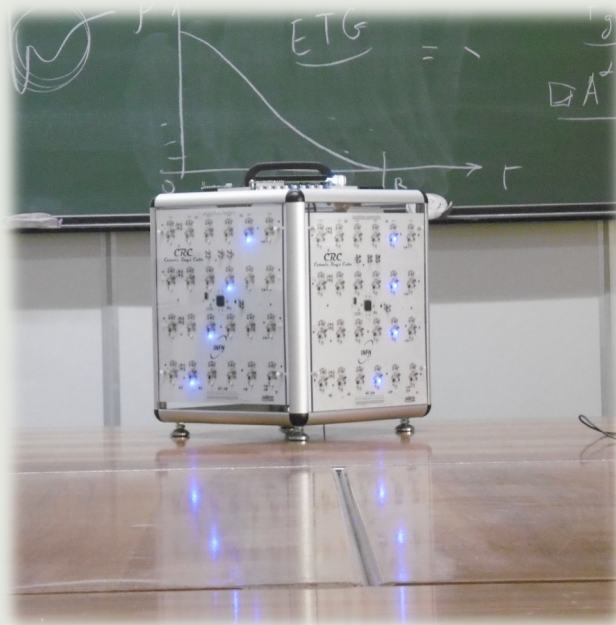




IL COSMIC RAYS CUBE: UNO STRUMENTO PER «OSSERVARE» E «LEGGERE» I RAGGI COSMICI



Candela Attanasio

LNGS, 25 FEBBRAIO 2025

attanasio.candela@lngs.infn.it

INGREDIENTI PER COSTRUIRE UN CRC

μ

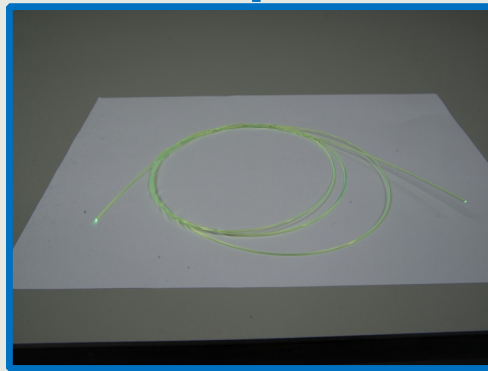
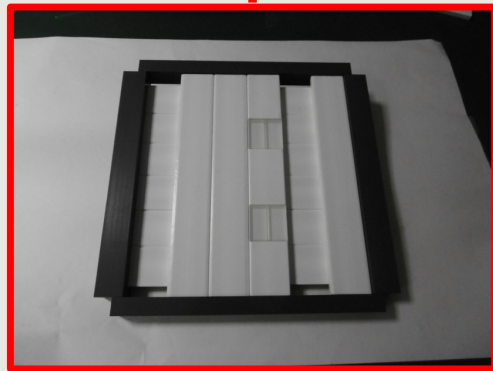
ENERGIA?

CRC

SCINTILLATORE

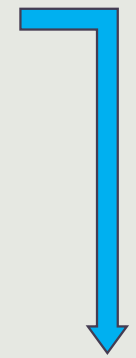
FIBRA WLS

SIPM



=

?



ENERGIA? COS'E' L'ELETTRONVOLT?

- L'elettronVolt (eV) è l'unità di misura dell'energia usata in fisica in ambito atomico e subatomico. L'eV viene definito come l'energia guadagnata (o persa) da un singolo elettrone, che si muove tra due punti nel vuoto, quando è sottoposto ad una differenza di potenziale di 1 V. Sono molto usati i suoi multipli keV, MeV, GeV, TeV.
- L'unità di misura del potenziale elettrico nel SI è il Volt, ovvero 1 Joule su 1 Coulomb. Ciò significa che si deve compiere il lavoro di 1 J per spostare una carica di 1 C attraverso una differenza di potenziale di 1 V.

