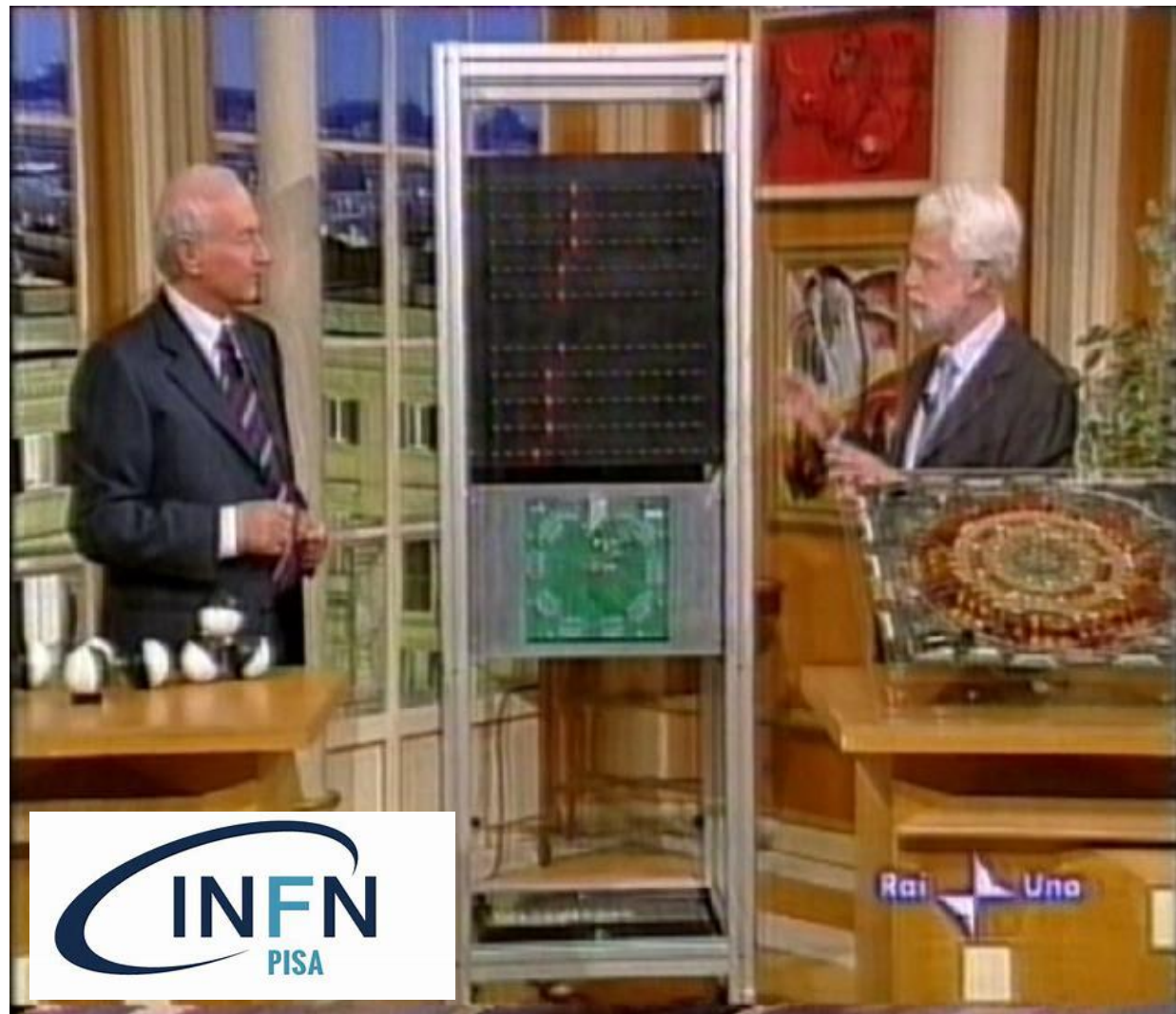


INTERNATIONAL COSMIC DAY

November 22 | 2022

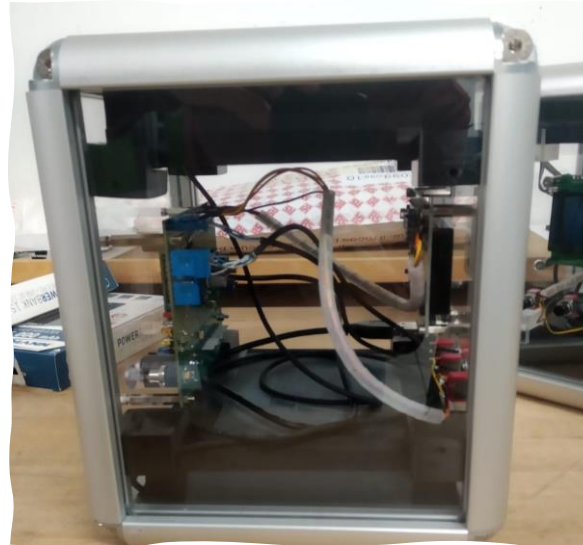
Tecniche di rivelazioni per raggi cosmici

Federico Pilo - INFN Sezione di Pisa



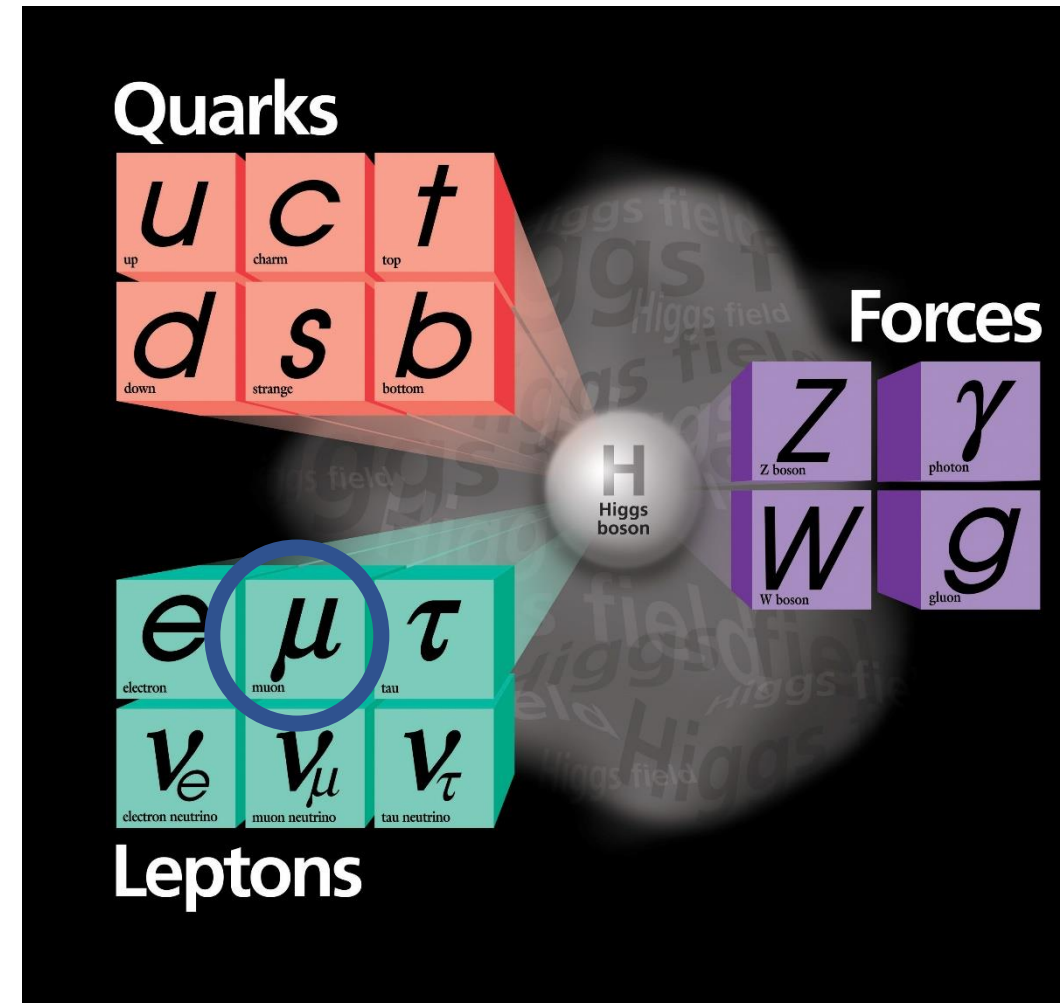
L'ultimo nato: il cosmocube

- Un lavoro di sviluppo di alcuni anni portato avanti da un gruppo di ricercatori/tecnici di grande esperienza



