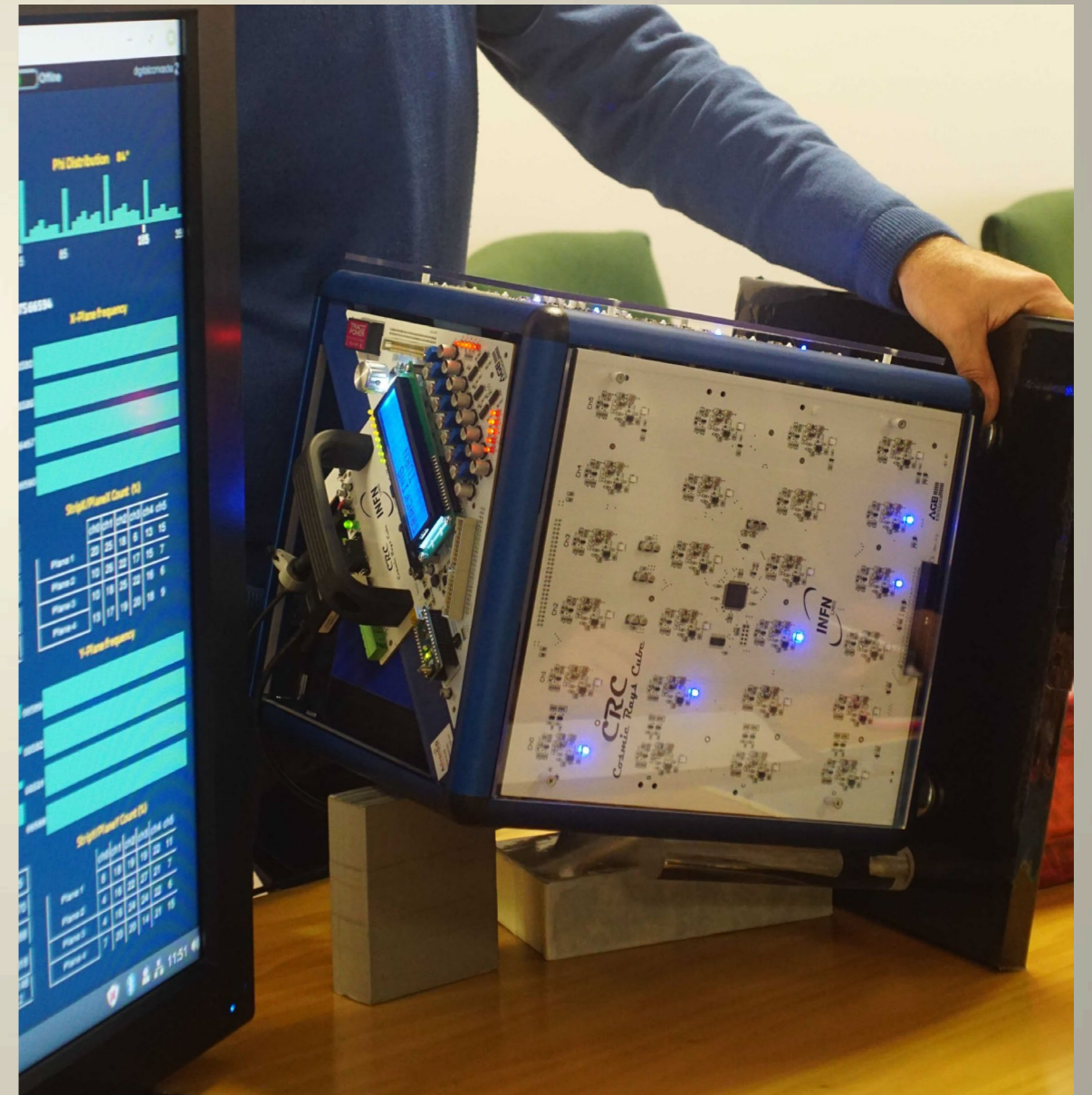
- **LNGS (Laboratori Nazionali del Gran Sasso)**
 - **GSSI (Gran Sasso Science Institute)**
 - **LSC (Laboratori Sotterranei di Canfranc in Spagna)**
 - **NYU (New York University ad Abu Dhabi – UAE)**
 - **SNOLAB (Sudbury Neutrino Observatory in Canada)**
 - **CNL (Canadian Nuclear Laboratories)**
 - **KAMIOKA OBSERVATORY (in Giappone)**
 - **UNAM (Universidad National Autonoma de Mexico)**
 - **INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia)**
 - **SEZIONI INFN di:**
 - NAPOLI - MILANO BICOCCA – FERRARA – TRIESTE - ROMA1 –**
 - PADOVA – PALERMO/CATANIA e a seguire**
 - BOLOGNA, BARI, LNF, FIRENZE/PISA, TORINO,**
 - ROMA2, ROMA3**
- L'Istituto Sarrocchi di Siena ne ha realizzato uno, prima scuola in Italia a dotarsi di un CRC**

COSA ABBIAMO FATTO CON I CRC

- **SEMINARI e MISURE** in diverse scuole d'Italia
- **STAGE** con studenti
- **ICD (International Cosmic Day)** dal 2018
- **FUTURO REMOTO** a Napoli (3 partecipazioni)
- **FESTIVAL DELLA SCIENZA** a Genova (2 partecipazioni)
- **SALONE DEL LIBRO** a Torino
- **BERGAMOSCIENZA** a Bergamo
- **WORLD CONFERENCE OF SCIENCE JOURNALISTS** a Losanna
- **NOTTE DEI RICERCATORI** a L'Aquila (Evento SHARPER) e a Napoli
- **OPEN DAY** ai LNGS
- **MOSTRA TERREMOTI, VULCANI E NUVOLE** a Ischia (INGV)
- **MOSTRA L'INFINITO: SCIENZA E BELLEZZA** presso la Libreria Rinascita di Ascoli Piceno
- **COMICON 2022** a Napoli
- **FIERA DIDACTA 2024** a Firenze
- **COLLABORAZIONE** con il maestro Peppe Vessicchio per la composizione di "musica cosmica"

ALCUNE FOTO: ICD NOVEMBRE 2018

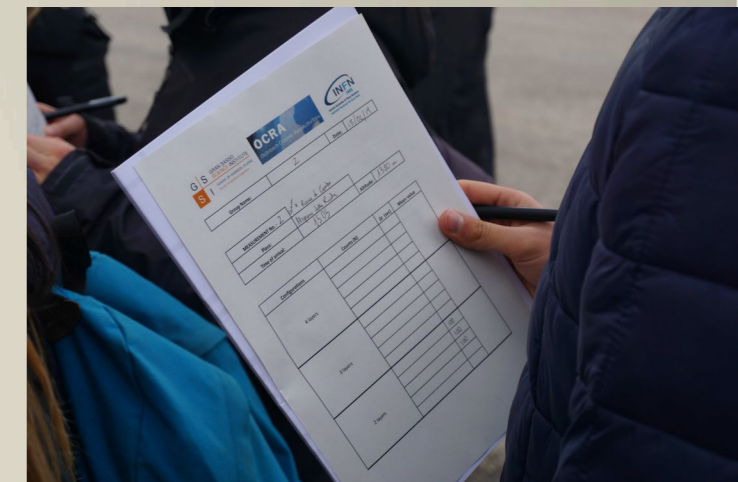
L'International Cosmic Day è un progetto che coinvolge ogni anno 30 istituti di ricerca Internazionali e oltre 2000 studenti di 16 paesi diversi. Per l'INFN partecipano 21 sedi locali, con circa 100 scuole e oltre 800 studenti.



ALCUNE FOTO: STAGE OCRA (APRILE 2019)



Articolo su “Asimmetrie”:
<https://www.asimmetrie.it/as-spazi-27>



	$a_{\text{eff}}(m)$	Altezza Piedi (S/m)	σ_{eff}	$\sigma_{\text{eff}}(m)$	$R_{\text{eff}}(m)$	N_{eff}	$R_{\text{eff}}(m)$	R_{eff}	R_{eff}	R_{eff}	R_{eff}	R_{eff}	R_{eff}
L'Aquila (4551)	698	353	866	300	$2,3 \pm 0,1$	1593	$4,4 \pm 0,1$	2022	6820,15				
Rocca di Cambio	1380	870	1682	500	$3,4 \pm 0,1$	1131	$5,8 \pm 0,1$	2533	$8,4 \pm 0,17$				$8,64 \pm 0,17$
Campo Felice	1523	843	1887		$3,4 \pm 0,1$	1332	$6,1 \pm 0,1$	2430	$8,77 \pm 0,17$				$8,6 \pm 0,2$
Ovin d'Alì	1352	883	2087		$3,0 \pm 0,1$	1710	$5,7 \pm 0,1$	2428	$8,74 \pm 0,17$				$8,75 \pm$

MISURE AL MONTE SORATTE



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

Volume 1031, 11 May 2022, 166514



Measurement of the muon flux in the bunker of Monte Soratte with the CRC detector

A. Candela^a, A. Cocco^a, N. D'Ambrosio^a, M. De Deo^a, A. De Iulis^c, M. D'Incecco^a, P. Garcia Abia^d, C. Gustavino^b  , G. Gustavino^e, M. Messina^a, G. Paolucci^c, S. Parlati^a, N. Rossi^a

Show more 

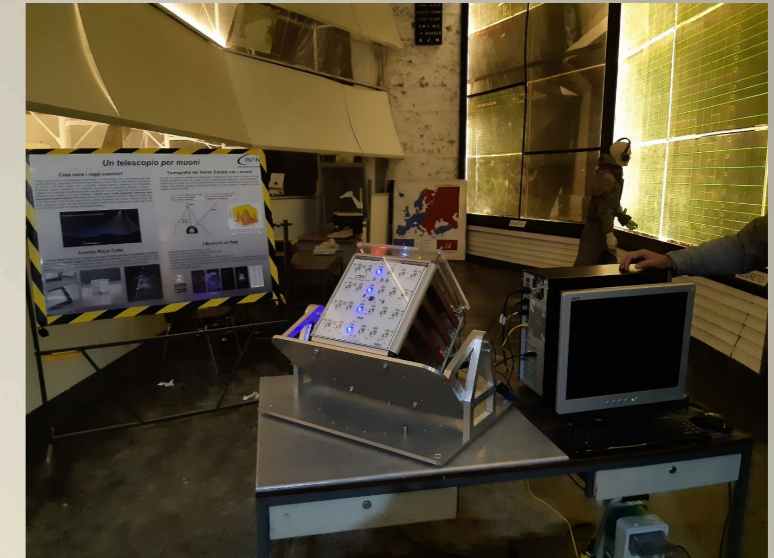
 Add to Mendeley  Share  Cite

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166514> 

[Get rights and content](#) 

Abstract

In the context of the P_{TOLEMY} project, the need for a site with a rather low cosmogenic induced background led us to measure the differential muon flux inside the bunker of Monte Soratte, located about 50km north of Rome (Italy). The measurement was performed with the Cosmic Ray Cube (CRC), a portable tracking device. The simple operation of CRC was crucial to finalize the measurement, as it was carried out in a site devoid of scientific equipment and during the COVID-19 lockdown. The muon flux measured at the Soratte hypogeum is about two orders of magnitude lower than the flux observed on the surface, suggesting the use of the Soratte bunker for hosting astroparticle physics experiments in which a low environmental background is required.

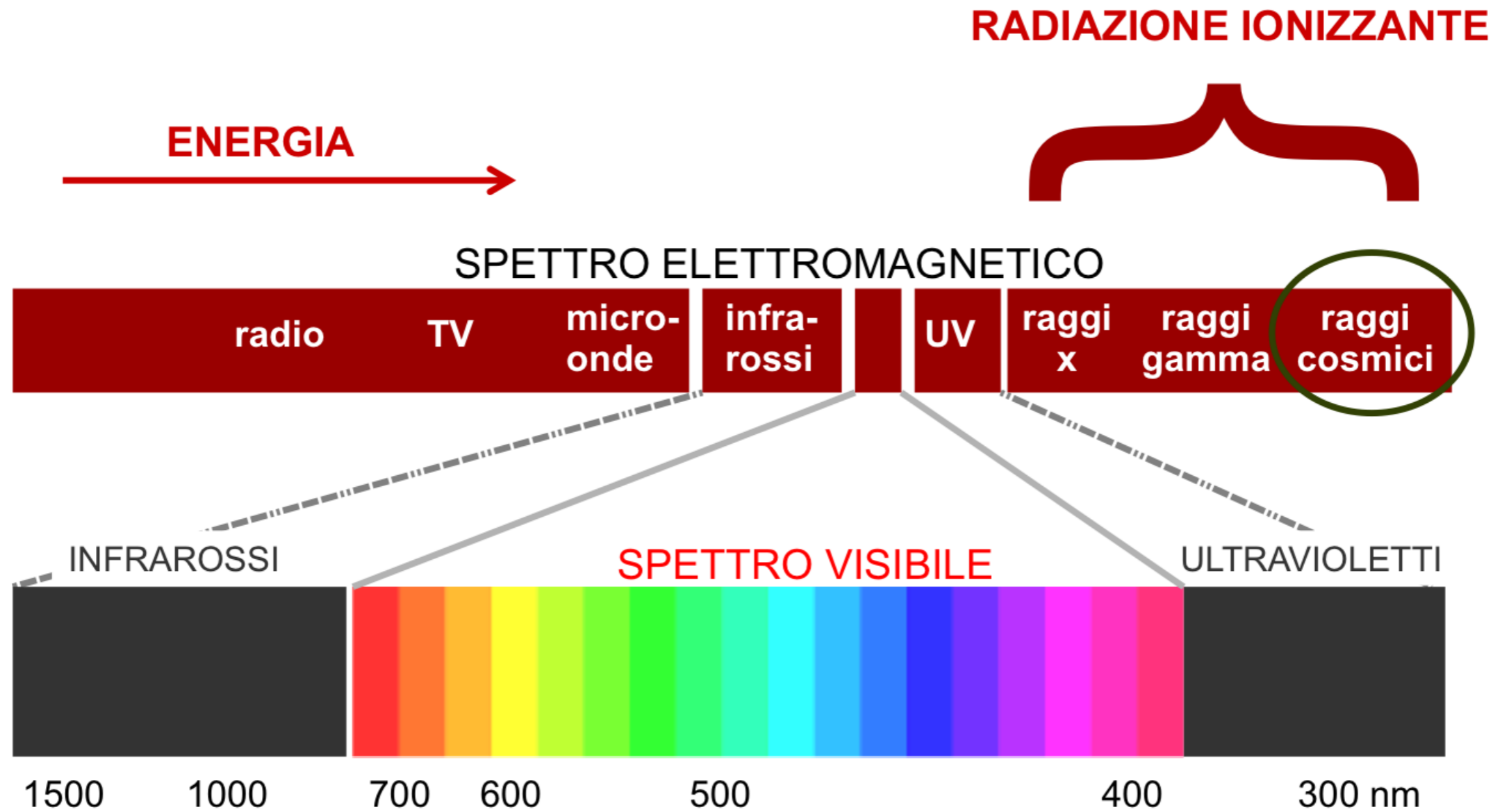


Monte Soratte altezza 691 m



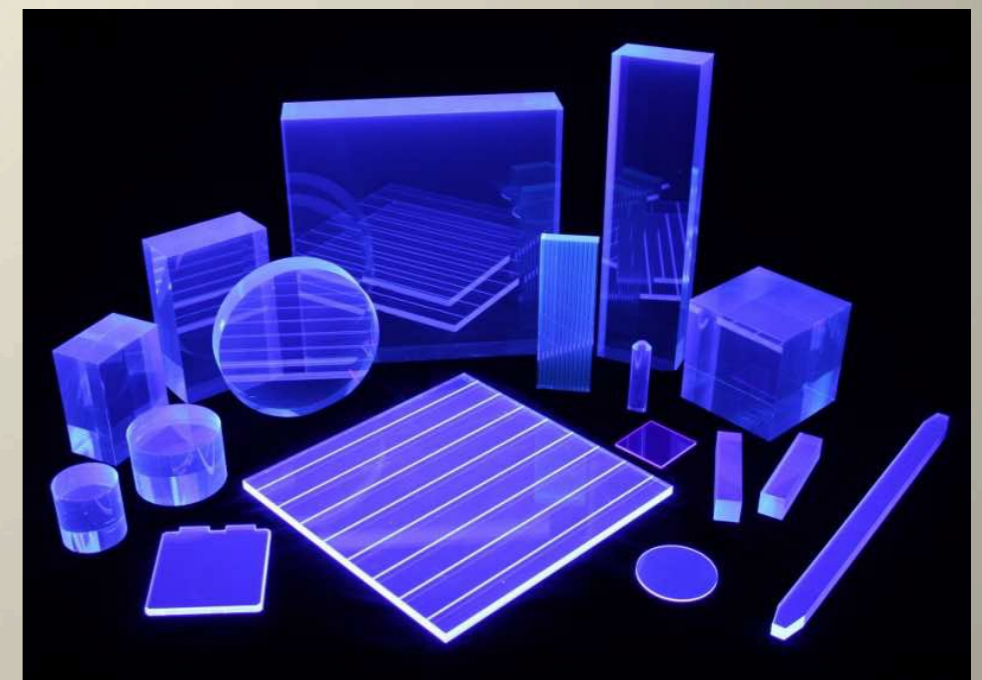
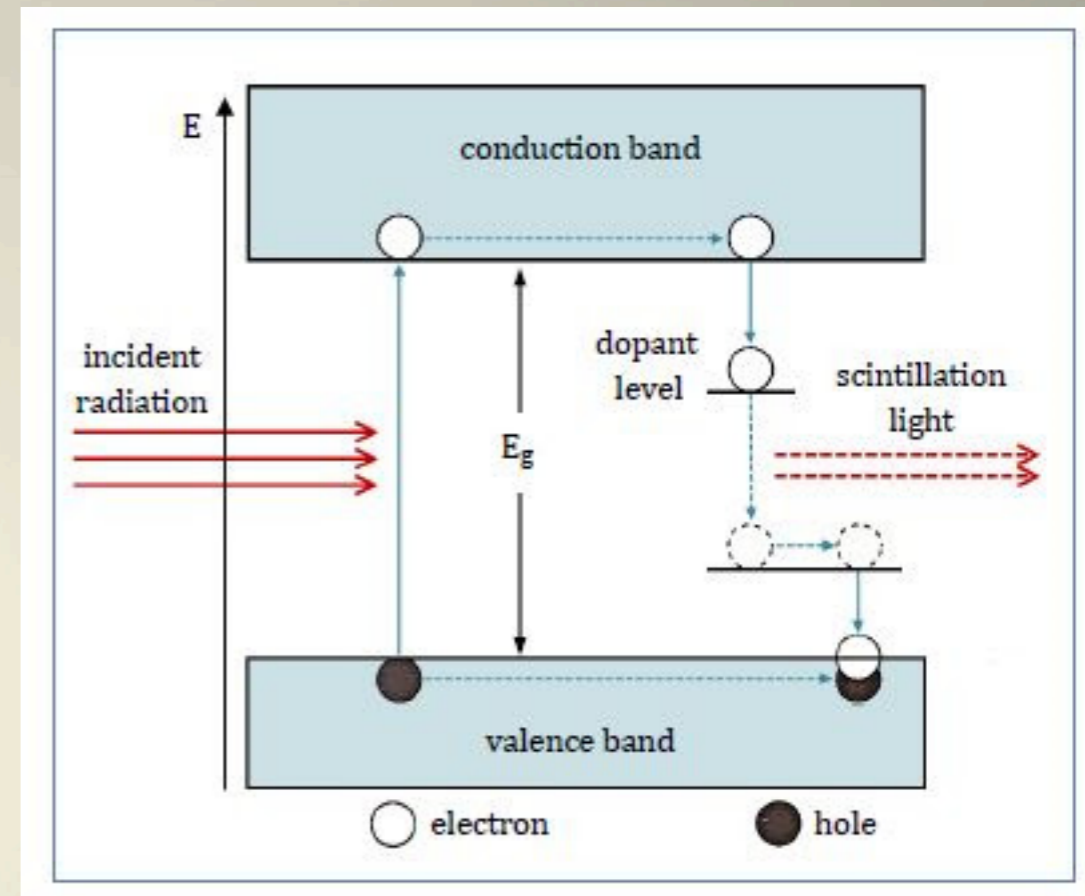
Una sala del bunker