Paragone tra energie nel campo dell'*High Energy Physics* (HEP) e le energie del mondo reale

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$c = 300.000 \text{ km/s} \quad \longrightarrow \quad \text{massa a riposo} = 1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$



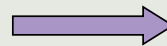
$$m_{\text{ape}} = 1 \text{ g} = 5.6 \cdot 10^{32} \text{ eV}/c^2 \quad \text{Supponiamo } v_{\text{ape}} = 1 \text{ m/s}$$

$$E_{\text{cinetica}_{\text{ape}}} = \frac{1}{2} \cdot \text{massa} \cdot (\text{velocità})^2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ J} = 5 \cdot 10^{15} \text{ eV} = 5 \text{ PeV}$$

$$E_{\text{LHC}} (1 \text{ protone}) = 1.4 \times 10^{13} \text{ eV} = 14 \text{ TeV}$$

Se però si considerano tutte le particelle in un fascio (10^{14})

$$E_{\text{tot}} = 10^{14} \cdot 1.4 \cdot 10^{13} \text{ eV} \approx 10^8 \text{ J}$$



Energia cinetica
di un tir in corsa



PREFISSI DEL SISTEMA INTERNAZIONALE

Prefissi del Sistema Internazionale

10^n	Prefisso	Simbolo	Nome	Equivalente decimale
10^{24}	yotta	Y	Quadrilione	1 000 000 000 000 000 000 000 000
10^{21}	zetta	Z	Triliardo	1 000 000 000 000 000 000 000
10^{18}	exa	E	Trilione	1 000 000 000 000 000 000
10^{15}	peta	P	Biliardo	1 000 000 000 000 000
10^{12}	tera	T	Bilione	1 000 000 000 000
10^9	giga	G	Miliardo	1 000 000 000
10^6	mega	M	Milione	1 000 000
10^3	kilo o chilo	k	Mille	1 000
10^2	etto	h	Cento	100
10	deca	da	Dieci	10
10^{-1}	deci	d	Decimo	0,1
10^{-2}	centi	c	Centesimo	0,01
10^{-3}	milli	m	Millesimo	0,001
10^{-6}	micro	μ	Milionesimo	0,000 001
10^{-9}	nano	n	Miliardesimo	0,000 000 001
10^{-12}	pico	p	Bilionesimo	0,000 000 000 001
10^{-15}	femto	f	Biliardesimo	0,000 000 000 000 001
10^{-18}	atto	a	Trilionesimo	0,000 000 000 000 000 001
10^{-21}	zepto	z	Triliardesimo	0,000 000 000 000 000 000 001
10^{-24}	yocto	y	Quadrilionesimo	0,000 000 000 000 000 000 000 001

Le equivalenze

...queste sconosciute!

$$4,567 \text{ km}^2$$

Diagram showing a question mark above the number 4,567 and a red double-headed arrow pointing to the decimal part, indicating a conversion or calculation.



$$\frac{\text{km}}{\text{h}} \quad 3,6 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Diagram showing the conversion of speed units from km/h to m/s. A double-headed arrow connects the two units. A cartoon drawing of a boy with a shocked expression is shown next to the units.

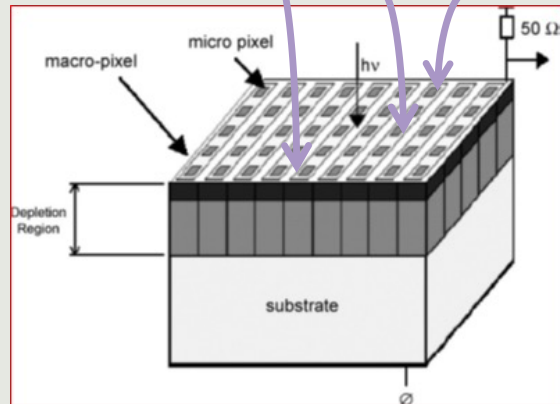
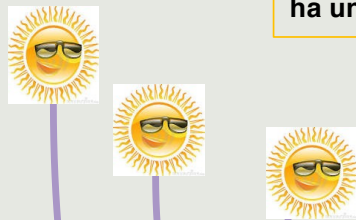
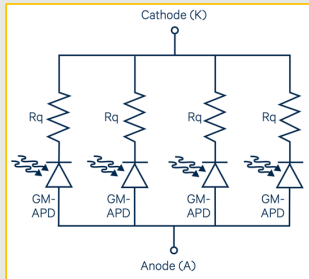
IL SILICON PHOTOMULTIPLIER

I SiPM sono impiegati in tutte quelle applicazioni dove bassa intensità di luce o bassi livelli di radiazione devono essere misurati e quantificati con grande precisione.