La particella più abbondante nei raggi cosmici al livello del mare: i muoni

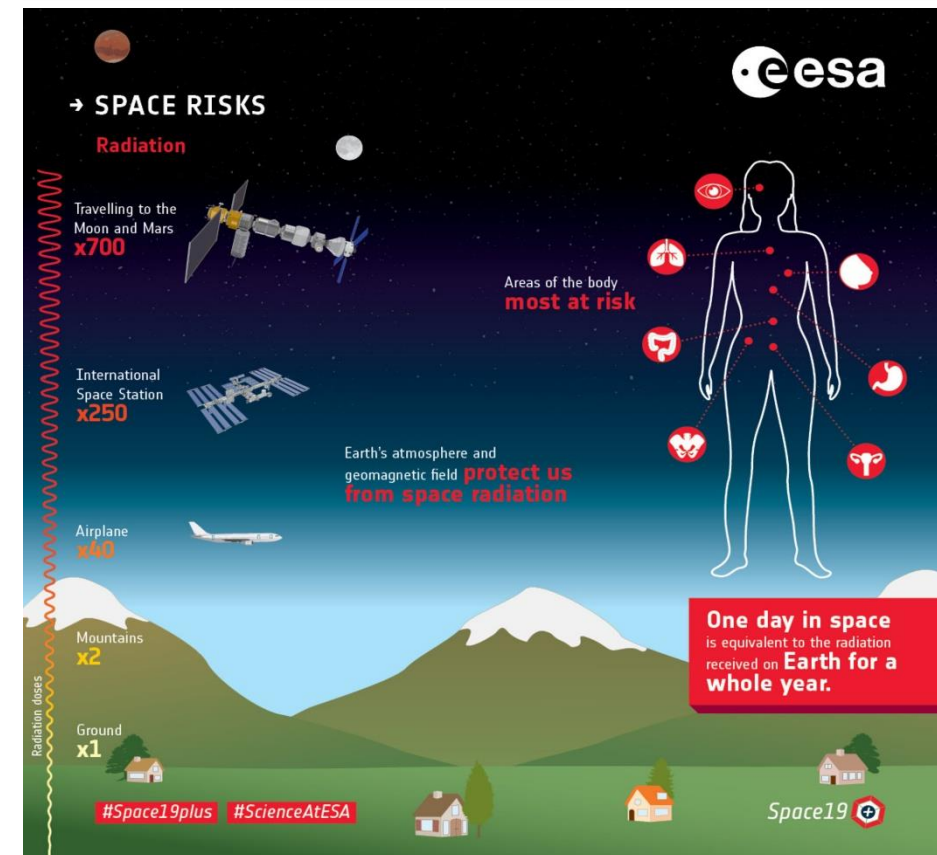
- Al livello del mare le particelle secondarie, più facilmente misurabili, sono i **muoni**
- Queste particelle sono simili agli elettroni (carica elettrica negativa), ma hanno una massa 200 volte superiore
- Se tenete il palmo della vostra mano verso il cielo, ogni secondo è attraversato da un muone. L'intensità dei muoni è, infatti, di circa **1 muone ogni cm² al minuto**
- Il muone, inoltre, è una particella caratterizzata da una vita media di circa 2 milionesimi di secondo, passato questo tempo dalla loro creazione, decade ossia scompare e al suo posto appaiono altre tre particelle: un elettrone e due neutrini



La radiazione ionizzante

- La radiazione ionizzante è la radiazione che trasporta abbastanza energia **da liberare elettroni da atomi o molecole**
- La radiazione ionizzante può essere composta da particelle subatomiche o ioni o atomi che si muovono ad alte velocità, o anche onde elettromagnetiche nell'estremità più energetica dello spettro elettromagnetico
- I muoni (e le altri componenti dei CR) sono particelle ionizzanti di alta energia (4 GeV mediamente)
- Tutto quanto sulla terra è sottoposto a continue interazioni con i muoni

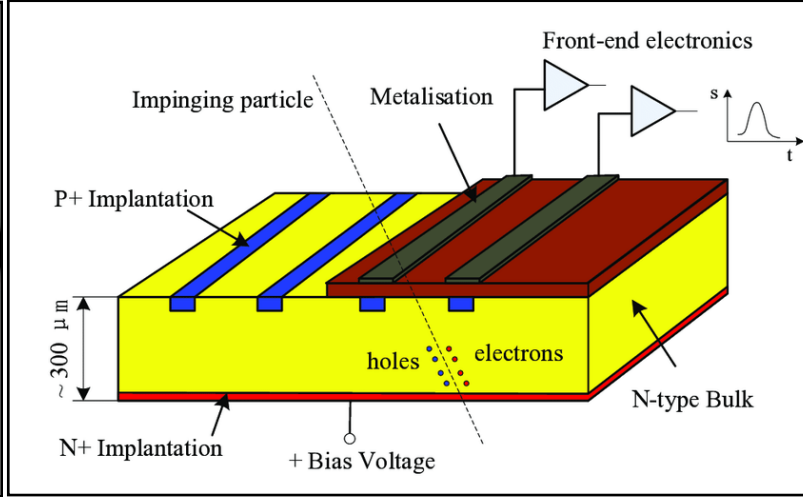
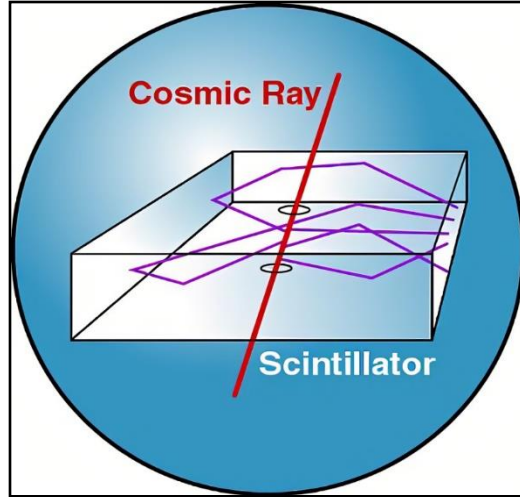
Rivelatori di raggi cosmici per studiare il loro impatto sulla salute degli astronauti



1 eV è l'energia cinetica acquisita da un elettrone sottoposto ad una differenza di potenziale di 1 V in vuoto
1 eV è pari a $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule

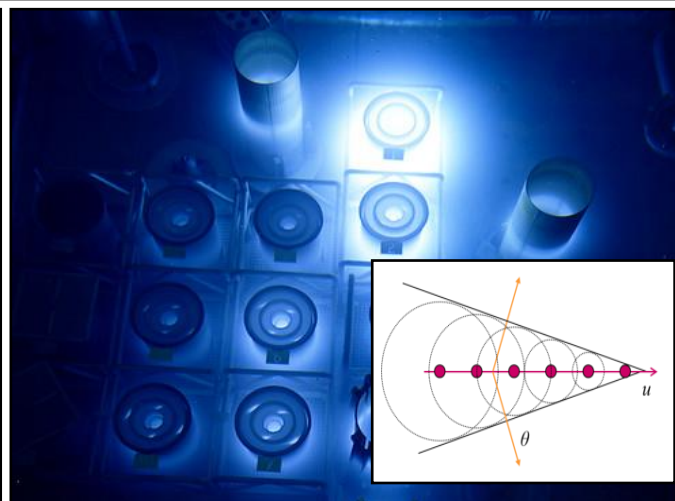
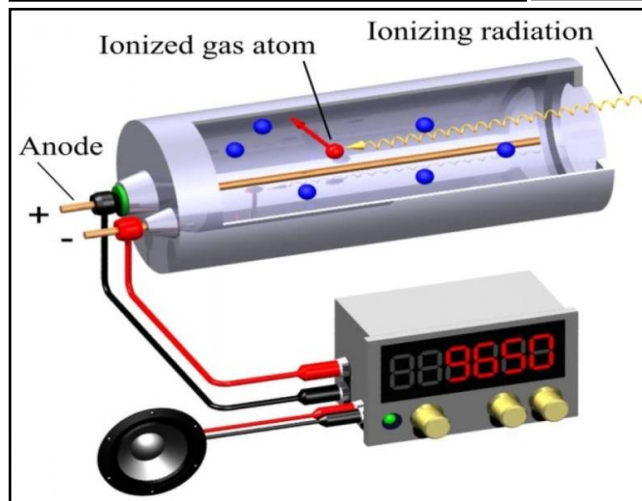
I materiali adatti a rivelare i raggi cosmici

EMISSIONE DI LUCE IN MATERIALI SCINTILLANTI, MATERIALI CAPACI DI EMETTERE IMPULSI DI LUCE, IN GENERE VISIBILE O ULTRAVIOLETTA, QUANDO ATTRAVERSATO DA PARTICELLE CARICHE