Lo Spettro Elettromagnetico



UN PARTICOLARE RIVELATORE PER OSSERVARE I MUONI: *LO SCINTILLATORE PLASTICO*

- ❑ Gli scintillatori plastici 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 riemettere energia sotto forma di luce visibile.
- ❑ Sono essenzialmente fatti da materiale isolante con elevato gap energetico tra banda di valenza e banda di conduzione.
- ❑ La particella 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)*.

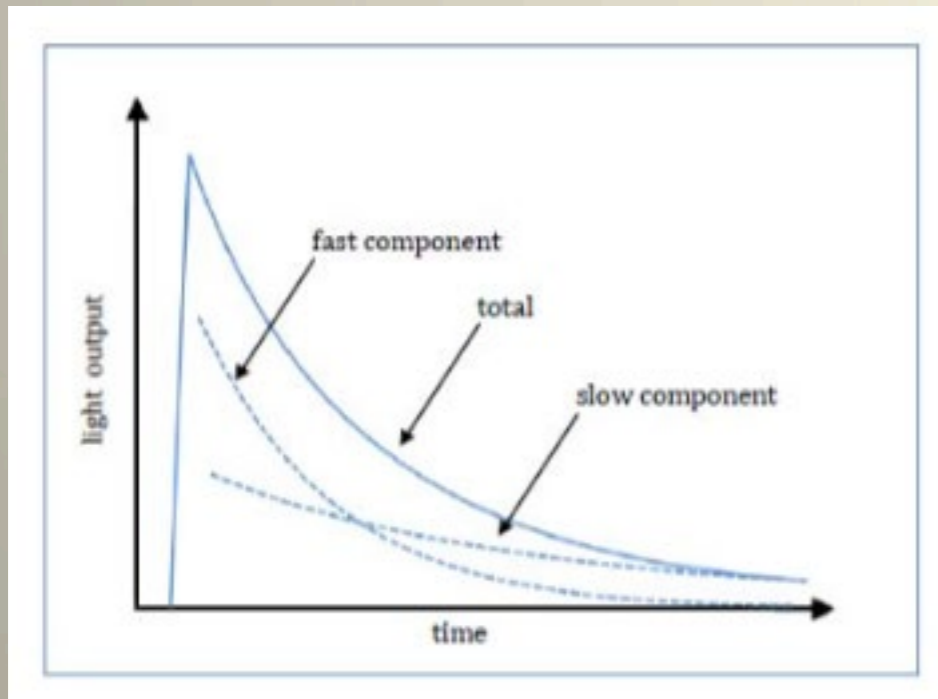


UN PARTICOLARE RIVELATORE PER OSSERVARE I MUONI: *LO SCINTILLATORE PLASTICO*

L'evoluzione temporale del processo di luminescenza ovvero il numero di fotoni emessi al tempo t può essere descritta da un decadimento di tipo esponenziale a due componenti:

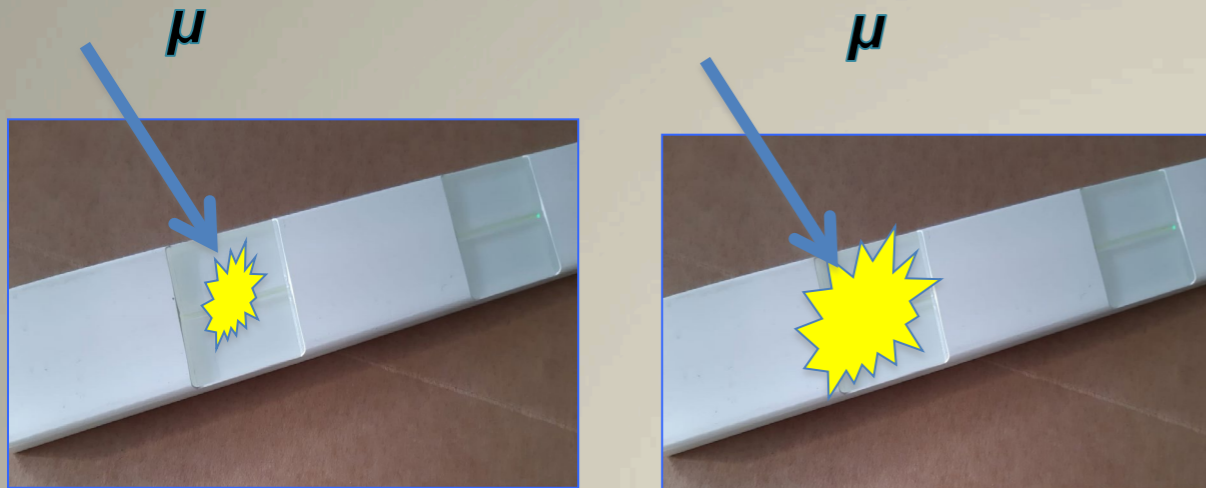
$$N(t) = A \exp(-t/\tau_f) + B \exp(-t/\tau_s)$$

dove τ_f e τ_s sono rispettivamente le costanti di decadimento veloce e lenta, A e B costanti specifiche del materiale scintillante con A predominante rispetto a B (la componente veloce predomina su quella lenta. Il tempo di salita in genere è dell'ordine dei ns.



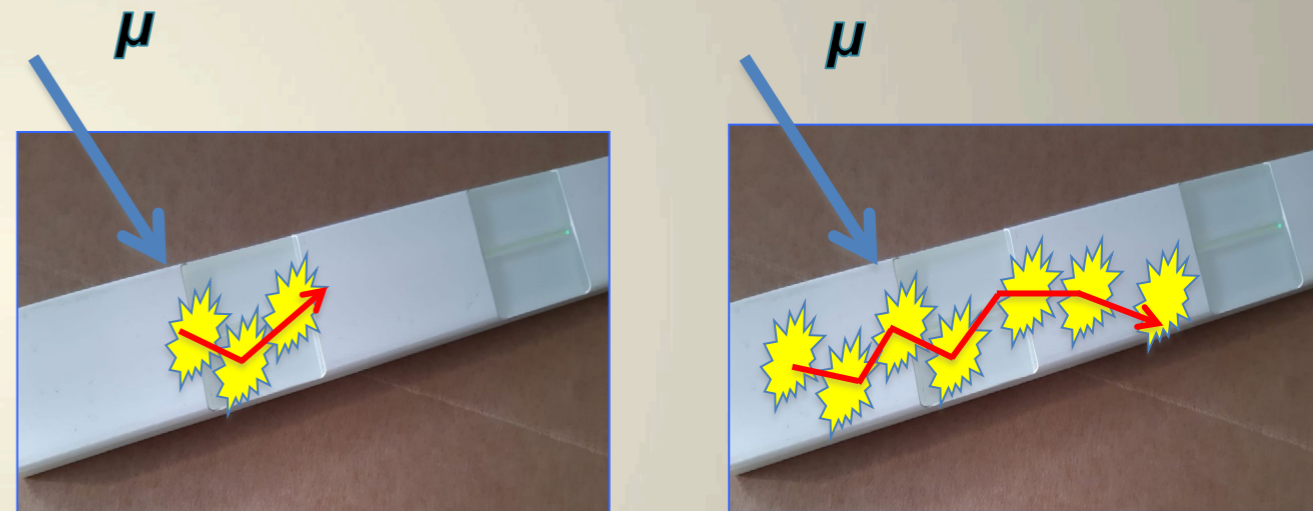
Non tutti i materiali scintillanti possono essere utilizzati come rivelatori. Uno scintillatore di buona qualità, deve soddisfare a diverse caratteristiche.

LO SCINTILLATORE PLASTICO: PROPRIETA' E CARATTERISTICHE



✓ **Light yield** - efficienza di conversione dell'energia persa dalla particella ionizzante in fotoni

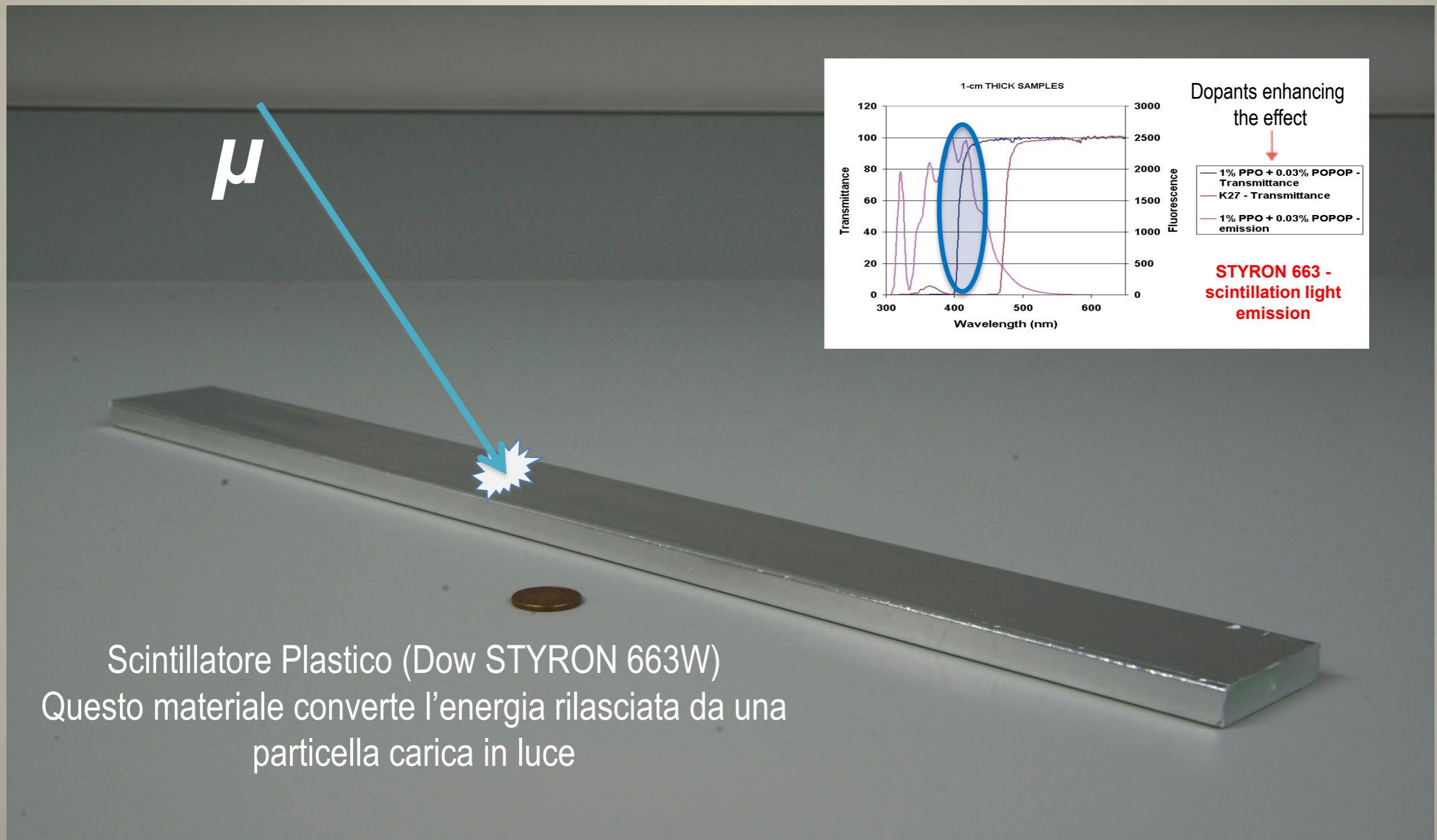
✓ **Attenuation length** - capacità della luce di propagarsi lungo lo scintillatore (è la distanza in corrispondenza della quale il numero di fotoni che si propagano si riduce di un fattore pari ad e)



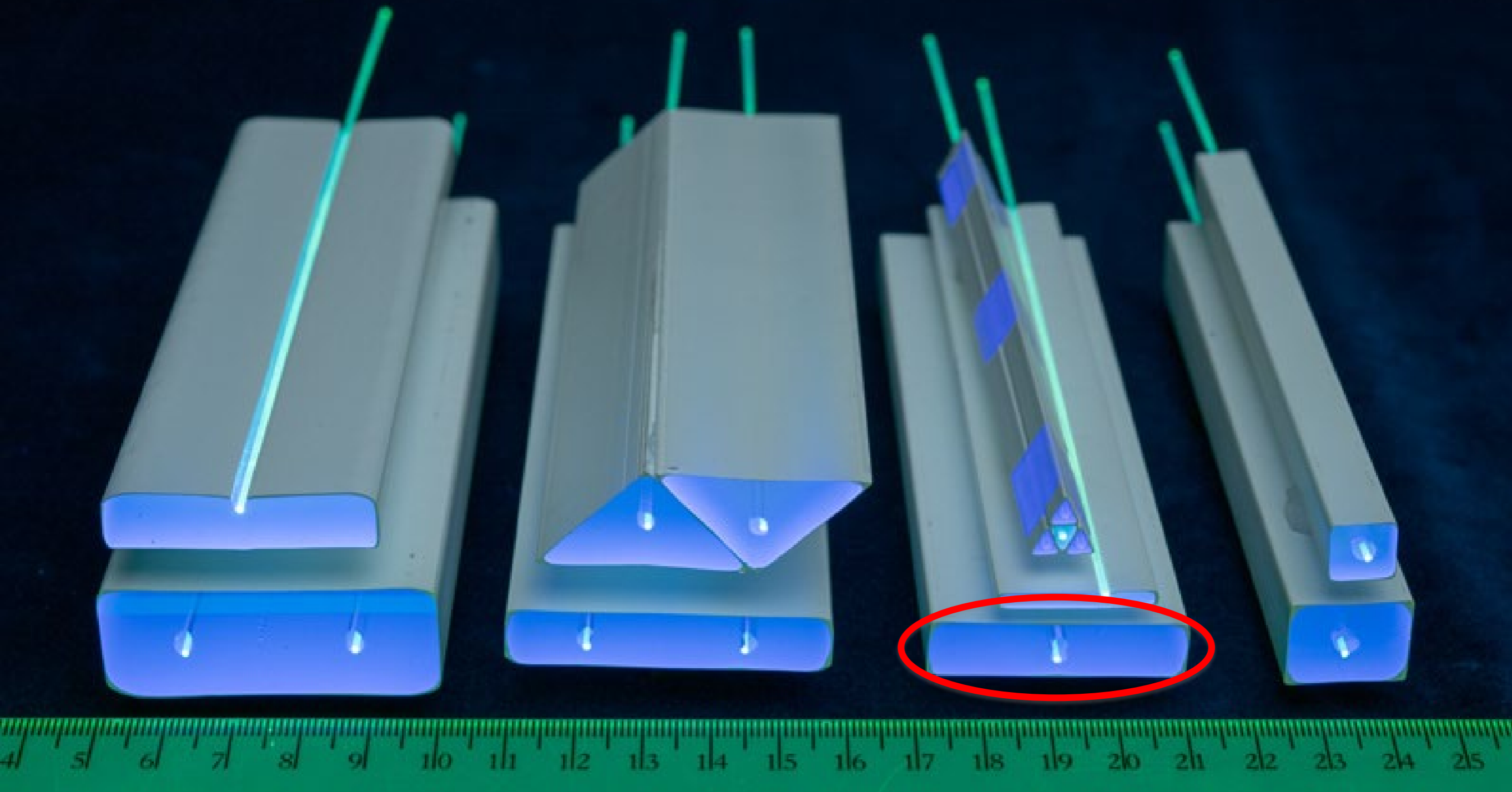
- ✓ **buona linearità** - ovvero luce emessa proporzionale all'energia depositata, cosa che consente anche una buona risoluzione energetica, ovvero buona precisione con cui misuro l'energia depositata;
- ✓ **un basso "decay time"** dell'impulso di luce (τ molto breve), ovvero elevata rapidità di risposta e quindi buona risoluzione temporale;
- ✓ **buona risoluzione spaziale** - ovvero in quante celle "virtuali" posso dividere il mio scintillatore;
- ✓ **basso "dead time"** ovvero tempo necessario allo scintillatore per essere in grado di misurare una seconda interazione in un tempo molto ridotto;
- ✓ **lunghezza d'onda** emessa compatibile con i sensori utilizzati.
- ✓ **trasparenza alla lunghezza d'onda di emissione** in modo da evitare il fenomeno dell'autoassorbimento ed aumentare quindi la light yield

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).