I SiPM sono dispositivi in grado di contare i fotoni. Sono essenzialmente realizzati con una matrice di diodi connessi in parallelo su un substrato di silicio. Quando rivelano 1 fotone producono un impulso di corrente della durata di decine di nanosecondi contenenti da 1×10^5 a 1×10^6 elettroni. Perciò un SiPM ha un guadagno!!!

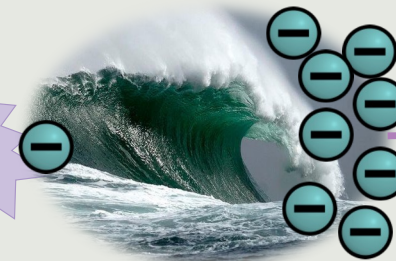
Il segnale in uscita da un SiPM è la somma analogica dei segnali prodotti da ciascuna cella. Un SiPM perciò fornisce un segnale elettrico proporzionale al numero di fotoni incidenti.

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).



coppia lacuna - elettrone

Campo elettrico

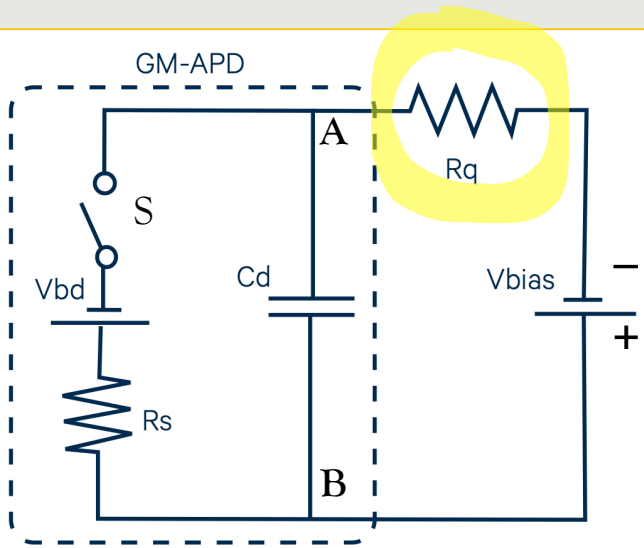


Introduction to Silicon Photomultipliers:

<https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mppc-sipms/what-is-an-SiPM-and-how-does-it-work.html>

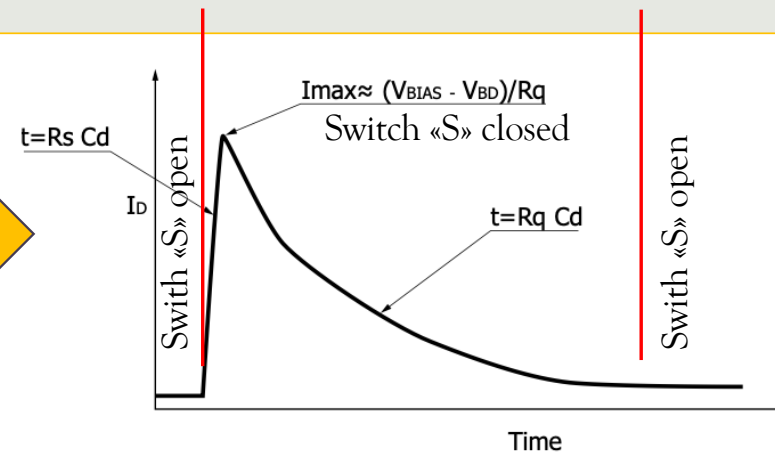
https://indico.cern.ch/event/566138/contributions/2287560/attachments/1400219/2139199/Advansid_datasheet_RGB.pdf