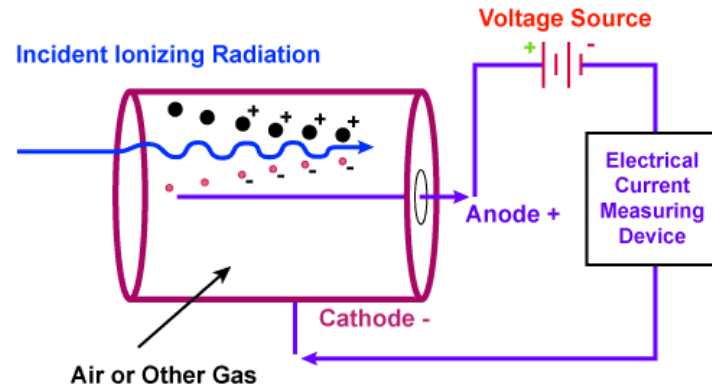
PRODUZIONE DI COPPIE ELETTRONI-LACUNE IN MATERIALI SEMICONDUCTORI (come il silicio con cui si realizzano i transistor)

GAS, UN MATERIALE FACILMENTE IONIZZABILE IN CUI LA GRANDE MOBILITÀ CHE IN ESSO HANNO IONI ED ELETTRONI CONSENTE UNA FACILE RACCOLTA DELLA CARICA

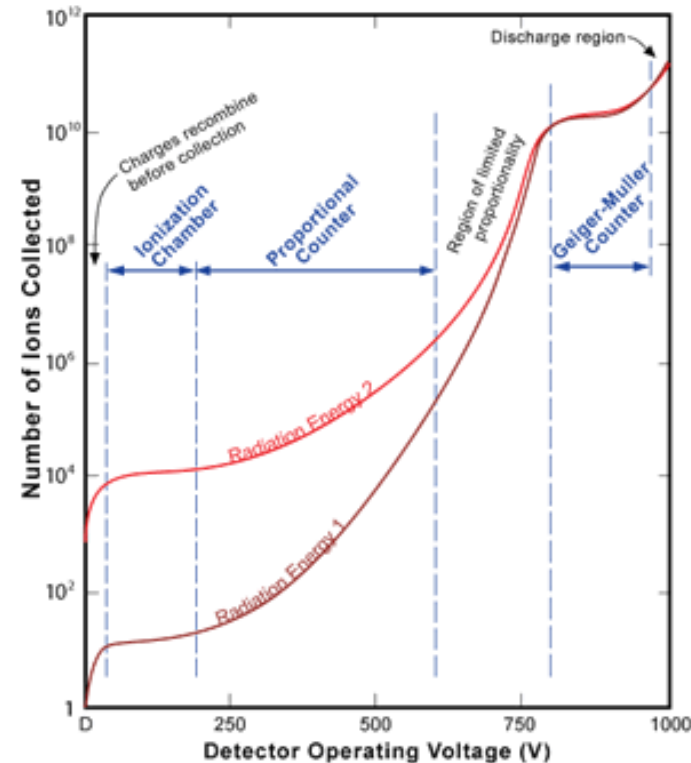


LUCE EMESSA PER EFFETTO ČERENKOV QUANDO LA VELOCITÀ DELLA PARTICELLA NEL MEZZO ATTRAVERSATO RISULTA SUPERIORE ALLA VELOCITÀ DI FASE DELLA LUCE NELLO STESSO MEZZO

I rivelatori a gas: camera ad ionizzazione e geiger



- L'energia tipica necessaria ad ionizzare un gas è pari a qualche decina di eV (26 eV per l'Argon)
- Un muone perde qualche keV/cm di energia attraversando il gas
- Il numero di coppie elettrone/ione che si creano è dell'ordine di qualche centinaio ... difficilmente rivelabili -> E' necessario **MOLTIPLICARLE**



I rivelatori a stato solido



Realizzati con semiconduttori, sostanze che presentano caratteristiche di conduttività elettrica intermedia tra quella dei conduttori e quella degli isolanti



Drogando due aree contigue di un semiconduttore in modo da creare eccedenze di elettroni (n) o di lacune (p) si crea una giunzione p-n, base dei dispositivi a semiconduttore come il **DIODO**



Un rivelatore al silicio è una giunzione *p-n* polarizzata inversamente



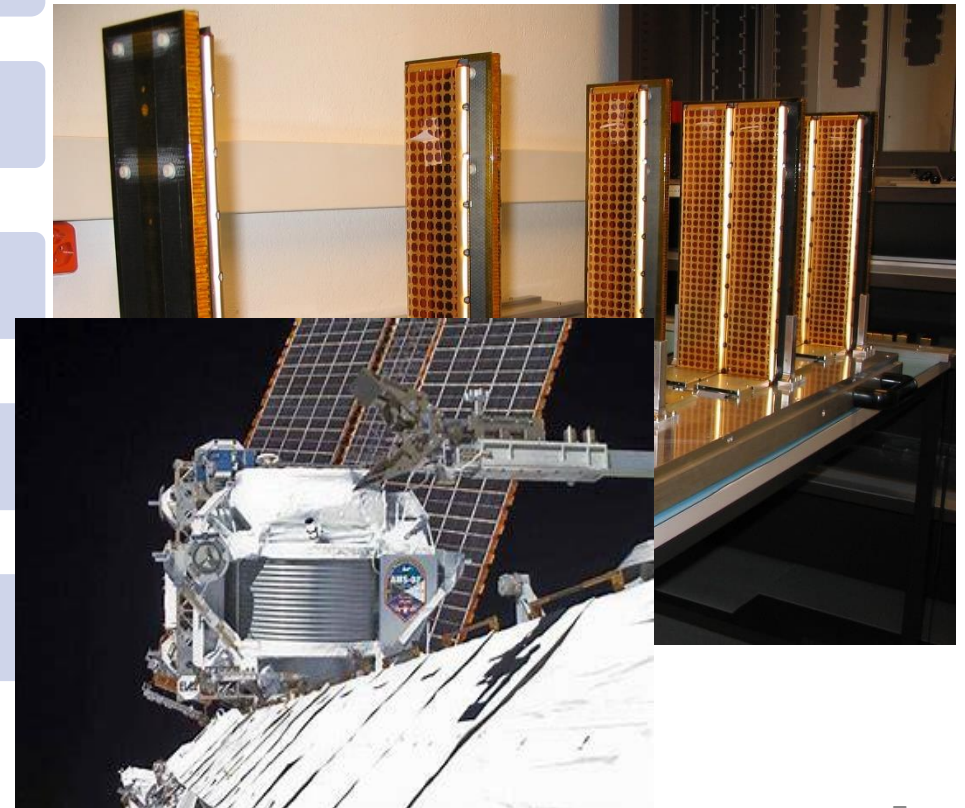
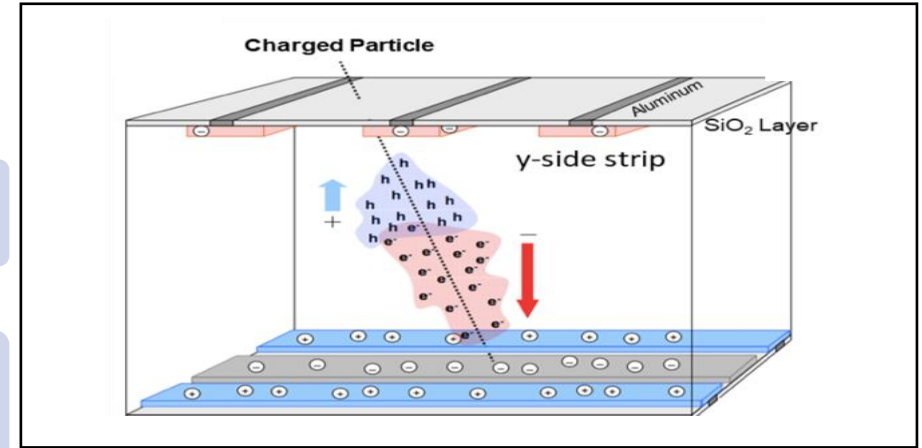
L'energia per creare una coppia elettrone-lacuna: 3.6 eV



L'energia media rilasciata da una particella al minimo di ionizzazione (MIP) è circa 390 eV/ μm , che permette di generare circa 100 coppie elettrone-lacuna in un micron