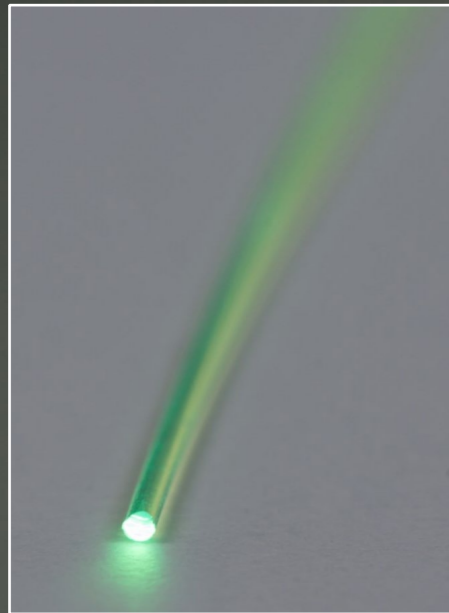


DIVERSE FORME DI SCINTILLATORE ESTRUSO

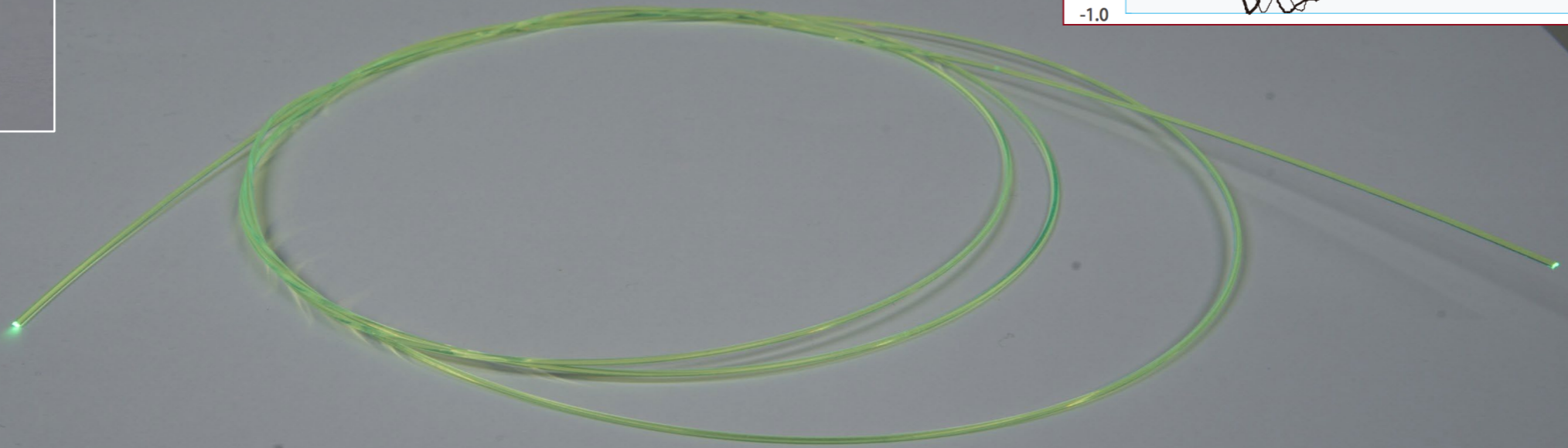
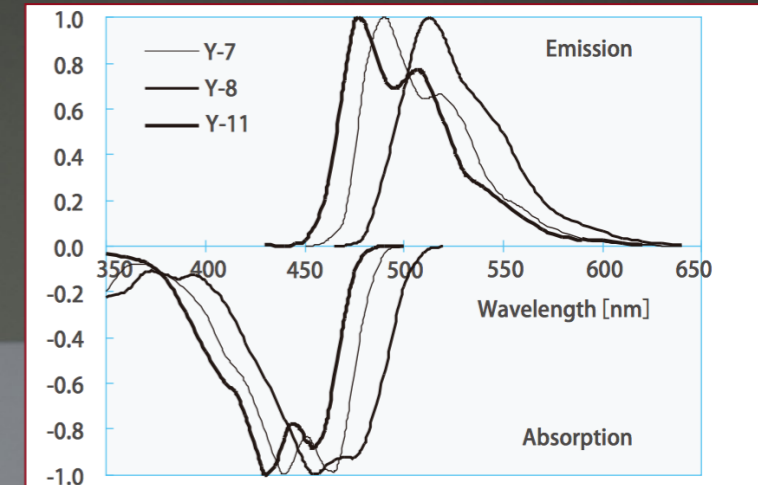


COME RISOLVERE IL PROBLEMA DELLA BASSA LUNGHEZZA DI ATTENUAZIONE???

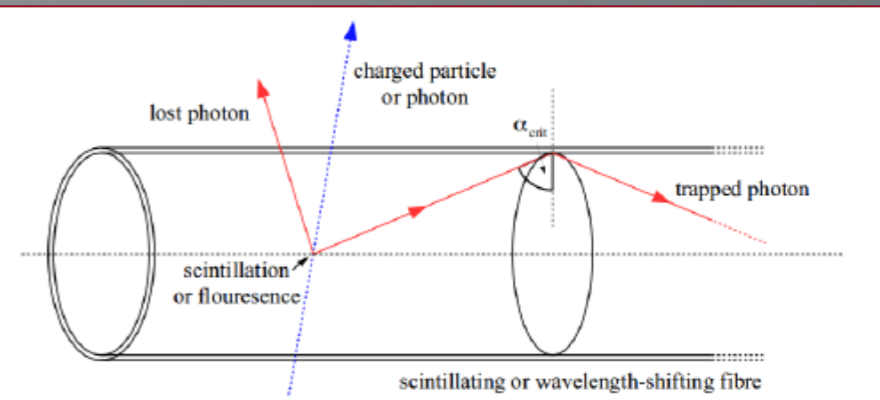
- ✓ Usiamo particolari fibre simili alle fibre ottiche, chiamate **WLS (Wave Length Shifter)**, in grado di raccogliere la luce in ogni punto dello scintillatore e convertirla in luce di diversa lunghezza d'onda (dal blu al verde);
- ✓ Hanno lunghezza di attenuazione $> 3,5$ m (fattore estremamente importante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



2 mm WaveLength Shifter fibre
Kuraray Y-11 – o Saint Gobain BCF-91A

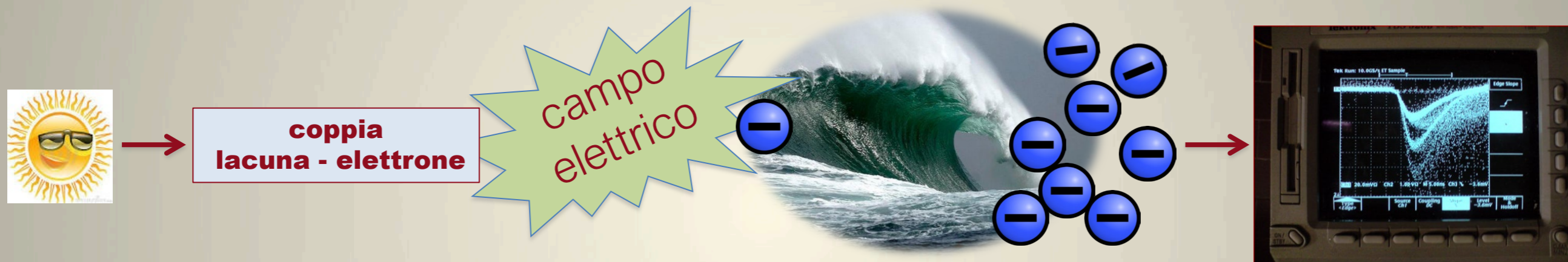


Letture consigliata: "Performance of Wavelength-Shifting Fibers for the Mu2e Cosmic Ray Veto Detector"
<https://arxiv.org/pdf/1811.04874.pdf>



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.

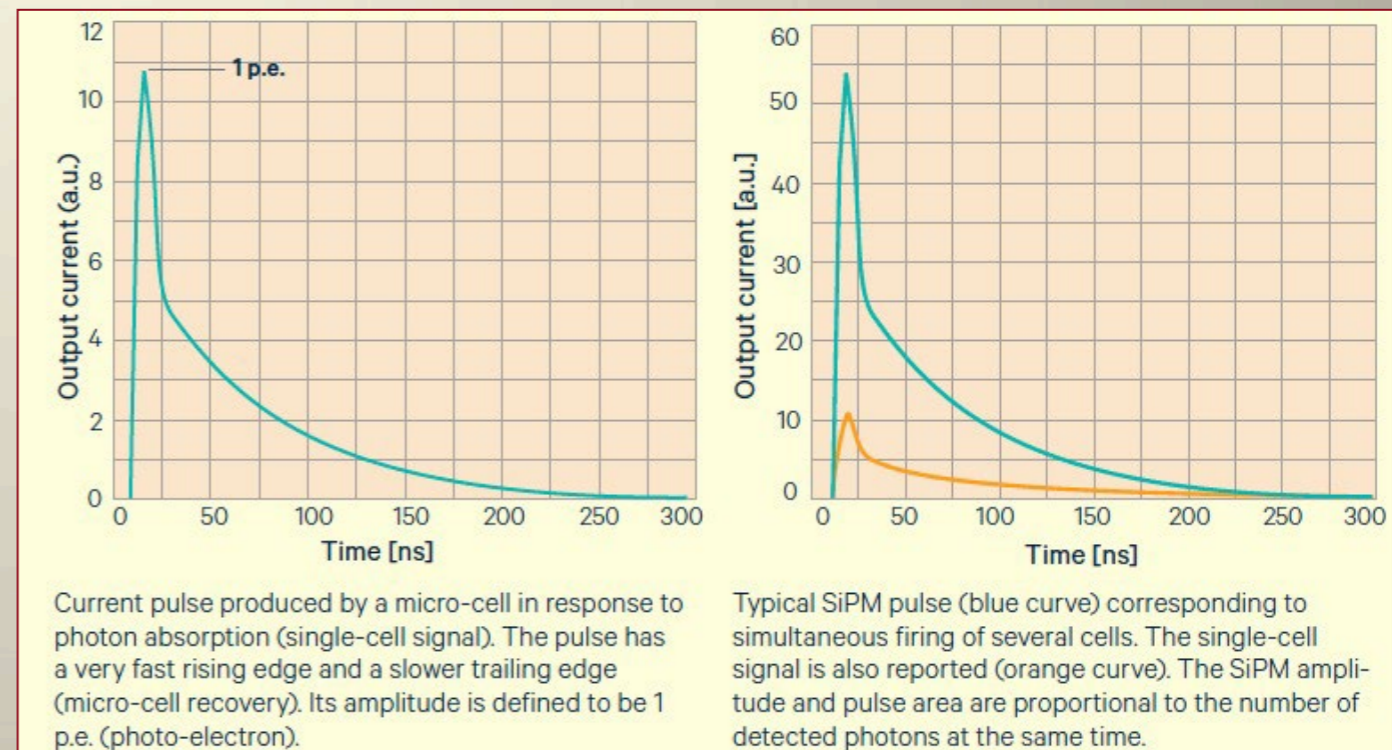


Lecture consigliate:

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

- ✓ Sono essenzialmente realizzati con una **matrice di diodi** connessi in parallelo su un substrato di silicio con in serie una resistenza (detta resistenza di *quencing*).
- ✓ 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).

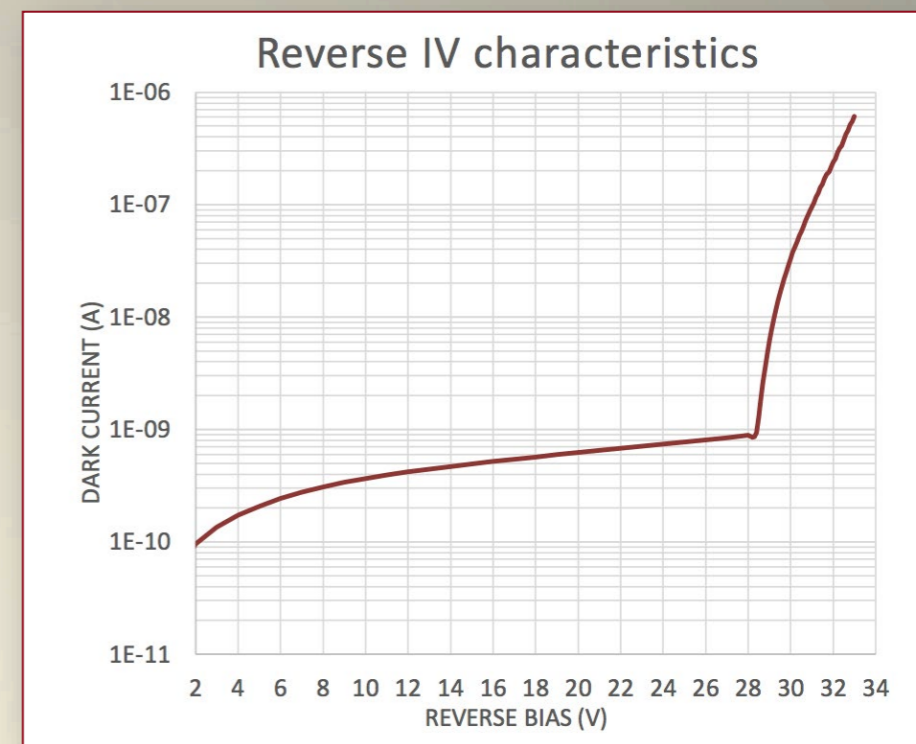


Figure 1

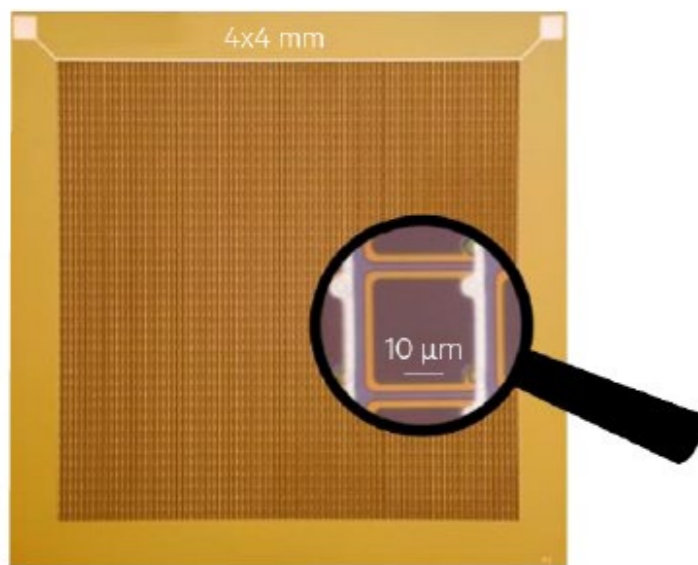
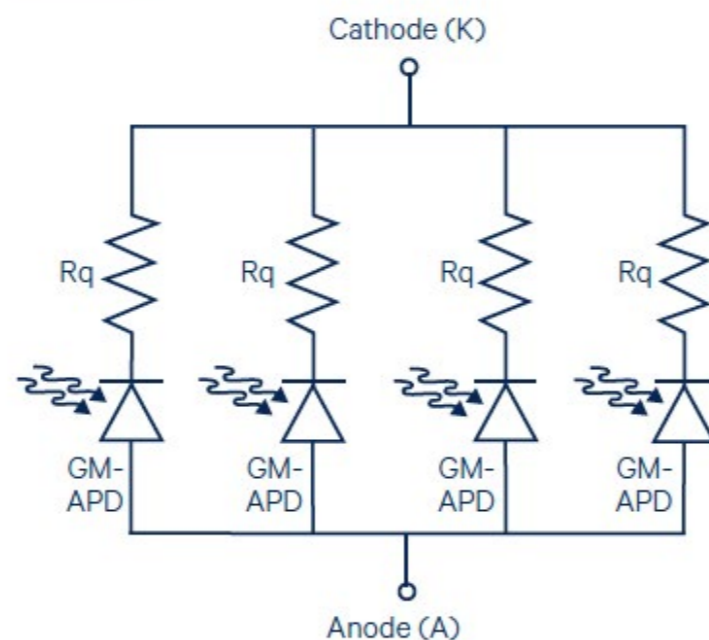


Figure 2



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:

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

Introduction to Silicon Photomultiplier

I SILICON PHOTOMULTIPLIER: un esempio di datasheet

Absolute Maximum Ratings

Symbol	Parameter	Min	Max	Unit
T_A	Operating Temperature Range	-25	+40	°C
T_S	Storage temperature	-40	+60	°C
T_{sot}	Lead temperature (solder) 5s		+250	°C
M_{VV}	Max voltage working range	Breakdown Voltage + 4		V

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rated conditions for extended periods may affect device reliability.