CIRCUITO EQUIVALENTE DI UN SiPM



In condizioni di riposo (*quiescent mode*) l'interruttore «S» è aperto, il diodo (APD) è polarizzato inversamente con una tensione V_{bias} superiore di almeno 2 V alla tensione V_{bd} . In queste condizioni tra A e B insiste proprio la tensione V_{bias} (non c'è circolazione di corrente in C_d). Quando un fotone viene assorbito l'interruttore «S» si chiude e C_d si scarica da V_{bias} a V_{bd} con costante di tempo pari a $R_s \times C_d$ (*discharge phase*): durante questa fase è in corso l'effetto di moltiplicazione a valanga. Una volta attivato, il processo a valanga si autosostiene, il che significa che, senza spegnimento, una corrente costante scorrerebbe indefinitamente nel dispositivo. Inserendo nel circuito la R_q , il processo a valanga viene spento: l'interruttore «S» nel circuito equivalente si riapre e il SiPM entra nella fase di recupero con costante di tempo $R_q \times C_d$ (*recovery phase*). La C_d si ricarica di nuovo a V_{bias} tramite R_q . Il SiPM torna quindi in modalità quiescente, pronto per il rilevamento di un nuovo fotone.

La **scarica e la ricarica** di C_d appaiono ai terminali del SiPM come **un impulso di corrente**. Il fronte di salita corrisponde alla fase di scarica (costante di tempo $C_d \times R_s$), mentre il fronte di discesa (più lento) è la fase di recupero con costante di tempo $C_d \times R_q$. L'ampiezza dell'impulso aumenta con la sovratensione, mentre sia il tempo di salita che il tempo di recupero sono determinati principalmente da C_d , R_s e R_q . Durante il recupero, il SiPM non può rilevare altri fotoni.

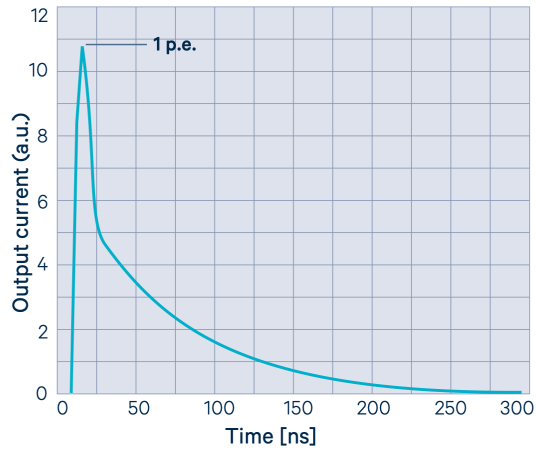


- V_{bd} è definita come la massima tensione oltre la quale c'è una crescita esponenziale della corrente (tensione di breakdown)
- V_{Bias} è una tensione negativa che si applica tra A e K del SiPM ed è la stessa che agisce su tutte le microcelle (max + 4 V rispetto V_{BD})
- V_{OV} è la differenza tra la V_{BIAS} e la V_{BD} ed è il parametro che consente al SiPM di rivelare il passaggio della particella