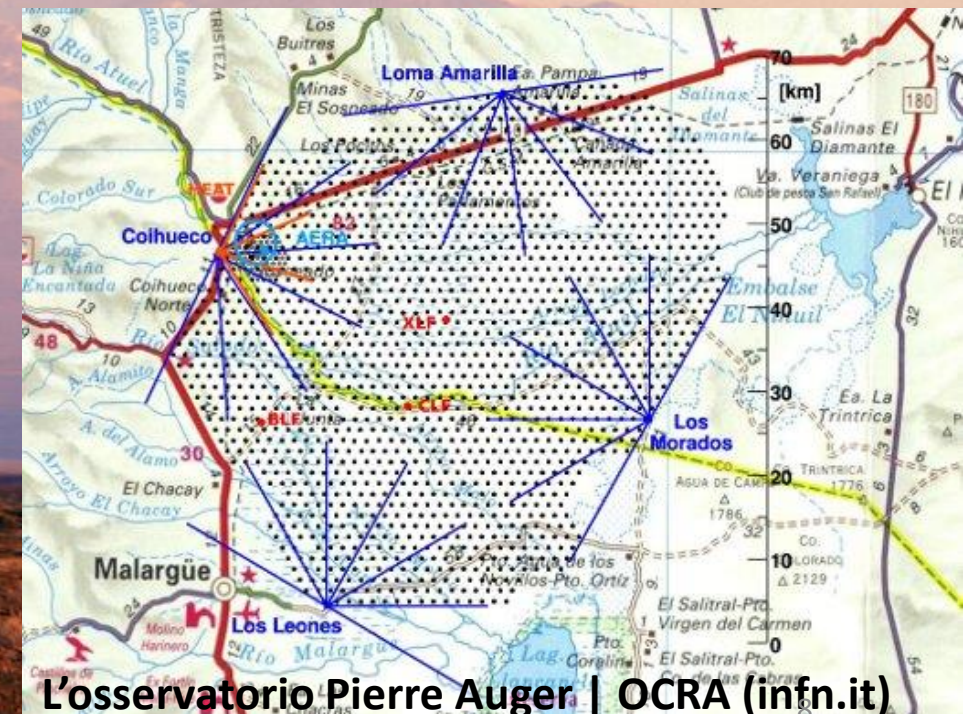
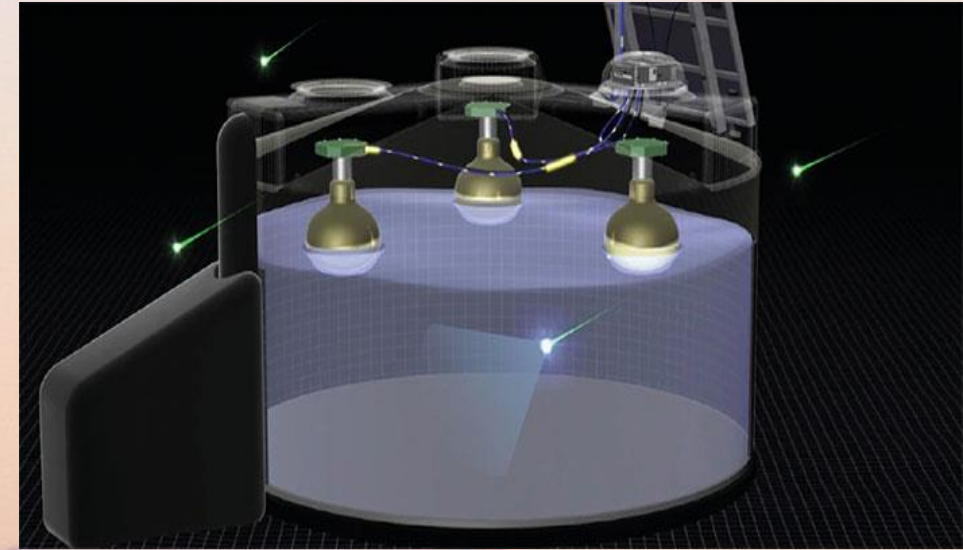


La precisione nell'individuazione delle tracce in un rivelatore può arrivare fino a 2.6 μm



Rivelatori a luce Čerenkov: l'osservatorio Pierre Auger

- Studiato per rivelare raggi cosmici ad altissima energia che colpiscono la terra con energie che possono arrivare ad oltre 10^{20} eV
- Il rivelatore di superficie dell'osservatorio PIERRE AUGER è costituito da 1600 taniche d'acqua distribuiti su più di 3000 km² (quasi come la Val d'Aosta!)
- Ogni tanica contiene 12 tonnellate di acqua ultra-pura, scrutata da 3 fotomoltiplicatori.
- Quando una particella dello sciame secondario attraversa l'acqua genera luce per effetto Čerenkov, luce che viene quindi rilevata dai fotomoltiplicatori
- Ogni stazione è dotata di un modulo GPS per consentire di calcolare con alta precisione il tempo di arrivo delle particelle



L'osservatorio Pierre Auger | OCRA (inf.n.it)

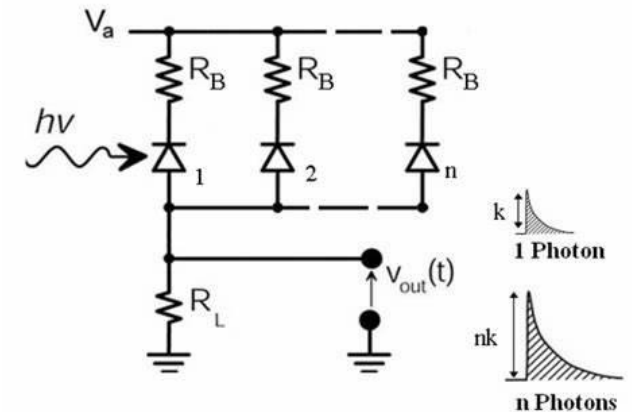
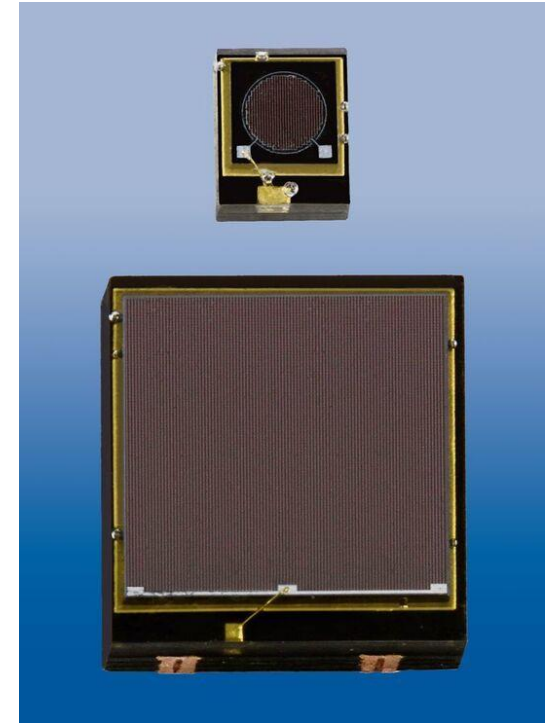
Gli scintillatori

- Uno «scintillatore» è un qualunque materiale che emette un impulso di luce poco dopo il passaggio di una particella carica
- Gli scintillatori hanno proprietà note come luminescenza. Materiali luminescenti assorbono energia e la riemettono sotto forma di luce visibile. Se l'emissione avviene subito dopo l'assorbimento (10^{-8} s) il processo è chiamato **fluorescenza**
- Un buon scintillatore (utilizzabile) deve avere:
 1. alta efficienza per convertire l'energia di eccitazione in fluorescenza
 2. trasparenza alla luce di fluorescenza in modo da poterla trasmettere
 3. emissione sulla lunghezza d'onda in cui funzionano i rivelatori di luce (generalmente luce visibile)
- Esistono 2 categorie di materiale scintillante: inorganico (cristalli, elementi nobili liquidi), organico (composti di idrocarburi in forma liquida o **plastica**)



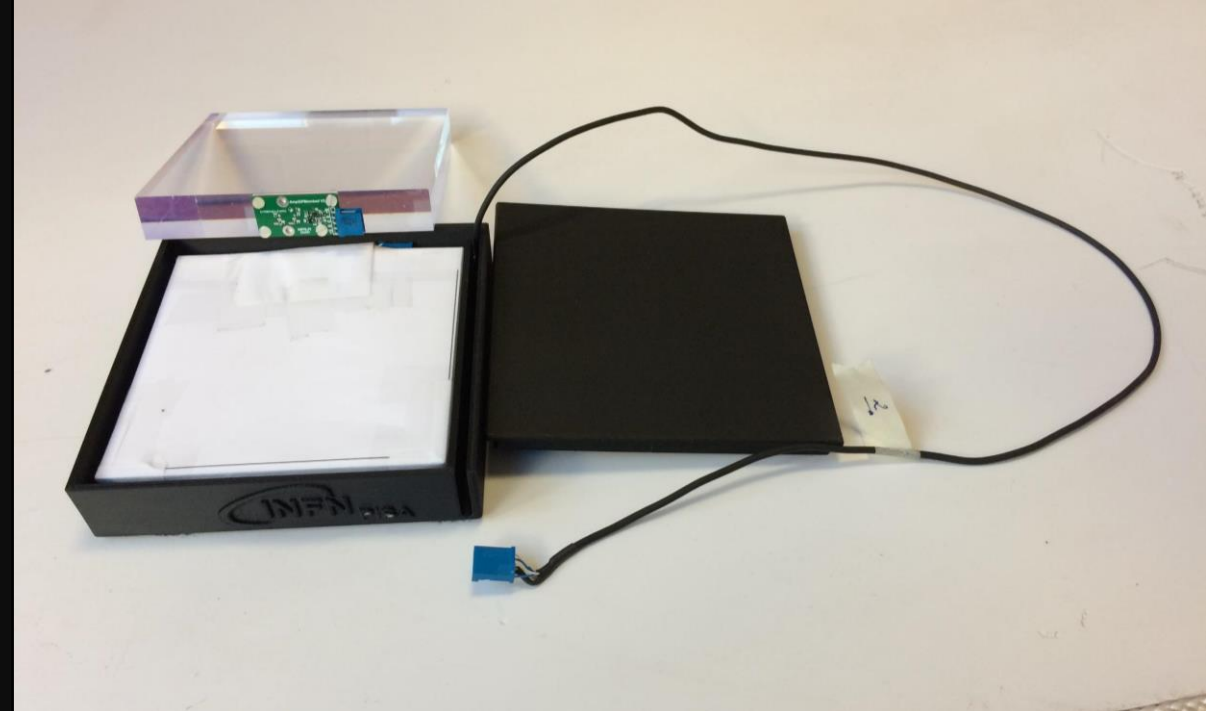
Rivelatori di luce: i Silicon Photomultipliers (SiPM)