Geometrical, Electrical, and Optical Typical Characteristics ($T_a = 20\text{ °C}$)

Symbol	Parameter	Product			
		ASD-RGB1S-P	ASD-RGB1C-P	ASD-RGB3S-P	ASD-RGB4S-P
AA	Effective active area	1×1 mm ²	1.13 mm ²	3×3 mm ²	4×4 mm ²
N	Cell count	625	673	5520	9340
CS	Cell size (pitch)	40 μm × 40 μm			
FF	Cell fill-factor	60 %			
RQ	Quenching resistance	550 kΩ			
C	Cell capacitance	90 fF			
τ_{RC}	Recharge time constant	50 ns			
S_R	Spectral response range	350 to 900 nm			
λ_p	Peak sensitivity wavelength	550 nm			
PDE	Photon Detection Efficiency ⁽¹⁾	32.5 %			
BV	Breakdown voltage ⁽²⁾	Typical: 27 V	Min: 25 V	Max: 29 V	
σ_{BV}	BV standard deviation ⁽³⁾	50 mV			
OV	Recommended Overvoltage range ⁽⁴⁾	Min: 2 V		Max: 4 V	
DCR	Dark Count Rate ⁽⁵⁾	< 100 kHz/mm ² @ 2 V OV		< 200 kHz/mm ² @ 4 V OV	
G	Gain ⁽⁶⁾	2.7×10 ⁶			
BVTC	Breakdown Voltage Temperature Coefficient	27 mV/°C			
n_{epoxy}	Refractive index of epoxy resin ⁽⁷⁾	1.5115 (@ 589 nm, 23°C, uncured)			
T_{epoxy}	Spectral transmission of epoxy resin ⁽⁷⁾	> 97% @ 1000 – 1600 nm ; > 99% @ 400 – 1000 nm			

- (1) Measured at peak sensitivity wavelength ($\lambda = \lambda_p$) at +4 V overvoltage (not including afterpulse and crosstalk).
- (2) Refer to the data provided with each shipped product.
- (3) BV of SiPMs belonging to a same production lot is within 200 mV ($\pm 2\sigma$) from mean BV value.
- (4) Operating voltage (SiPM bias) is BV + OV, to be applied in reverse mode, i.e., $V_{AK} < 0$ (see "Pins Function" section).
- (5) 0.5 p.e. threshold level at 20 °C (primary dark count rate; not including afterpulse).
- (6) Measured at 20 °C at +4 V overvoltage.
- (7) To be used as a guide only, not as a specification. Reported data is not guaranteed.

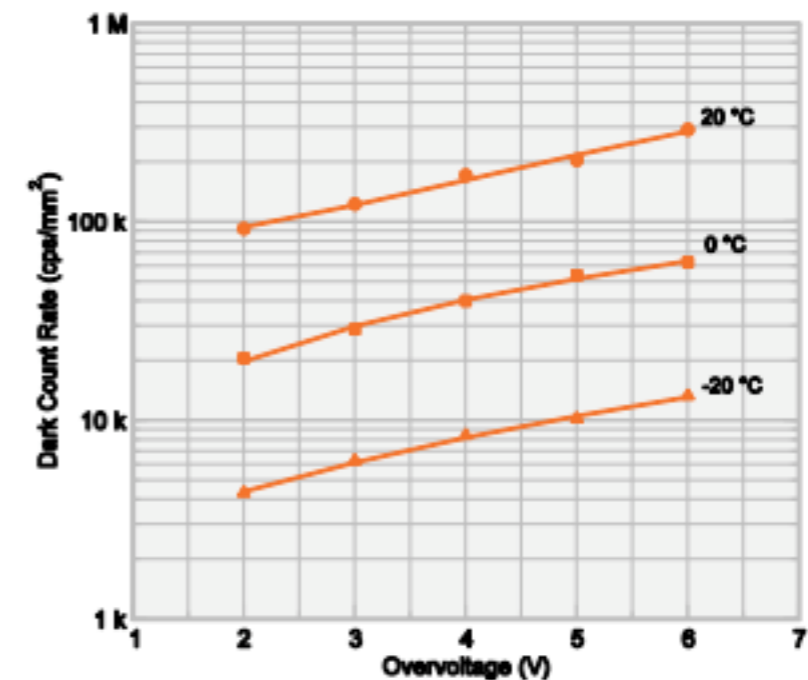
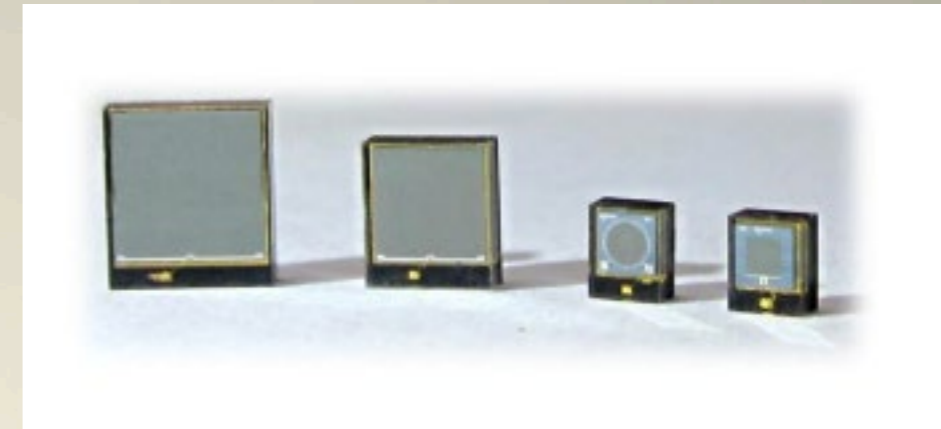


Fig.4 Dark count rate per square mm in RGB-SiPMs as a function of overvoltage and temperature. 0.5 p.e. threshold level. Primary dark count rate, not including afterpulse.

I SILICON PHOTOMULTIPLIER: SORGENTI DI RUMORE

- 1) DARK COUNT :** è la principale sorgente di rumore elettronico che limita la risoluzione di un SiPM. E' dovuta ad una corrente che ha origine dai portatori di carica creati termicamente nel volume sensibile e che sono presenti nella banda di conduzione; dipende perciò dalla temperatura. Mentre per misure di ampi segnali luminosi non si ha una sensibile influenza da parte di tale fenomeno, per rivelazioni di segnali molto deboli (come uno o pochi fotoni), si ha una limitazione delle prestazioni dei SiPM anche a temperatura ambiente. Il problema può essere parzialmente risolto operando a basse temperature oppure aumentando la soglia di lettura dell'elettronica esterna a valori più grandi dell'ampiezza del segnale del singolo fotoelettrone.
- 2) CROSSTALK :** questo fenomeno è dovuto agli elettroni emessi durante la fase di scarica a valanga in una cella del SiPM. Questi elettroni riescono a raggiungerne un'altra non inizialmente colpita innescando così una seconda reazione a valanga allo stesso modo di un fotone incidente. Pertanto avremo celle fired che non corrispondono ad eventi reali.
- 3) AFTERPULSES :** durante l'effetto valanga, i portatori di carica possono rimanere intrappolati nella struttura a reticolo del silicio e essere rilasciati dopo un certo tempo, dando luogo a segnali ritardati che simulano un segnale di fotone e diminuendo così la risoluzione nel conteggio degli stessi fotoni.

Fortunatamente il rumore elettronico dei SiPM è trascurabile rispetto al loro guadagno che è di circa 10^6 elettroni per singolo fotone prodotto.

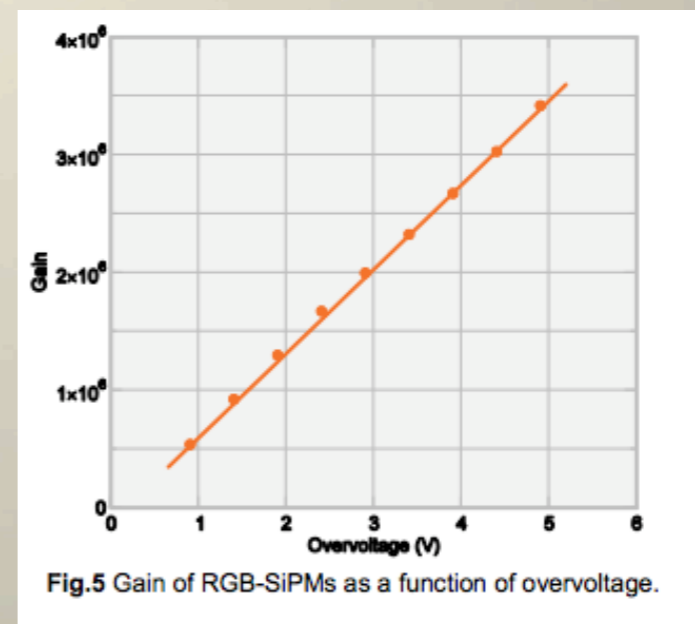
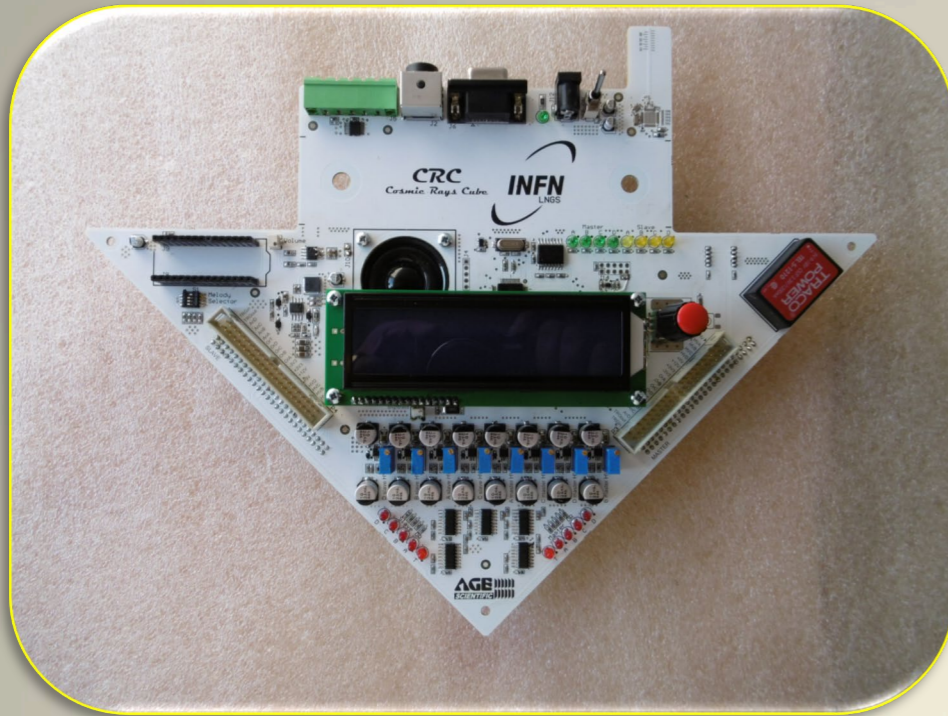
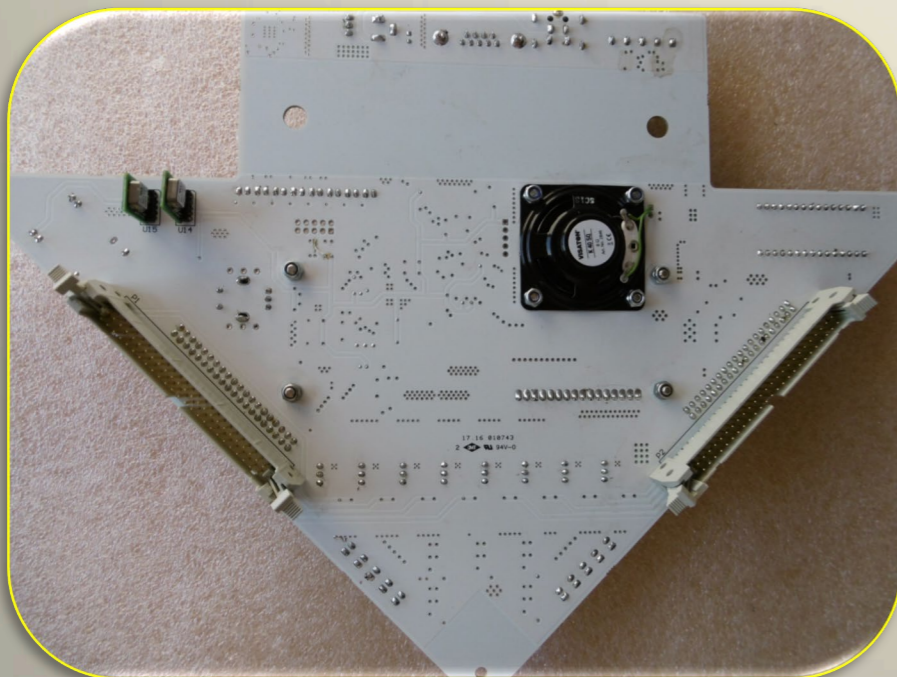


Fig.5 Gain of RGB-SiPMs as a function of overvoltage.

L'ELETTRONICA DI CONTROLLO



Alimentazione SiPM (Vbias) a circa 31 V cc
Alimentazioni del telescopio: +40, +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 !



Piani in coincidenza

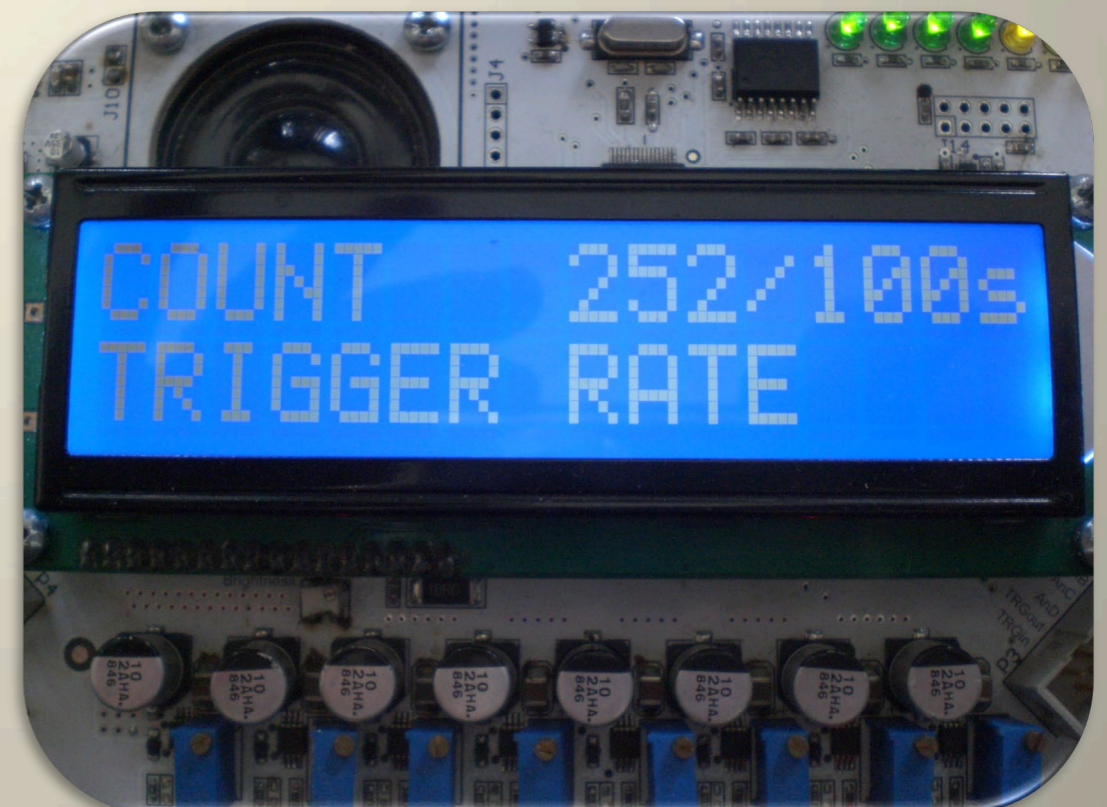
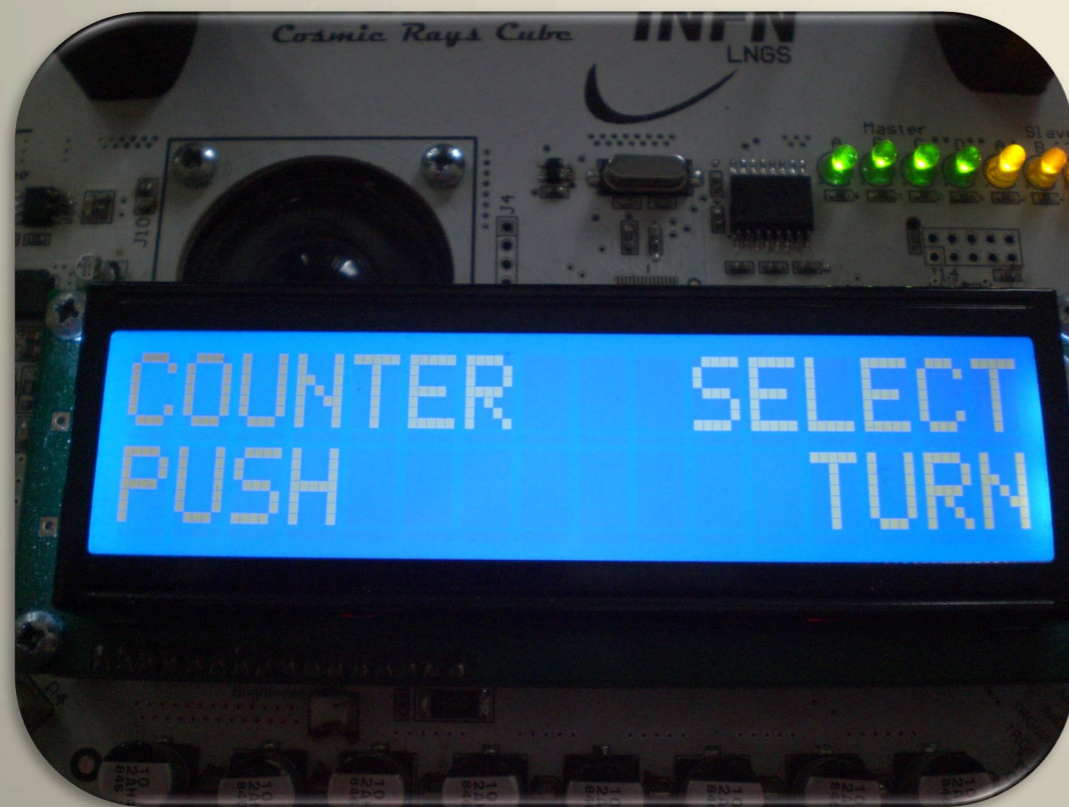
Encoder

Girando e cliccando sull'encoder è possibile misurare la *rate*, impostare le soglie, fissare le coincidenze, selezionare eventi one shot,...

Rate di piano

QUALI PARAMETRI POSSIAMO VARIARE IN UN CRC

- ✓ 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 analogici;
- ✓ con display su **TRIGGER SELECT** si possono abilitare o disabilitare i piani in coincidenza (si modifica l'accettanza 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, 100 s);
- ✓ 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 eventi (100 ms o 1 s) e si può mettere il telescopio in configurazione "single shot" (visualizzazione di un evento per 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 dati tramite PC con un collegamento tra la porta seriale del telescopio ed l'ingresso USB di un PC.



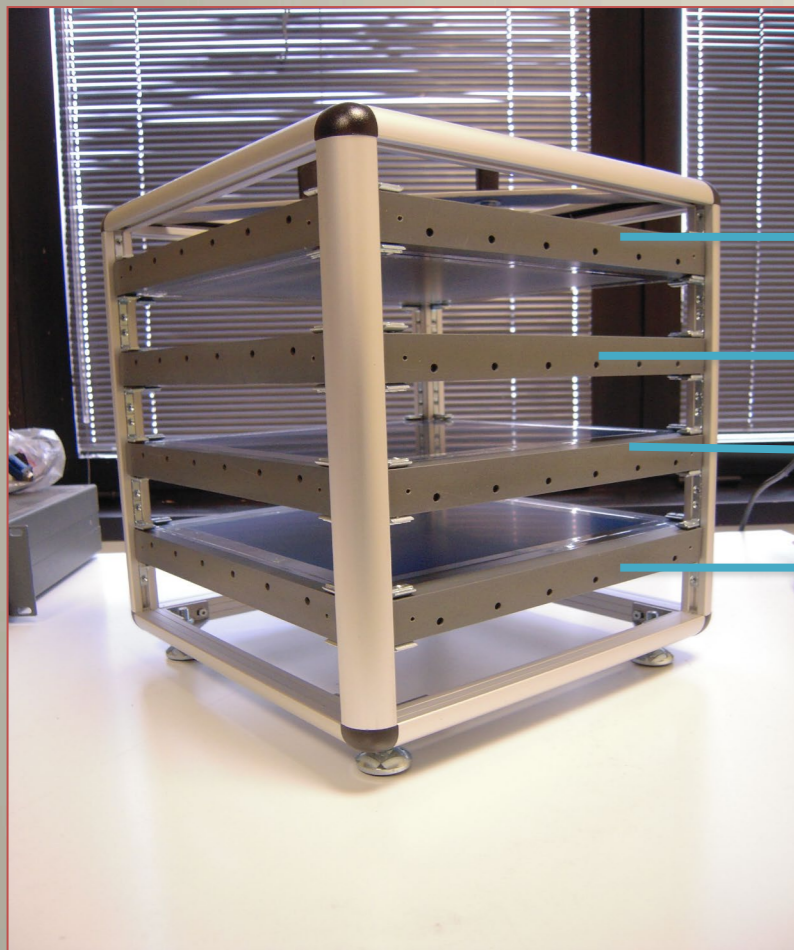
CONCETTO DI TRIGGER

- 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 più esistono più livelli di trigger anche molto complessi.
- Nel CRC i piani in coincidenza sono indicati dall’accensione dei led verdi e gialli.



COINCIDENZA TRA PIANI

Coincidenza: circuito che consente di avere un segnale logico ALTO in uscita quando sono ALTI tutti gli ingressi entro un certo intervallo di tempo T detto "gate". Quando il segnale analogico del SiPM supera un certo valore minimo, detto threshold, il segnale **analogico** proveniente dal SiPM si trasforma in un segnale **digitale** (il livello passa da 0 a + 5V).



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.

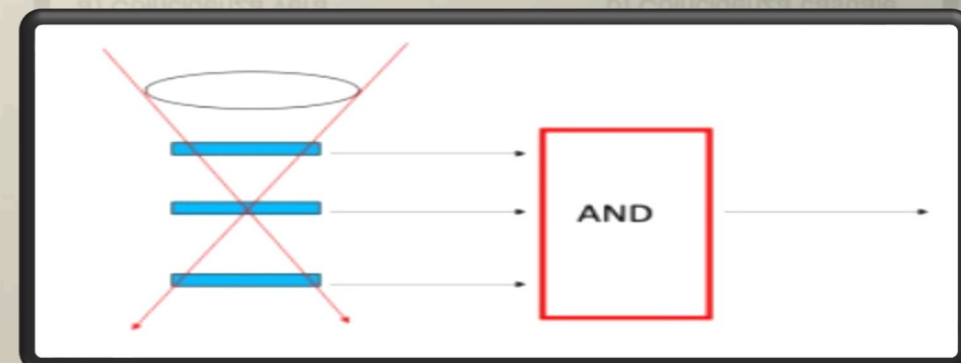
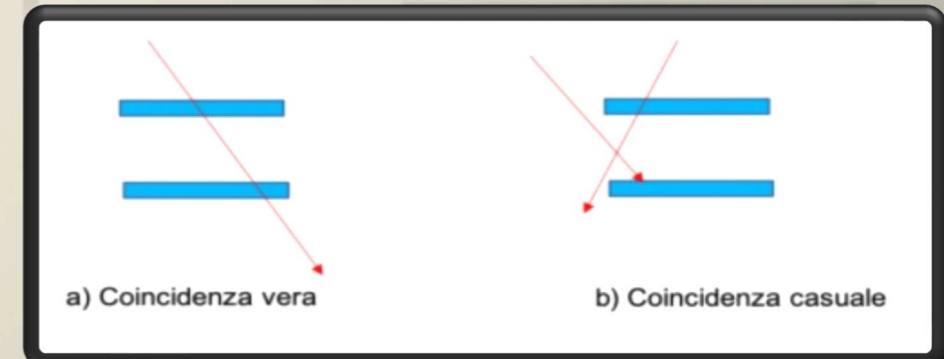
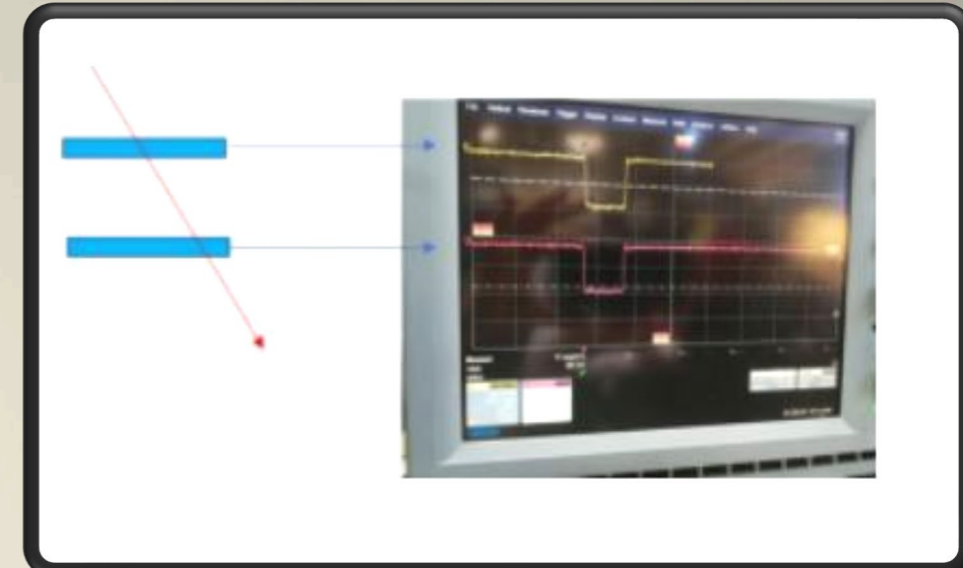
Anche in questo caso però si possono contare eventi casuali. Nella figura a lato si vede che avremo una coincidenza in entrambi i casi, ma nel caso a) si ha una coincidenza vera, nel caso b) una coincidenza casuale. Ecco il motivo per cui si tende ad avere gate dell'ordine di poche decine di ns.

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:

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

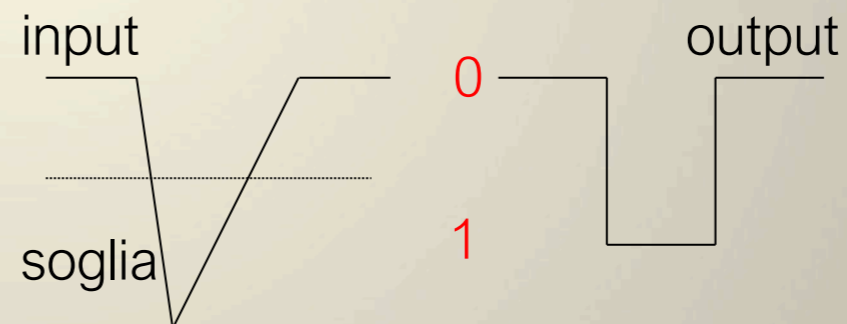
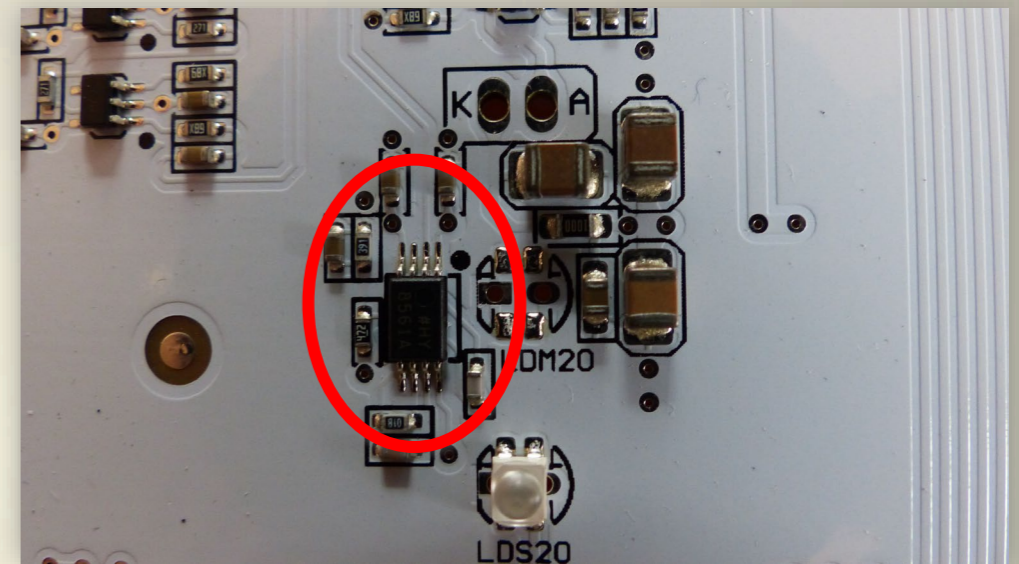
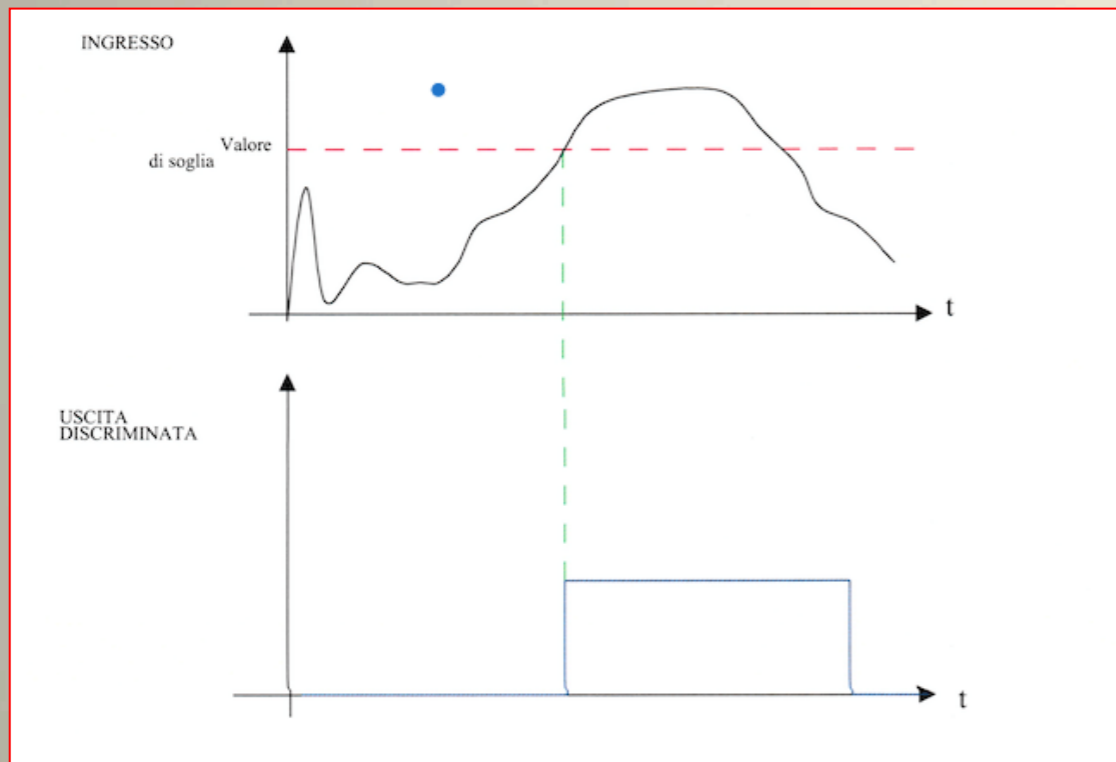
dove n è il numero di piani, T la gate fissata, R_s la rate di singola.



Più sono i piani più l'angolo solido è piccolo, più precisa è la direzione di provenienza, ma minore sarà il campo visivo

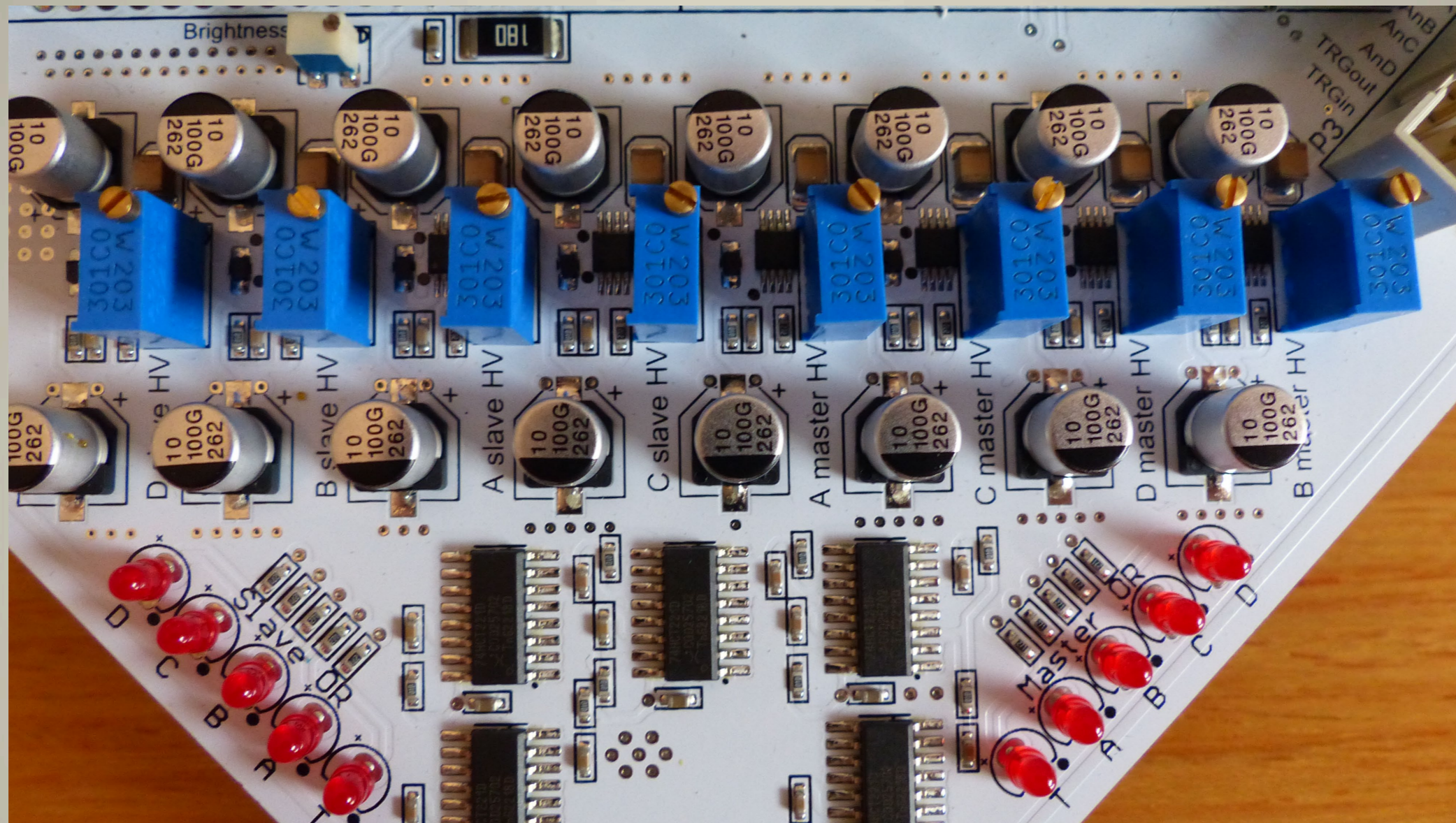
CONCETTO DI SOGLIA (*THRESHOLD*)

Discriminatore: è un dispositivo che risponde solo quando il segnale di ingresso è maggiore di un determinato valore di tensione (tipicamente sono mV) generalmente fissato tramite un trimmer. Se l'ampiezza è minore del valore prefissato, il discriminatore non darà alcun segnale in uscita. In genere è anche possibile fissare la durata del segnale in uscita (nel nostro caso 200 ns).



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.