- I **SiPM** costituiscono la più moderna tipologia di fotorivelatori a stato solido
- Sono costituiti da una matrice di fotodiodi detti “pixel”
- Il fotodiodo è un **particolare tipo di diodo fotorivelatore** che funziona come sensore ottico sfruttando l'effetto fotovoltaico
- In un SiPM i fotodiodi operano in modalità Geiger: l'energia rilasciata da un fotone incidente genera una coppia elettrone/lacuna che a sua volta innesca una valanga. Un fotodiodo in cui l'arrivo di un fotone ha innescato la valanga in regime Geiger, non ha possibilità di apprezzare l'arrivo di un secondo fotone
- I SiPM presentano un rumore non trascurabile, denominato “**dark current**”. Il fenomeno della dark current è spiegato dalla generazione spontanea, per effetto termico, di coppie elettrone-lacuna nella regione svuotata



Una “mattonella” per il COSMOCUBE

- Componenti necessari
 - 1 parallelepipedo di scintillatore plastico 140 x 140 x 20 mm²
 - 2 SiPM da 5 x 5 mm²
 - Grasso ottico per ottimizzare il contatto ottico tra SiPM e scintillatore
 - Un involucro di carta bianca per riflettere la luce dello scintillatore verso i SiPM
 - Una scatola completamente nera per non far entrare luce dall'esterno
-



Realizziamo un ODOSCOPIO per raggi cosmici

A che cosa serve?

1. Rivelare il passaggio di un raggio cosmico
2. A determinarne la direzione di provenienza

VOCABOLARIO

odoscòpio

odoscòpio s. m. [comp. di odo- e -scopio]. – In fisica, telescopio di contatori di particelle ionizzanti che consente la visualizzazione della traiettoria delle particelle o indirettamente (su schermo, carta, ecc.), mediante l'elaborazione elettronica...

òdo-

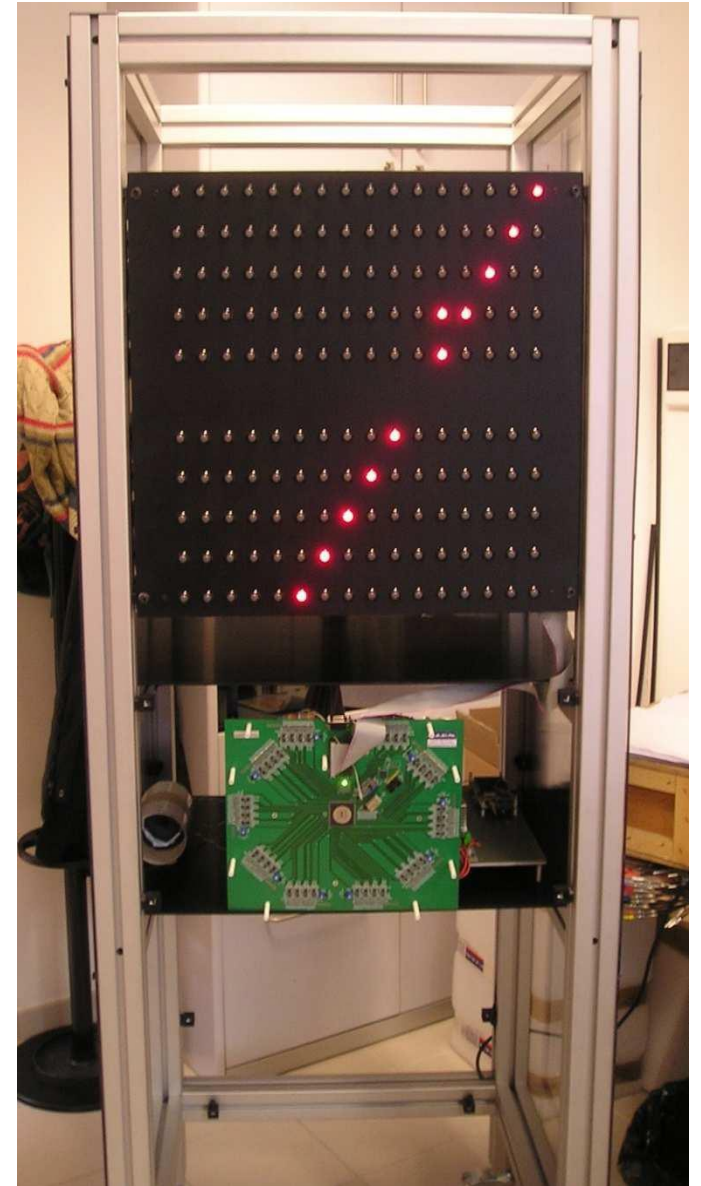
òdo- [dal gr. ὁδός «strada»]. – Primo elemento di parole composte, derivate dal greco o formate modernamente, col sign. di «via, strada» (per es., onomìa, onomàstica) e più spesso di «cammino, percorso» (odòcrono, odòmetro, odoscòpio).

[http://treccani.it/enciclopedia/odoscopio_\(Dizionario-delle-Scienze-Fisiche\)/](http://treccani.it/enciclopedia/odoscopio_(Dizionario-delle-Scienze-Fisiche)/)

Come si rivela un raggio cosmico in un odoscopio

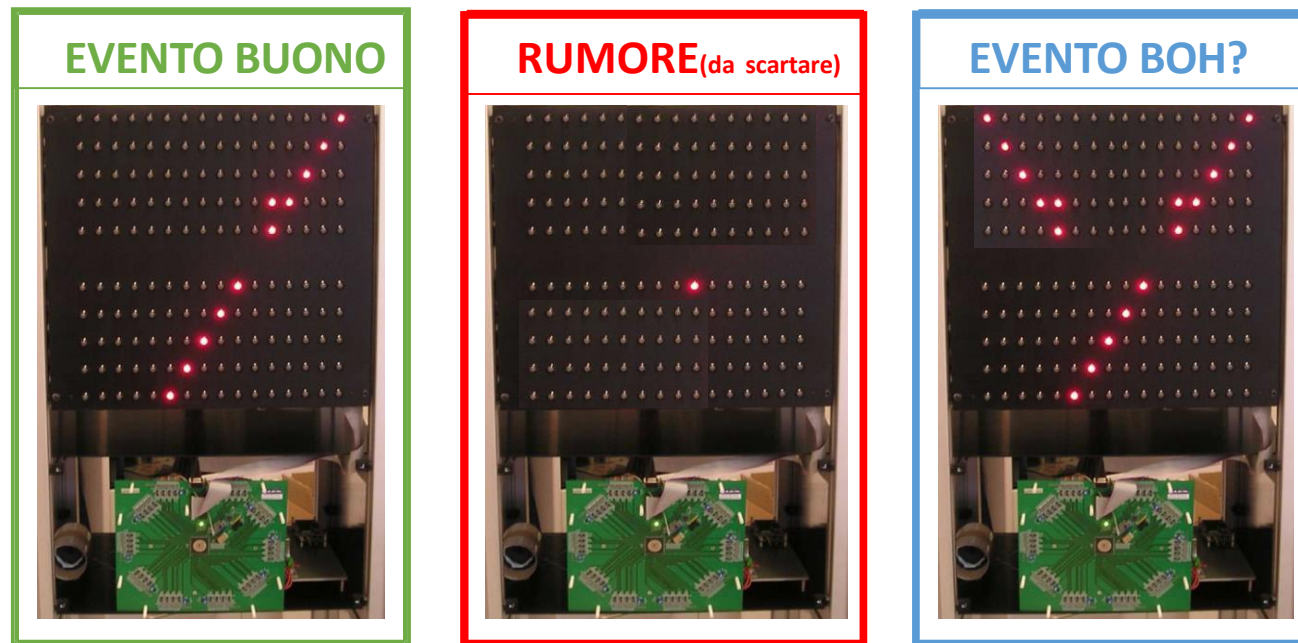
- Lo strumento è costituito da **molteplici piani** costituiti da rivelatori di radiazione ionizzante
- Ciascun piano deve poter essere attraversato dal raggio cosmico incidente senza interromperne o modificarne la traiettoria

Perché molteplici piani?