COME SETTARE LA TENSIONE DI BIAS DEI SiPM



BV	Breakdown voltage ⁽²⁾	Typical: 27 V	Min: 25 V	Max: 29 V
σ BV	BV standard deviation ⁽³⁾		50 mV	
OV	Recommended Overvoltage range ⁽⁴⁾	Min: 2 V		Max: 4 V
DCR	Dark Count Rate ⁽⁵⁾	< 100 kHz/mm ² @ 2 V OV		< 200 kHz/mm ² @ 4 V OV
G	Gain ⁽⁶⁾		2.7×10^6	
BVTC	Breakdown Voltage Temperature Coefficient		27 mV/°C	

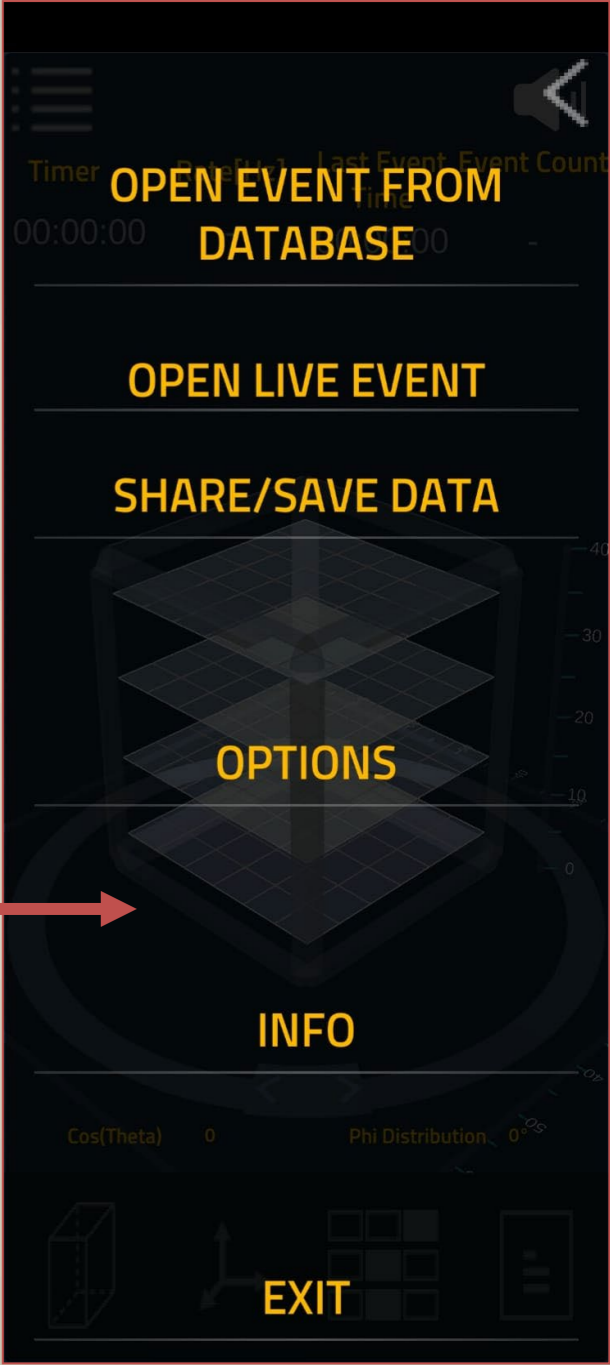
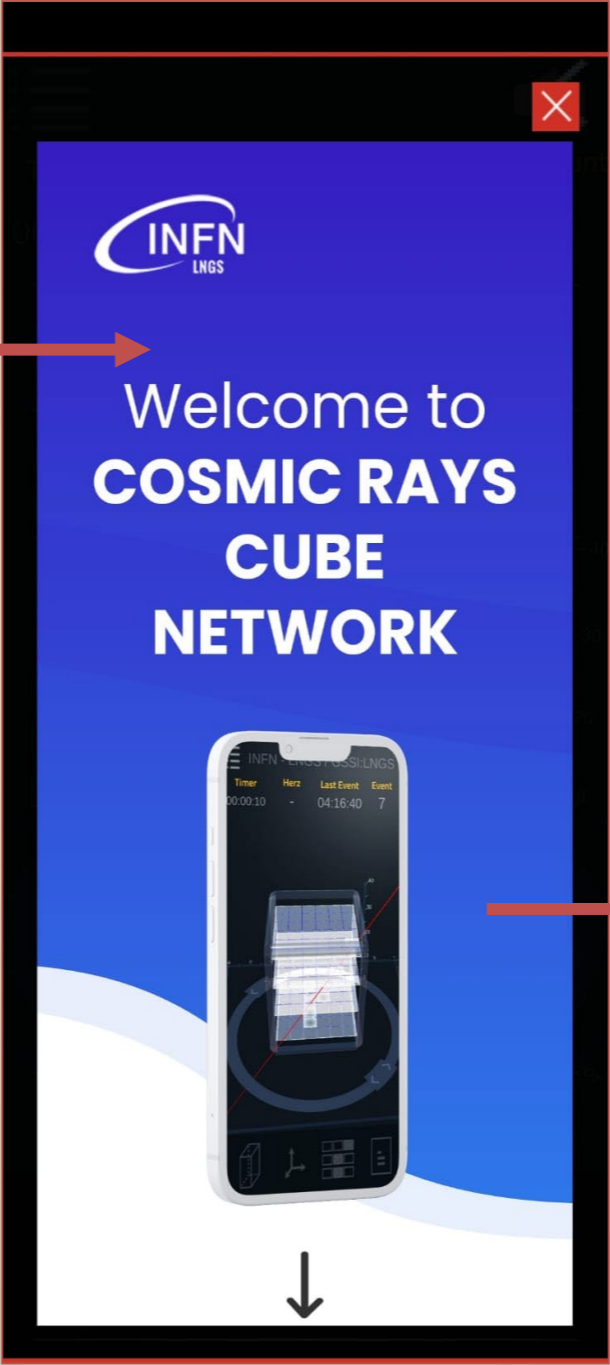
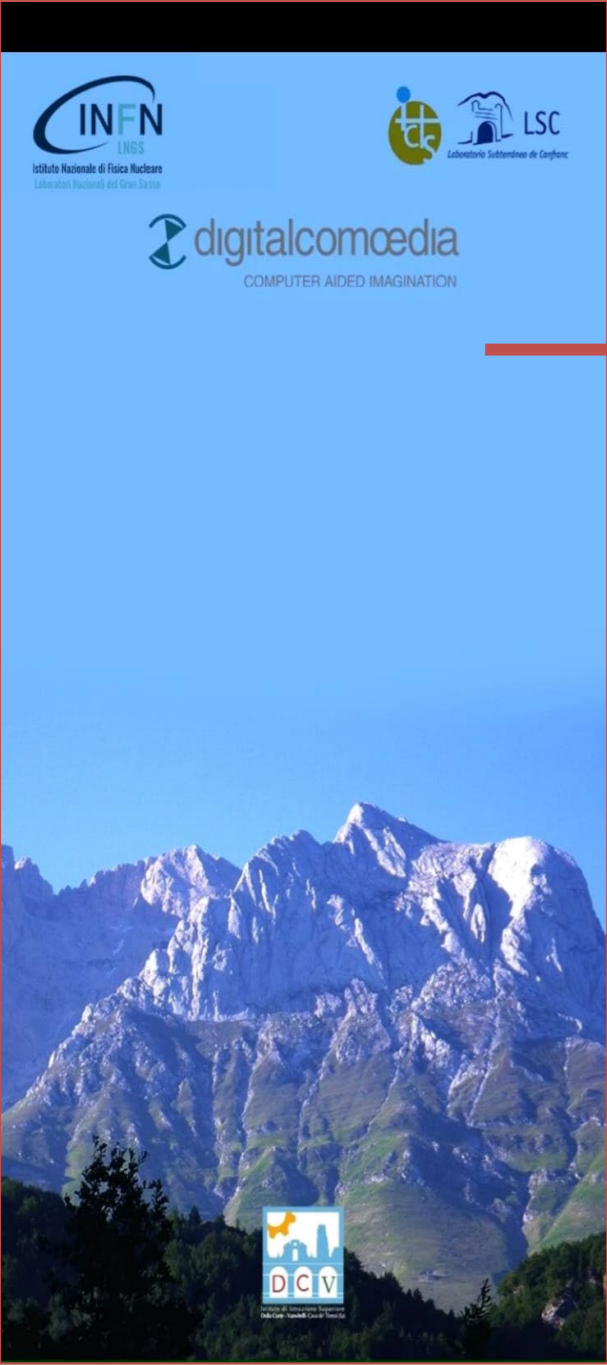
Cosmic Rays Live: «muoni» in un'APP



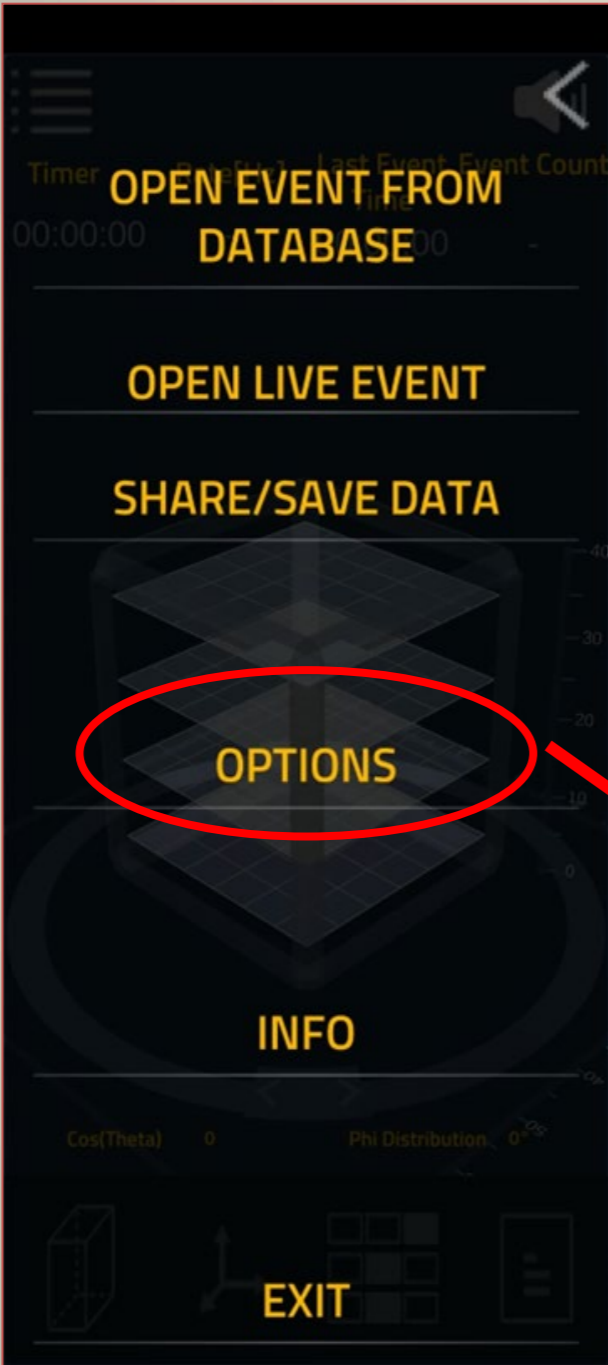
Il vostro smartphone, sarà lo strumento da usare per osservare raggi cosmici in tempo reale !!!



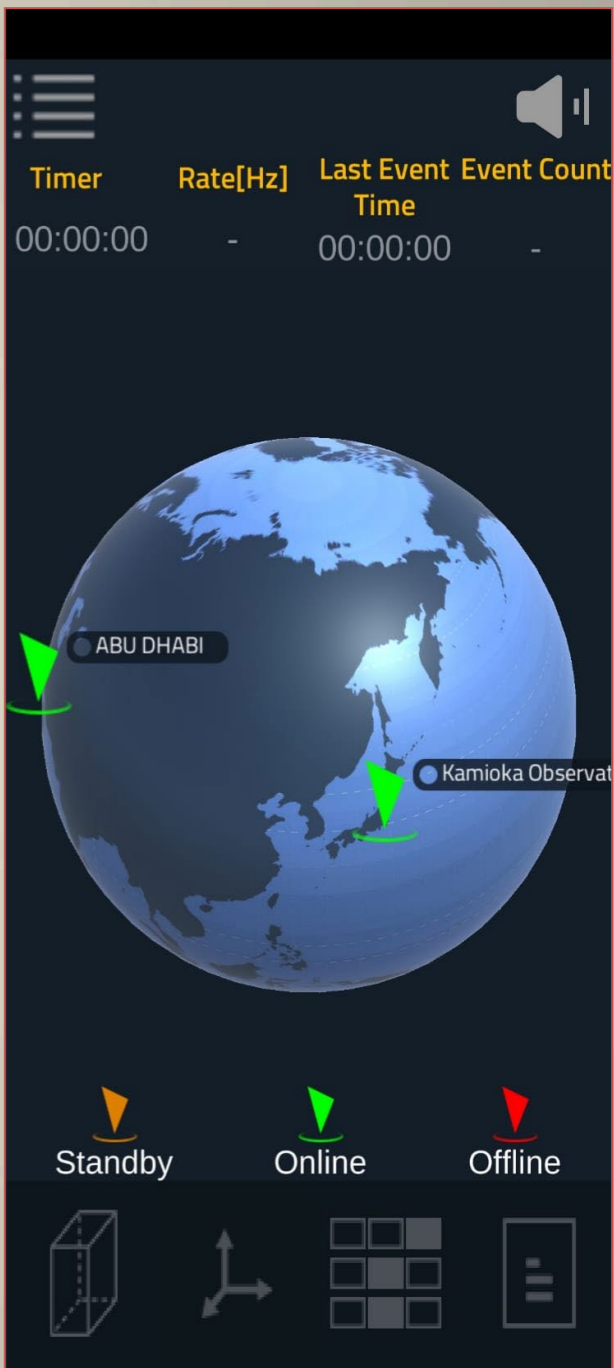
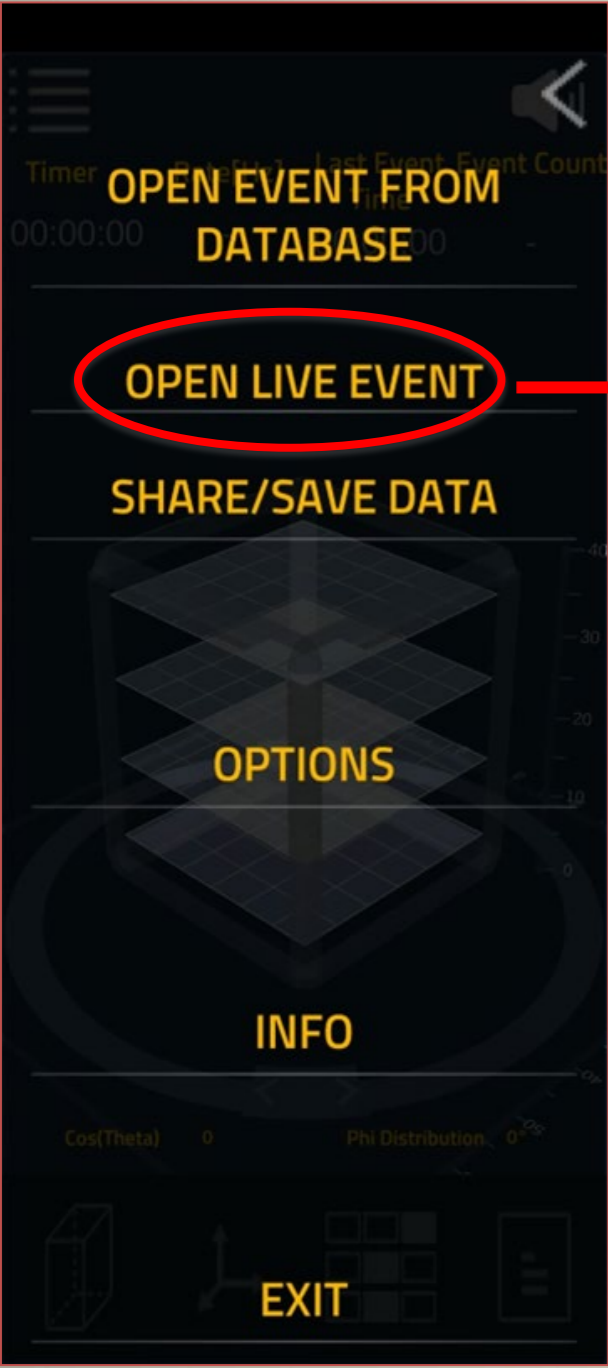
L'App «Cosmic Rays Live»



L'App «Cosmic Rays Live»



L'App «Cosmic Rays Live»



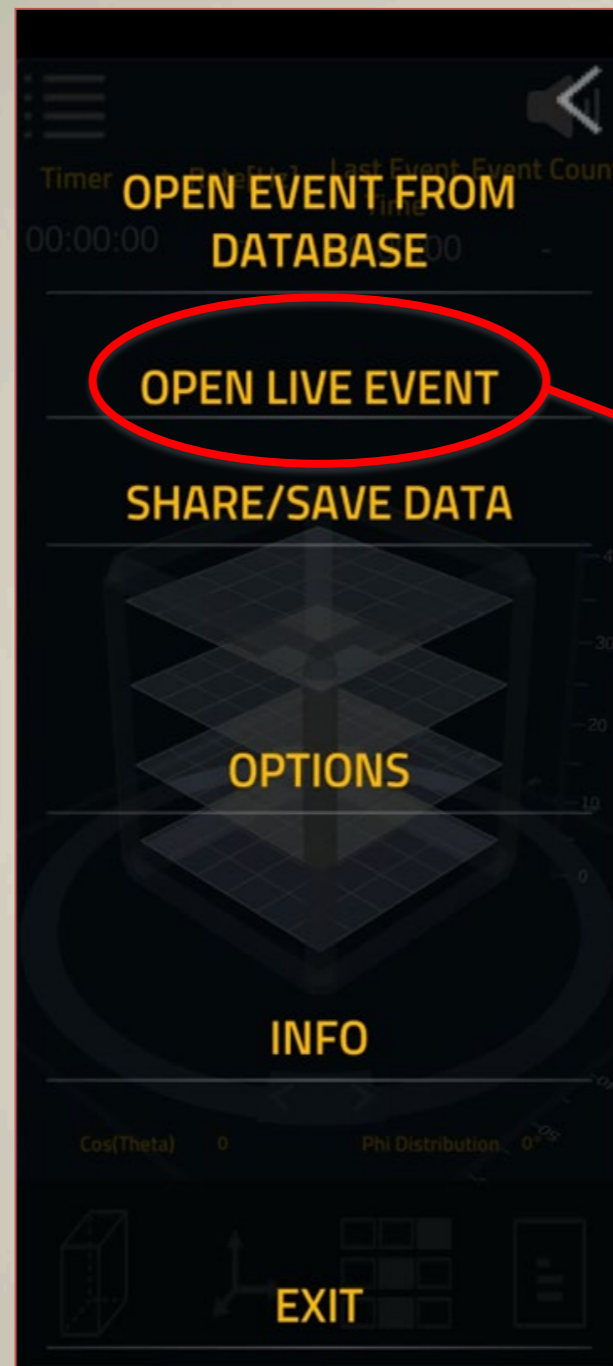
«Cosmic Rays Live»: dove trovo i dati?

The first screenshot shows the main menu with the following options: OPEN EVENT FROM DATABASE (circled in red), OPEN LIVE EVENT, SHARE/SAVE DATA, OPTIONS, INFO, and EXIT. The second screenshot shows a file selection screen with the path `/storage/emulated/0/Download/Crc` and a list of files including `Bergamo Scienza_10-09-2022 22-30-30.txt`, `LNGS_10-10-2022 10-43-21.txt`, and `LNGS_11-12-2022 12-14-20.txt`. The third screenshot shows a 3D visualization of the detector with a green line indicating a particle path. The fourth screenshot shows a data table with the following columns: Event ID, CRC, and Event Count.

Event ID	CRC	Event Count
7186	0C080818	10103020 0
7187	08081810	01060820
7188	01020408	20100402
7189	04081020	02040408
7190	01010202	10080804
7191	21020204	24040404
7192	08081010	10100808
7193	01020202	08101020
7194	01060820	10080402
7195	04020203	04040408
7196	02020202	01010101
7197	02020202	20101018

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.

«Cosmic Rays Live»: dove trovo i dati?

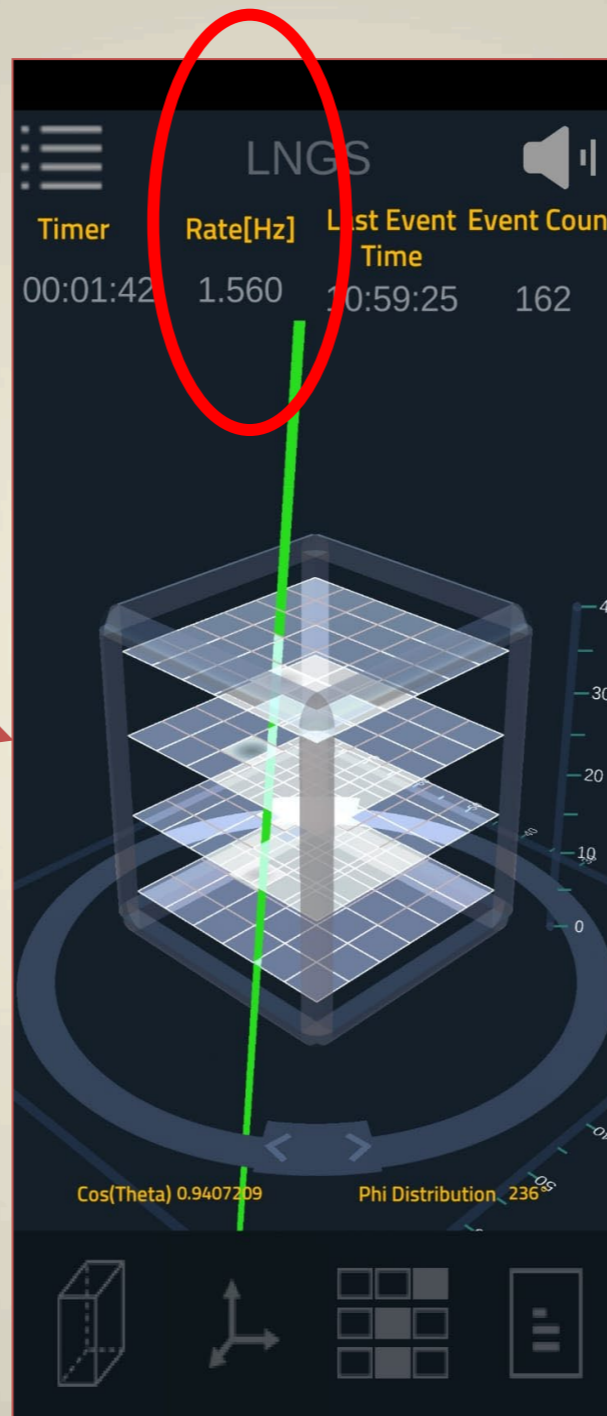


File	Modifica	Formato	Visualizza ?
6633	02010101	20100402	0
6634	08101020	10080404	1.651
6635	01010202	02020408	0.832
6636	10100808	01010101	0.767
6637	20300804	10101008	0.686
6638	02040C08	20100804	0.693
6639	08040201	02020202	3762.97
6640	02020202	01020408	1.582
6641	02081020	08040402	2.031
6642	10080804	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

Per il sistema i-OS: 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 una modalità di condivisione (e-mail, whatsApp,...). Il file inviato è in formato txt.

Cosa posso misurare con un CRC tramite App?

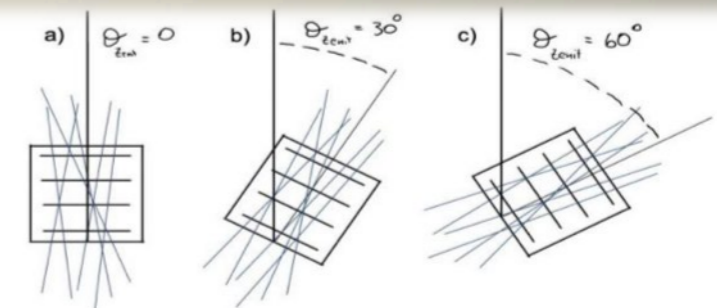


E' possibile misurare il numero di muoni al secondo visti dal CRC selezionato (LNGS nel nostro caso). Il valore in Hz può essere letto nella casella "rate"[Hz]. Il valore si aggiorna ogni 100 secondi. E' possibile fare misure più lunghe per migliorare l'errore statistico, in tal caso il flusso di muoni sarà pari a:

$$\text{Event Count/Timer in s}$$

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

Se c'è la possibilità di movimentazione del CRC si può calcolare il flusso al variare dell'angolo, misura che tipicamente viene fatta durante l'ICD.



Schermata completa dell'App

☰ **LNGS** 🔊
Timer **Rate[Hz]** **Last Event Time** **Event Count**
 00:02:21 1.560 11:01:9 344

X PLANE **Y PLANE**

Z PLANE

📦 📐 📊 ☰

☰ **LNGS** 🔊
Timer **Rate[Hz]** **Last Event Time** **Event Count**
 00:36:42 2.110 05:41:39 3659

100%

Plane 1

Plane 2

0%

📦 📐 📊 ☰

☰ **LNGS** 🔊
Timer **Rate[Hz]** **Last Event Time** **Event Count**
 00:37:47 2.110 05:43:15 3808

100%

Plane 3

Plane 4

0%

📦 📐 📊 ☰

☰ **LNGS** 🔊
Timer **Rate[Hz]** **Last Event Time** **Event Count**
 00:39:01 2.340 05:44:47 3943

Strip Y Total Y-Plane frequency

Strip Y Count **StripY/PlaneY Count (%)**

	ch0	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5
Plane A	586	662	674	728	829	734
Plane B	377	730	796	919	942	506
Plane C	372	690	961	917	962	516
Plane D	512	762	811	592	880	790

	ch0	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5
Plane A	13	15	15	17	19	17
Plane B	8	17	18	21	22	11
Plane C	8	15	21	20	21	11
Plane D	11	17	18	13	20	18

📦 📐 📊 ☰

Schermata completa dal PC

File View Option Help 00:00:00 COM7 Online Offline digitalcomeda

Pause

LOGO IMAGE **CRC Cosmic Rays Cube**

DATA VIEW

Event Type	Event Data and Time	Event ID	Event Location
-	5 30 2017 9.30.29 AM	0844	08040201 10080201

3D VIEW

XYZ VIEW

DISTRIBUTION

ANGLES

STATISTICS

TOTAL EVENTS 236

X Plane

Y Plane

Z Plane

Plane 4

Plane 3

Plane 2

Plane 1

Cos(Theta) 0.7580981

Phi Distribution 144°

Strip X total

Strip X Count

Strip Y Total

Strip Y Count

X-Plane frequency

StripX/PlaneX Count (%)

Y-Plane frequency

StripY/PlaneY Count (%)

Strip X Count

	ch0	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5
Plane A	46	43	47	48	39	40
Plane B	20	53	63	61	42	32
Plane C	22	42	58	68	59	27
Plane D	42	22	29	64	51	46

StripX/PlaneX Count (%)

	ch0	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5
Plane A	17	16	17	18	14	15
Plane B	7	19	23	22	15	11
Plane C	7	15	21	24	21	9
Plane D	16	8	11	25	20	18

Strip Y Count

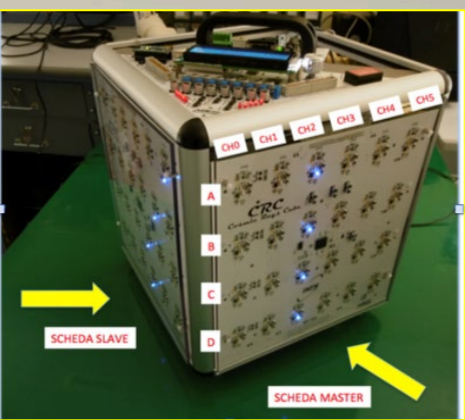
	ch0	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5
Plane A	41	38	35	52	52	41
Plane B	17	49	57	73	52	21
Plane C	14	38	70	68	53	29
Plane D	23	40	55	56	49	39

StripY/PlaneY Count (%)

	ch0	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5
Plane A	15	14	13	20	20	15
Plane B	6	18	21	27	19	7
Plane C	5	13	25	25	19	10
Plane D	8	15	20	21	18	14

DECODIFICA

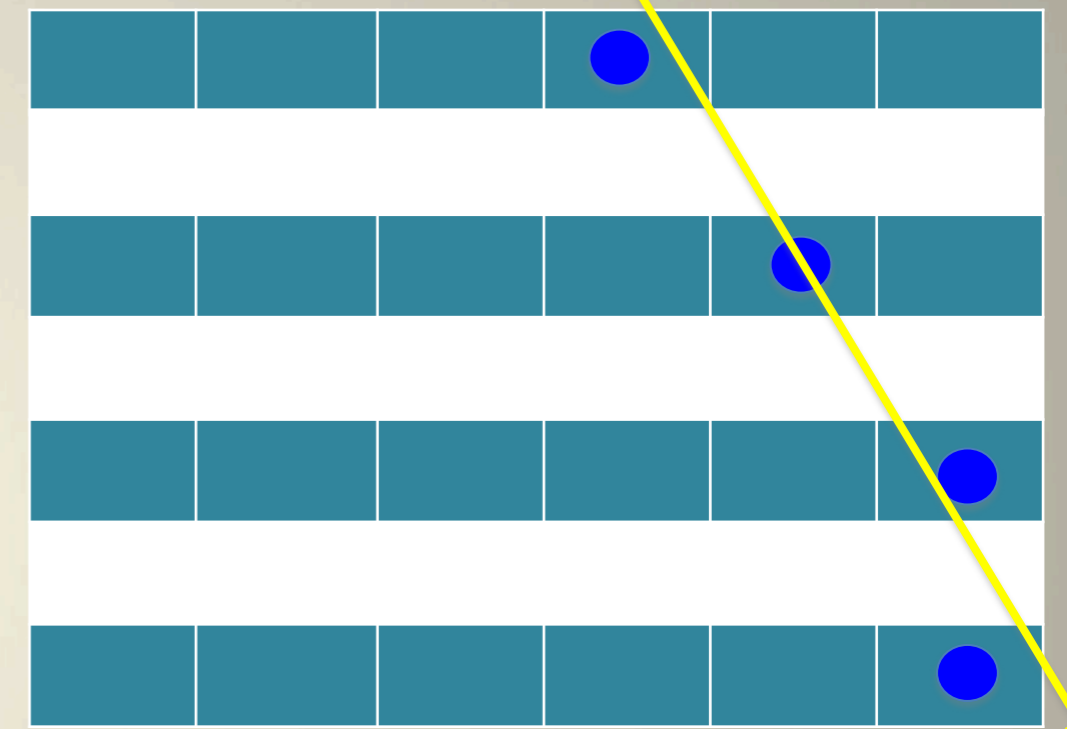
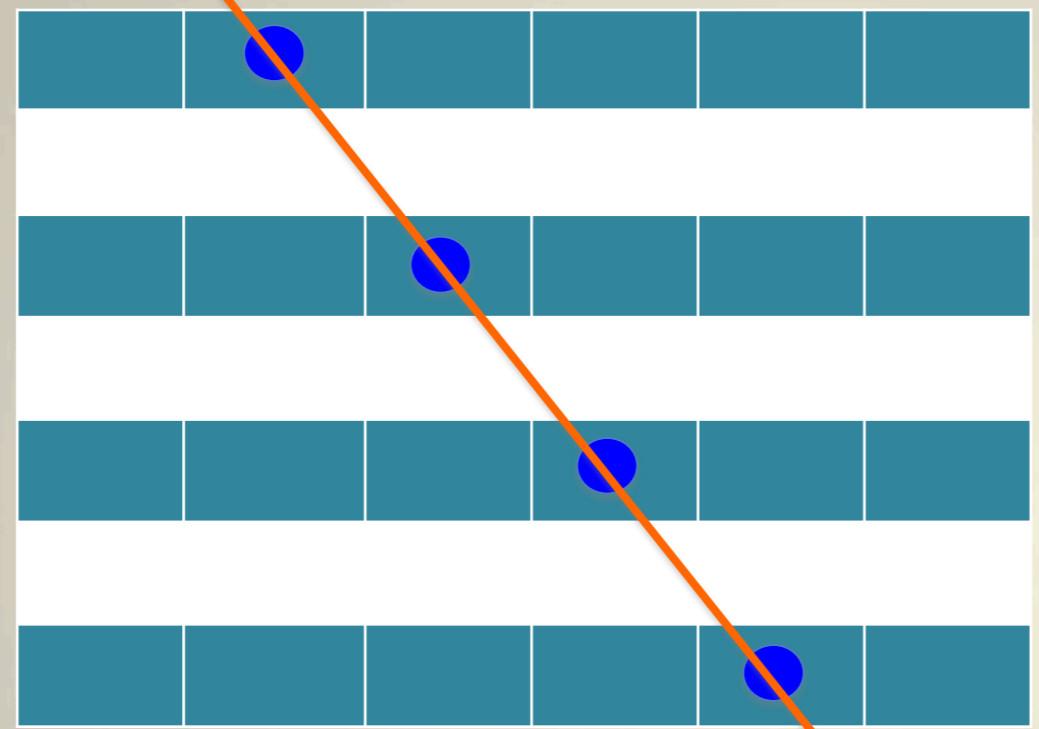
Scheda SLAVE