Il rumore e la selezione degli EVENTI “interessanti”

- I rivelatori per radiazioni ionizzanti producono segnali **spuri** (cioè non dovuti al passaggio di particelle cariche), spesso con alta frequenza (100-1000 Hz)
- Al passaggio di un raggio cosmico, **più piani** dell'odoscopio emetteranno un segnale **contemporaneamente** (cioè all'interno di finestre temporali dell'ordine di 100 ns)



La logica di trigger

NON È POSSIBILE REGISTRARE TUTTI GLI **EVENTI** SU DISCO ED ANALIZZARE A POSTERIORI: segnali spuri molto frequenti potrebbero impedire la registrazione degli «eventi interessanti»

E' possibile migliorare la qualità dei dati raccolti scartando a «priori» gli eventi spuri?

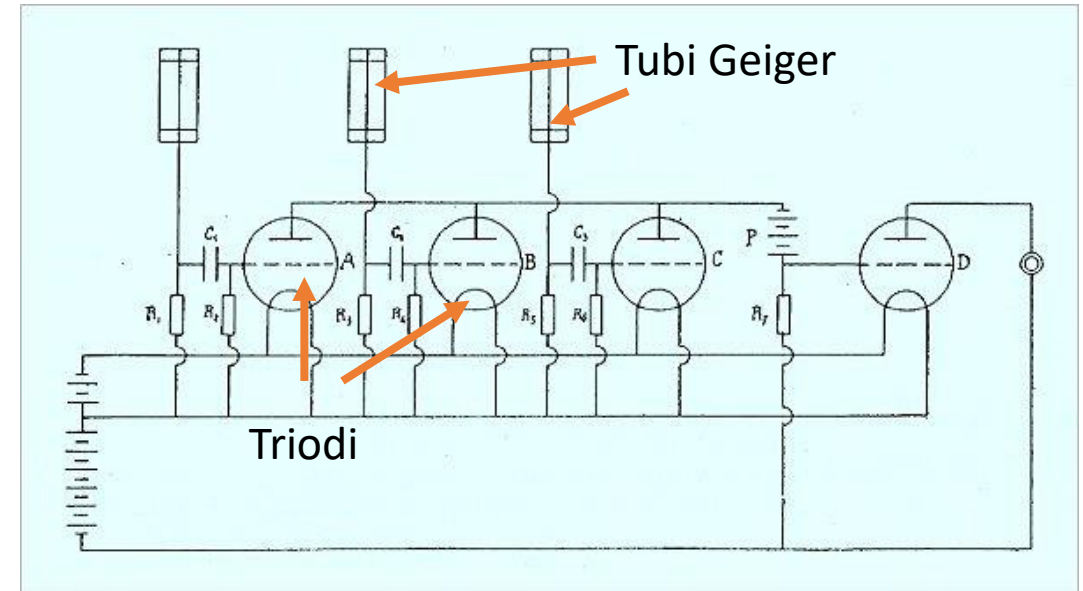
SI, utilizzando una logica di coincidenza (*). E' necessario cioè implementare una logica di TRIGGER registrando ad esempio solo gli eventi con almeno due celle "accese" in due piani differenti

* Utilizzando un circuito di coincidenza Walther Bothe (premio Nobel) e Werner Kolhörster nel 1929 mostrarono l'esistenza di particelle cariche penetranti nei raggi cosmici



BRUNO ROSSI, I RAGGI COSMICI E L'INVENZIONE DEL CIRCUITO DI COINCIDENZA

- A 24 anni Bruno Rossi inventò il primo **circuito elettronico pratico** per evidenziare le coincidenze fra due o più tubi Geiger
- Il circuito realizzato da Rossi poteva registrare impulsi coincidenti da qualsiasi numero di contatori Geiger, con un miglioramento di 10 volte nella risoluzione temporale rispetto all'esistente
- **E' stato in pratica il primo circuito "AND", precursore dei circuiti logici AND dei computer elettronici**
- Nel 1933 Rossi riportò l'osservazione di scariche quasi simultanee rilevate da contatori Geiger molto distanti tra loro posti su una linea orizzontale. Era la scoperta degli sciami estesi di particelle



Article Full-text available

Walther Bothe and Bruno Rossi: The birth and development of coincidence methods in cosmic-ray physics

June 2011 · *American Journal of Physics* 79(11)

DOI: [10.1119/1.3619808](https://doi.org/10.1119/1.3619808)

Source · [arXiv](https://arxiv.org/)

Eliminiamo gli eventi spuri (1/2)

I SiPM presentano una frequenza di eventi spuri dell'ordine di 100 kHz al mm² a temperatura ambiente. Come facciamo ad eliminarli?

Richiedendo la coincidenza (con una sovrapposizione di circa **10 ns**) tra i segnali di due SiPM che lavorano in parallelo.

- Frequenza di eventi spuri per SiPM

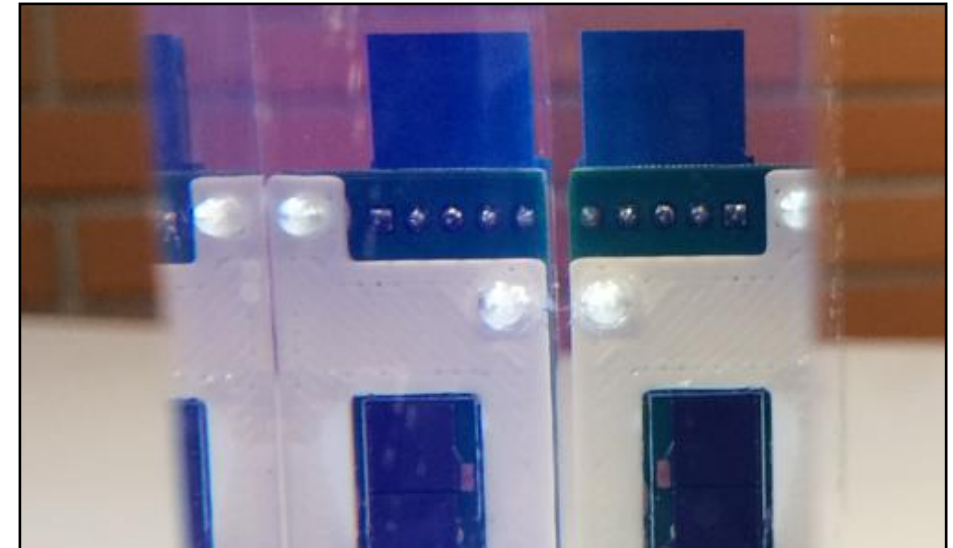
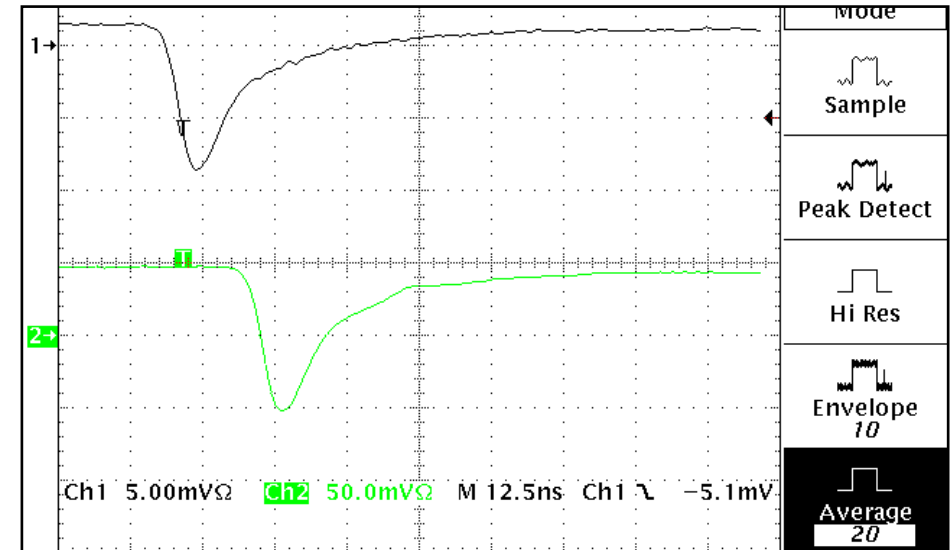
$$\begin{aligned} F(E1) &= 100 \text{ kHz/mm}^2 \times \text{Area}(\text{SiPM}) \\ &= 0.1 \cdot 10^6 \text{ Hz/mm}^2 \times 25 \text{ mm}^2 \\ &= 2.5 \cdot 10^6 \text{ Hz} \end{aligned}$$

- La probabilità composta di due eventi spuri

$$\begin{aligned} P(E1 \cap E2) &= 10 \text{ ns} \times (100 \text{ kHz} \times \text{Area}(\text{SiPM})) \\ &= 0.1 \cdot 10^6 \text{ Hz/mm}^2 \times 25 \text{ mm}^2 \times 1 \cdot 10^{-8} \text{ s} \\ &= 2.5 \cdot 10^{-2} \end{aligned}$$

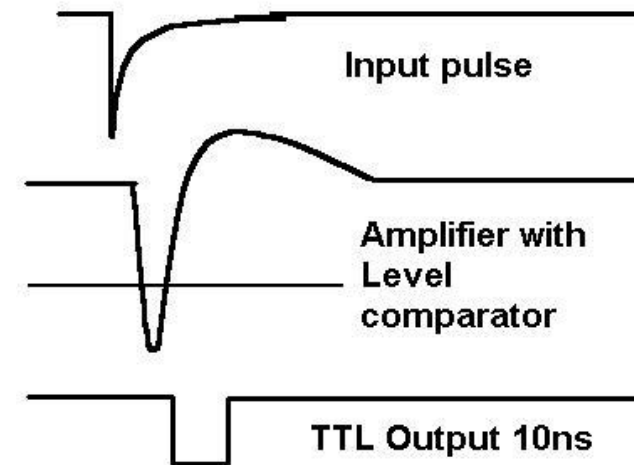
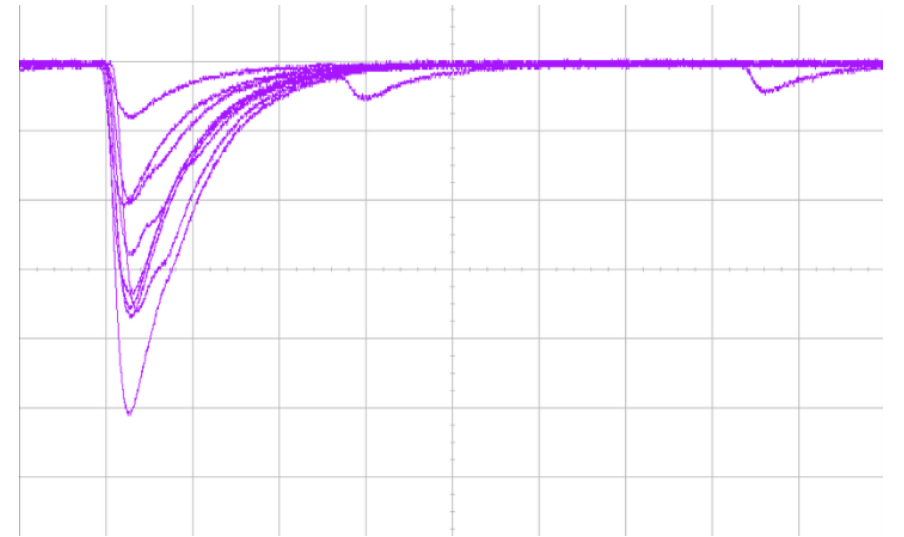
- Frequenza di 2 eventi spuri in coincidenza

$$F(E1 \cap E2) = 2 \times 2.5 \cdot 10^6 \text{ Hz} \times 2.5 \cdot 10^{-2} = \mathbf{12,5 \cdot 10^4 \text{ Hz}}$$



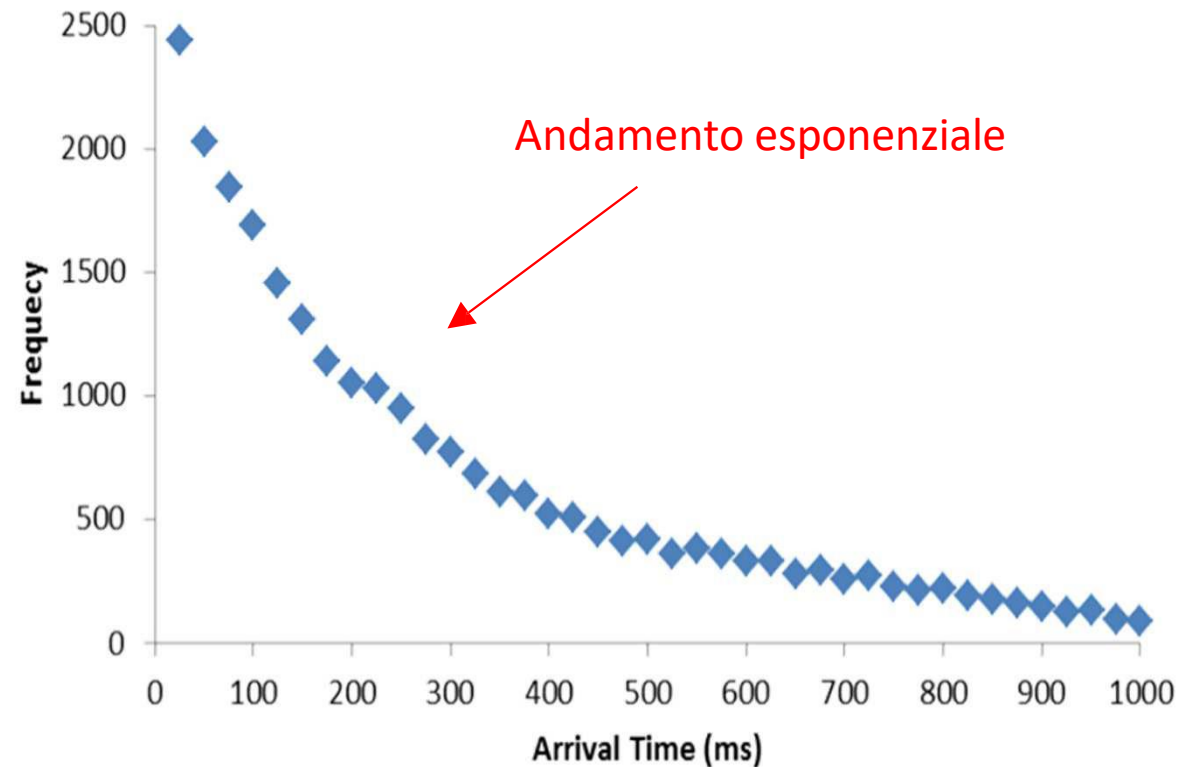
Eliminiamo gli eventi spuri (2/2)

- I segnali spuri dei SiPM sono di ampiezza piccola (60 mV al massimo)
- Una particella che attraversa lo scintillatore libera una quantità di luce che nei SiPM genera segnali ben superiori ai 250 mV
- La probabilità che un segnale spurio possa superare la soglia di comparazione di 250 mV è estremamente bassa
- La Frequenza di 2 eventi spuri in coincidenza si riduce a:
- $F(E1 \cap E2) < 1$ conteggio al minuto



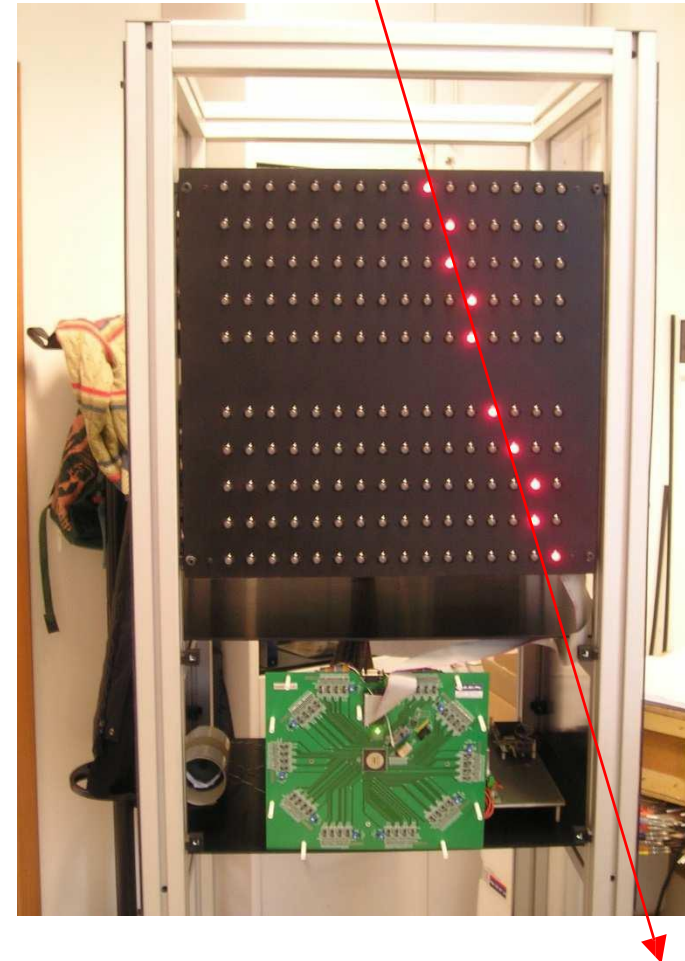
Controprova: la distribuzione dell'intervallo di tempo tra due eventi consecutivi