Scheda MASTER

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



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

FOTO PID 2024: ESPOSIZIONE DI TROFEO DI CACCIA AL MUONE

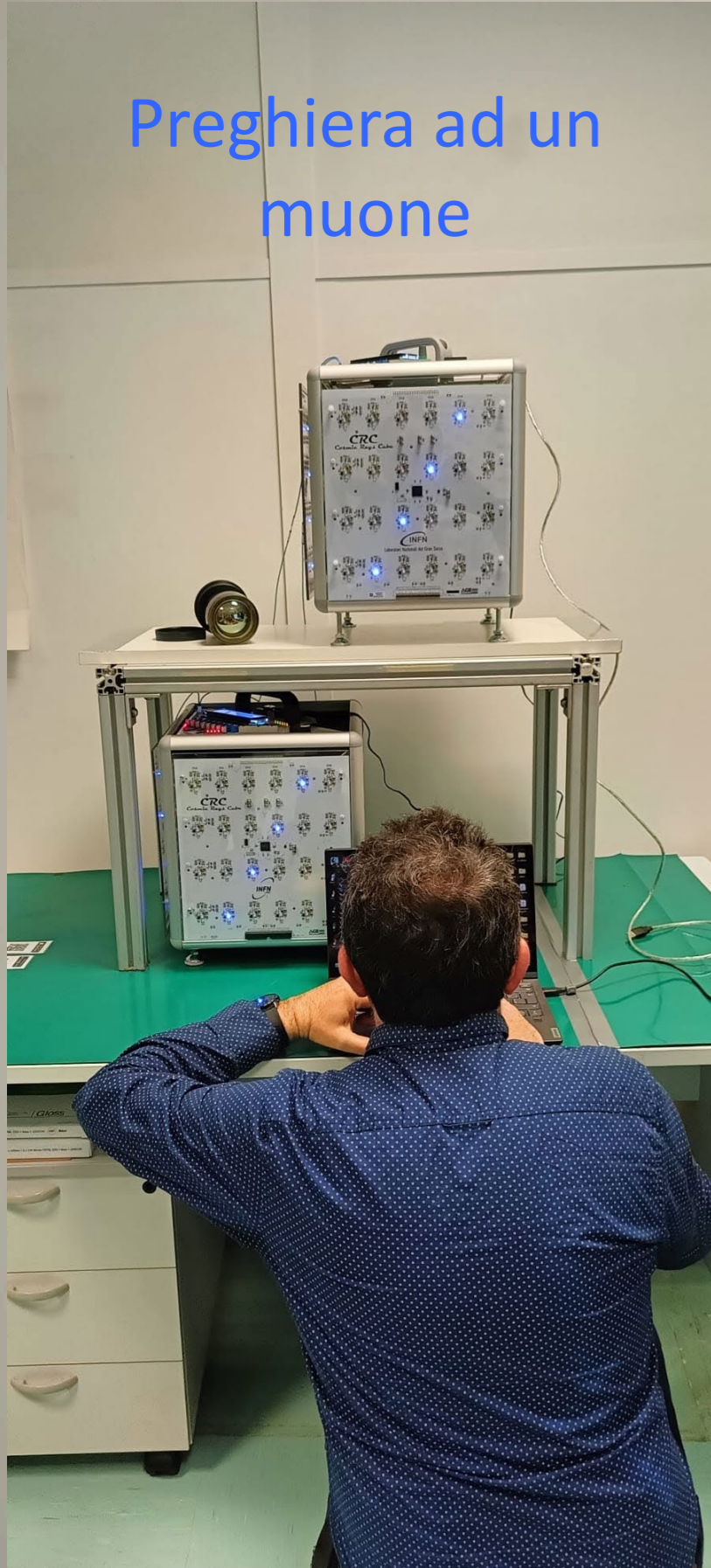


FOTO PID 2024: OSCURAMENTO DEL MUONE

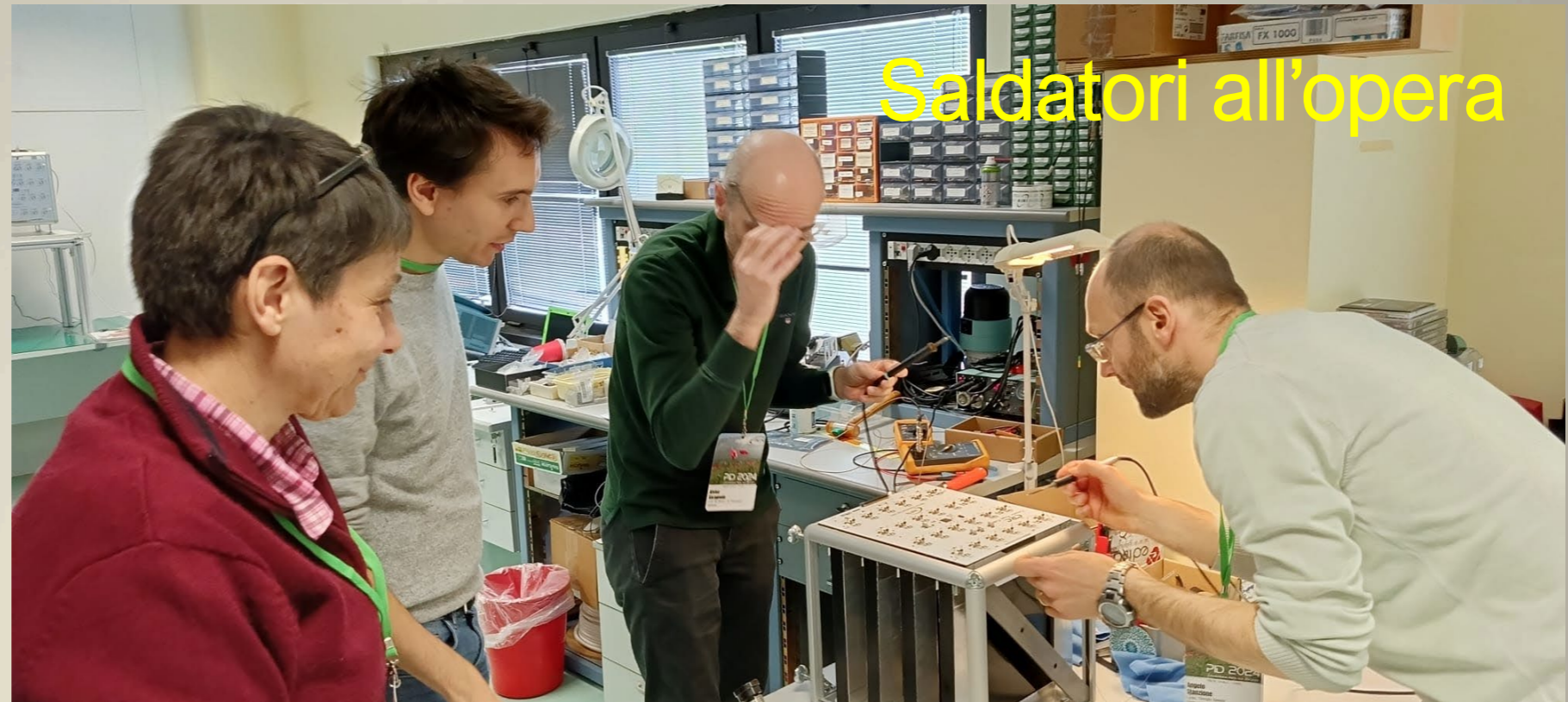


FOTO PID 2024:

Preghiera ad un muone



Saldatori all'opera



Tentativo di cattura di un muone



E per finire....

PID LNGS 8/12 APRILE 2024

Manco Nardu
Liceo Duca degli Abruzzi
(TREVISI)

Veronica Pelli
LICEO SCIENTIFICO
ALESSI (PERUGIA)

Cristina Sperio
Liceo Fellico - Terni
(TERNI)

Roberto Pirolo
I.T.T. "Panetti-Pitagora"
(BARI)

Matteo Monni
LICEO SCIENTIFICO GALILEI
TACERATA

Giulia Zolnerella
"Giulio Cominardi"
(Cinzello 4 - 14)

Elisabetta
Bianchi
IIS Volpa
Lodi

Leone D. Giulio
I.I.S. "PITO SARRACCHINI"
(SIENA)

Francesca Fiesi
LICEO SCIENTIFICO "A. SERPIERI"
RIMINI

Elisa Camorosi
POMINO-ROSA
NERETO-TE

Stefania Fadda
LICEO "GIOREGIO SPERIA"
DOMODOSSOLA

Alire Vampola
IIS "FRANCO-FRANCOTTI"
MESTRE (VE)

Valeria
L.S. "A. EINSTEIN"
(TERAMO)

Alessandro Adamini
Liceo "E. Meda"
Villafranca di Verona

Hessia Busotti
LICEO CITTÀ DI PIERO
SANSEPOLERO

Stefania
Liceo "Pierantoni"
Pescera (BG)

Maria For
I.I.S. "E. MEDI - N. VACCALUZZO"
LEONFORTE (EN)

Giulia
IIS "GRASSI"
SAVONA

Anna
LICEO SCIENTIFICO
"ENRICO ARMANDI"
BITETTO BOG

Luigi Pellegrini
IIS GADDA
Baterno Dugnano

Christina
IIS VON NEUMANN
(ROMA)

Giulia
LICEO SCIENTIFICO
"E. GAMBINI" - Lodi

Stefano
Liceo Scientifico
"Augusto Righi" - Bologna

Anna Teresa Mulazzoni
Liceo Scientifico
"I.O. Montefeltro"
SASSOROVATO-PV

Carlo Festaghi
I.I.S. "PERTINI-MONTINI-CUOLO"
(CAMPOBASSO)

**GRAZIE PER L'ATTENZIONE
e
BRAVI A TUTTI PER IL SUCCESSO
NELLA COSTRUZIONE DEL CRC**

MA FUNZIONERA'?

SI

NO

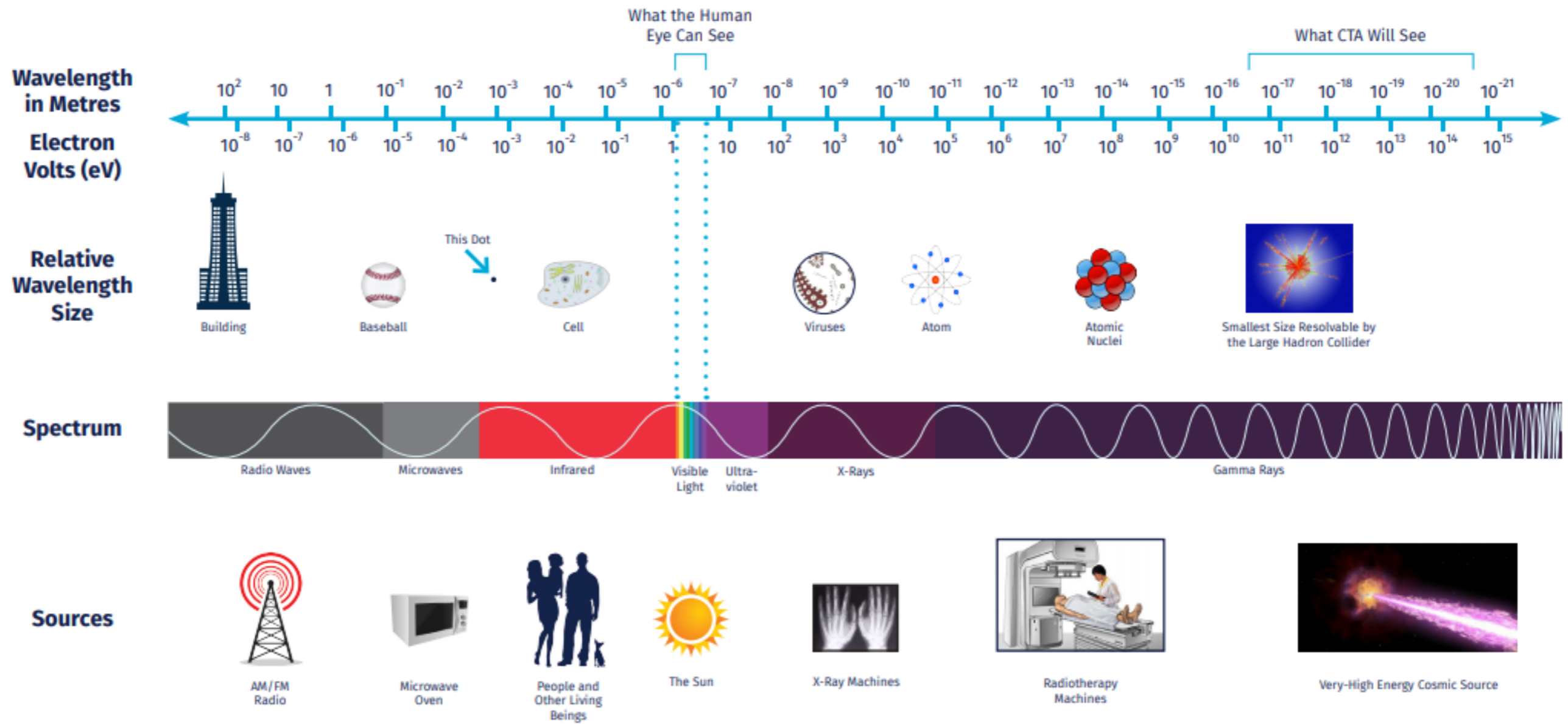
Attanasio Candela
Laboratori Nazionali del Gran Sasso
candela@lngs.infn.it

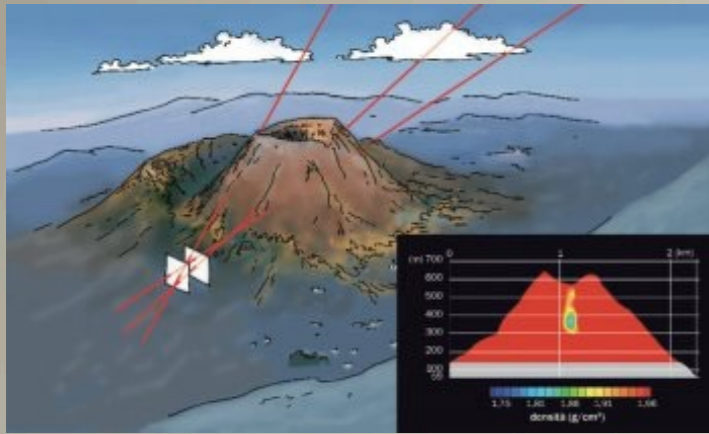
SPARE SLIDES

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).

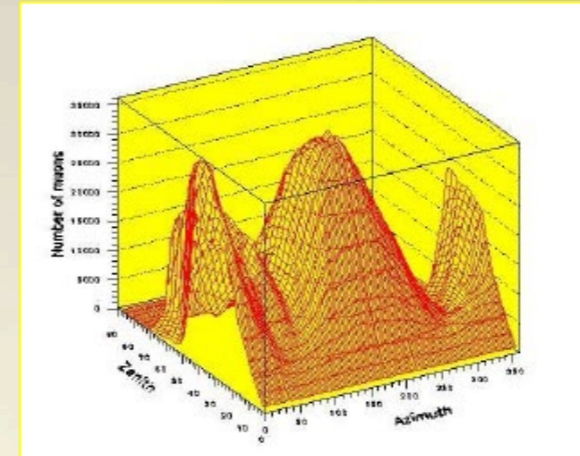
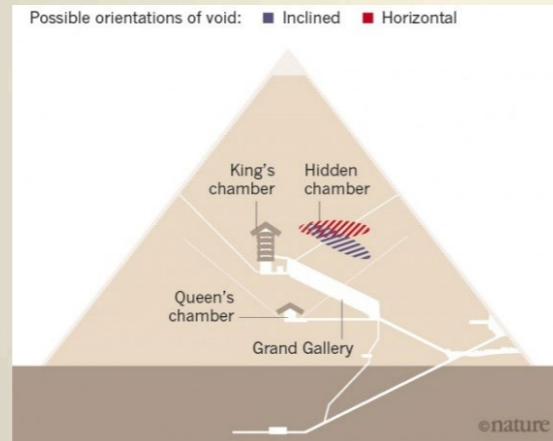
LA RADIAZIONE COSMICA: UN ECCELLENTE LABORATORIO DIDATTICO



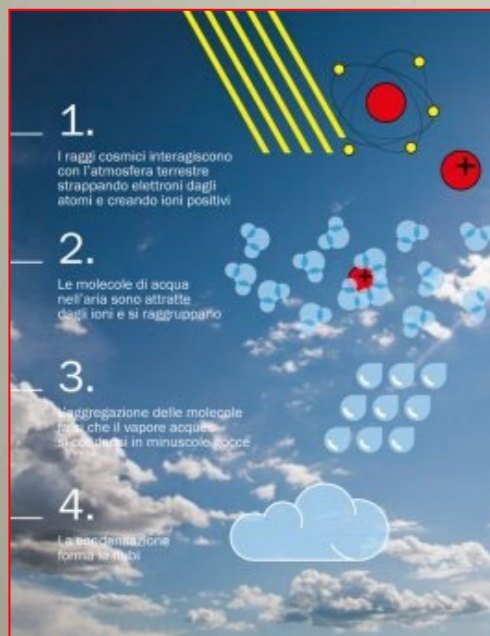


Ecco come è visto il vulcano giapponese Satsuma_Iwojima attraverso la radiografia muonica. In Italia il progetto **MURAVES** (MUon-Radiography-of-VESuvius) prevede il posizionamento di un telescopio a muoni alle pendici del Vesuvio in modo da studiare la struttura sommitale del vulcano. Sono possibili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

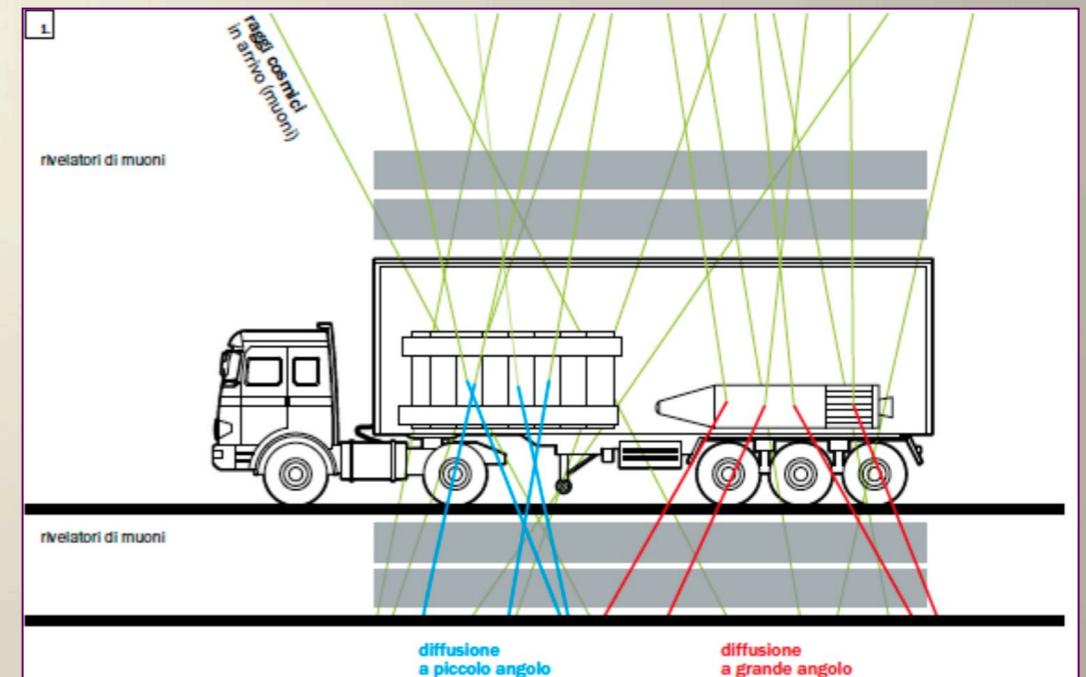
Con la **Muon Radiography** è possibile evidenziare stanze nascoste all'interno di tunnel o scoprire masse disomogenee prossime o sovrastanti grotte naturali. Nel 1970, il premio Nobel Luis Alvarez ebbe l'idea di evidenziare con i muoni stanze non ancora scoperte dagli archeologi nella Piramide di Chephren (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 (Cosmics 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.