- L'arrivo di un raggio cosmico sull'odoscopio è un evento completamente **scorrelato** dall'evento che lo precede o lo segue (processo random)
- Il numero N di eventi indipendenti in un dato intervallo di tempo segue una **distribuzione di Poisson**
- La distanza temporale tra due eventi successivi deve seguire una distribuzione caratteristica ([Erlang Distribution -- from Wolfram MathWorld](#))



Determinazione della direzione di incidenza

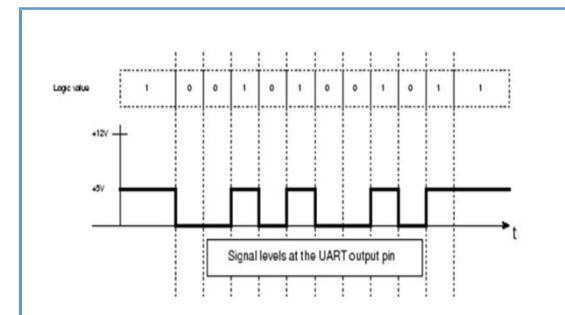
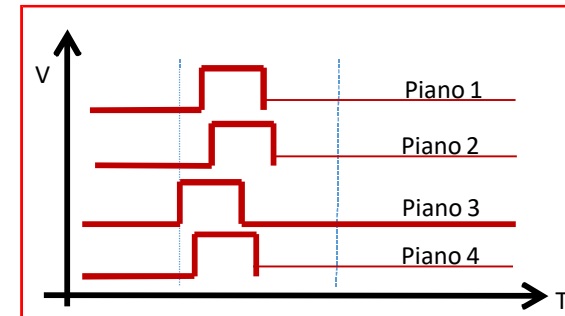
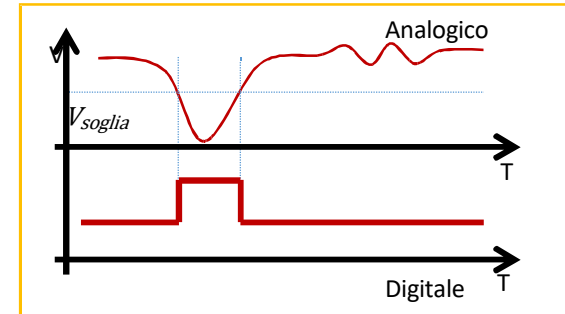
1. In un odoscopio ciascun piano del telescopio è suddiviso in «celle» in modo da determinare con precisione il punto di impatto del raggio cosmico
2. Interpolando la posizione delle celle «accese» in ogni piano, è possibile determinare con precisione la direzione di arrivo del raggio cosmico



Sistema di acquisizione dati

Il sistema di acquisizione dati permette:

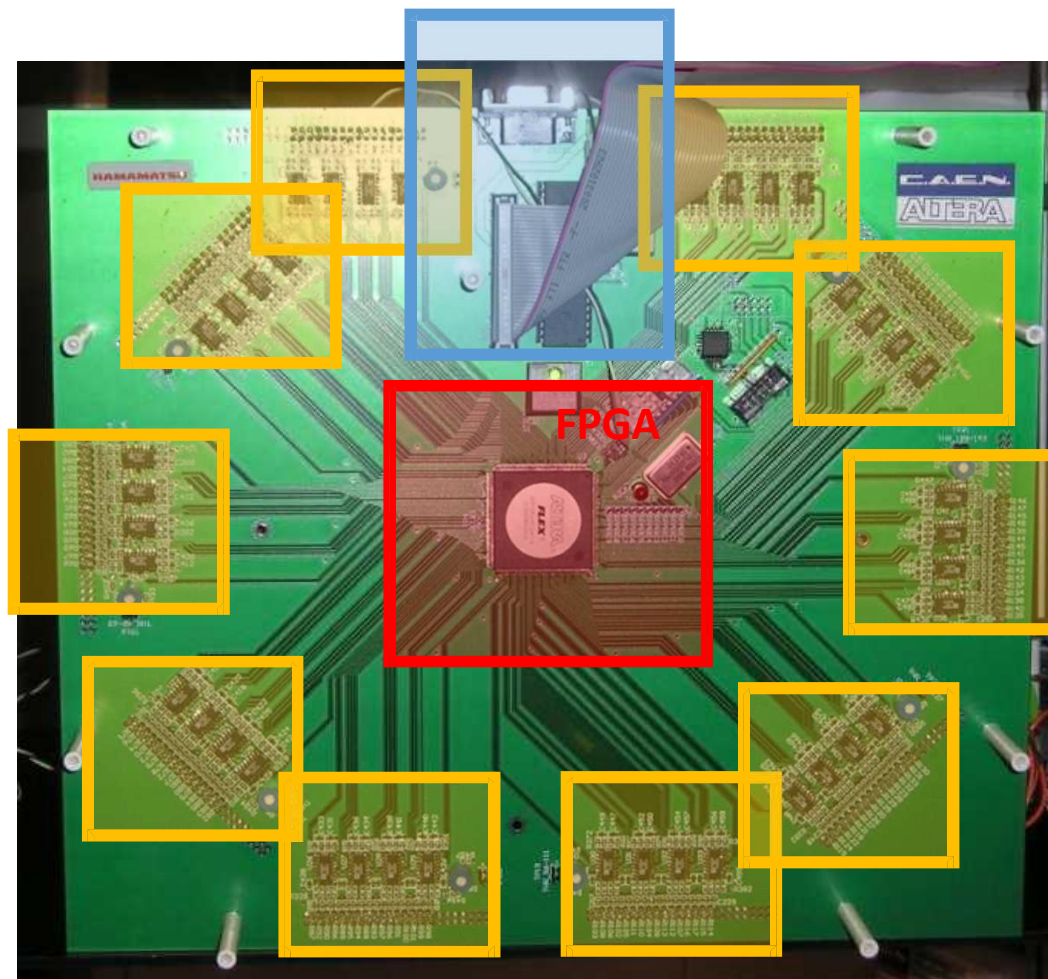
1. la conversione del segnale «analogico» di ciascuna cella in un segnale digitale - **DISCRIMINATORI**
2. la raccolta dei dati da ciascuna «cella» e la gestione della logica di coincidenza tra piani (quanti piani accesi in un dato intervallo temporale) - **FPGA**
3. Il trasferimento di tutti i dati che descrivono ciascun evento - **PORTA SERIALE, DISPLAY A LED**



Sistema di acquisizione dati

PORTA SERIALE, DISPLAY A LED

DISCRIMINATORI



Raccolta e formato dati

- L'odoscopio, connesso tramite porta seriale ad un PC invia i dati raccolti in formato binario (utilizzando il protocollo RS232) ad un apposito software che li formatta e salva in un file di testo (.csv)
- Ogni riga contiene un evento. Ogni evento è descritto dai seguenti campi:
 - numero progressivo dell'evento
 - istante (in sec.) di acquisizione dell'evento
 - istante (in msec.) di acquisizione dell'evento
 - cella colpita identificata con una numerazione da 0-15 lungo ogni piano, i piani sono numerati da 0 a 9 partendo dall'alto

```
Gruppo_0.csv
1 N,Secondi,microsec,0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,0,1,2,3,4,5
2 1,1541173005,639467,,1,,,,,,,,,,,,,1,1,,,,,,,,,,,,,1,1,,,,,,,,
3 2,1541173005,670716,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,
4 3,1541173005,936342,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,
5 4,1541173006,45717,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,
6 5,1541173007,186344,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,
7 6,1541173007,561344,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,
8 7,1541173007,639470,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,
9 8,1541173015,826983,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,
10 11,1541173020,373866,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,
11 12,1541173024,639498,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,
12 13,1541173027,873878,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,
13 14,1541173028,436380,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,
14 15,1541173029,405130,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,1,,,,,
15 16,1541173030,186382,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,
16 17,1541173031,123884,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,
17 18,1541173033,561388,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,
18 19,1541173035,311390,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,
19 20,1541173035,530141,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,
20 21,1541173036,811393,,,,,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,1,,,,,
```

Adesso
tocca a voi!