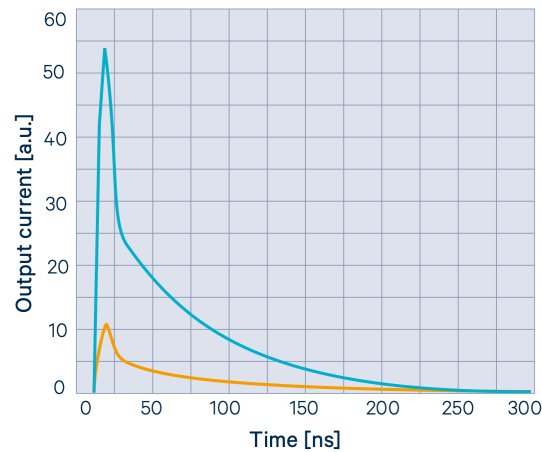
STRUMENTAZIONE AD ALTA TECNOLOGIA AI LNGS



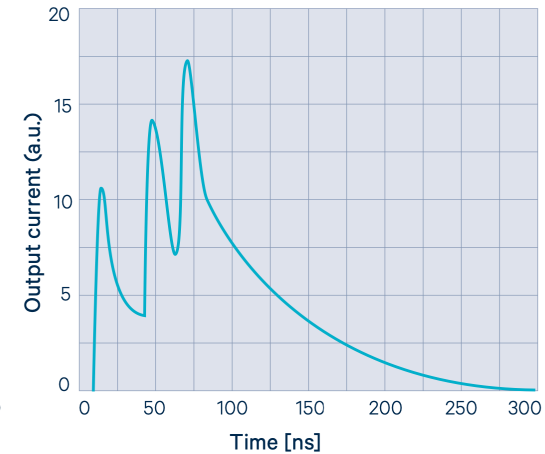
CARATTERISTICHE DEL SEGNALE DI USCITA DI UN SiPM



Current pulse produced by a micro-cell in response to photon absorption (single-cell signal). The pulse has a very fast rising edge and a slower trailing edge (micro-cell recovery). Its amplitude is defined to be 1 p.e. (photo-electron).

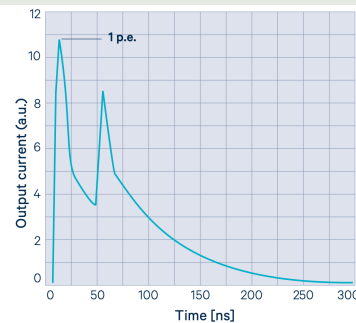


Typical SiPM pulse (blue curve) corresponding to simultaneous firing of several cells. The single-cell signal is also reported (orange curve). The SiPM amplitude and pulse area are proportional to the number of detected photons at the same time.

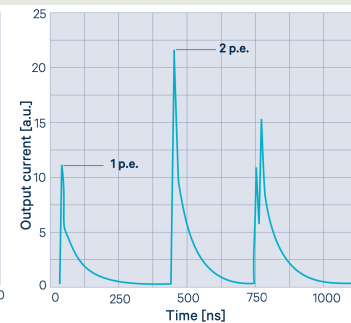


Pile-up in a SiPM. Three different micro-cells fire at different times. The SiPM output pulse is the sum of the three single-cell signals. The SiPM signal area (i.e. the total charge delivered by the SiPM) is proportional to the number detected photons.

Gli *afterpulses* sono dovuti ai portatori intrappolati in difetti della struttura cristallina del silicio durante il fenomeno di moltiplicazione a valanga che vengono successivamente rilasciati durante la fase di ricarica (*recharge phase*) del SiPM.



Afterpulsing in SiPMs. The same micro-cell fires again during the recharge phase due to a carrier being released from a previously filled silicon trap. Note that the amplitude of the afterpulse is <1 p.e. since Cd has not recharged to V_{bias} yet when AP occurs.



Optical crosstalk in SiPMs. From left to right: a single-cell signal (1 p.e.), a direct crosstalk signal (2 p.e.), two cells firing at the same time, and a delayed crosstalk (a second cell fires a few nano seconds after the first one).



Il *crosstalk ottico* implica fotoni emessi durante la moltiplicazione a valanga che vengono riassorbiti nelle vicine celle o anche nella regione inattiva della stessa cella, generando ulteriori impulsi di corrente.

UN SEMPLICE ESERCIZIO

- ✓ I muoni al livello del mare hanno energia media di circa 4 GeV. La perdita media di energia di una particella al minimo di ionizzazione è circa 2 MeV/cm. In prima approssimazione possiamo dire che uno scintillatore plastico di spessore 1 cm attraversato da un muone converte l'energia rilasciata dalla particella in circa 40000 fotoni (20000 fotoni per MeV). Supponiamo che il nostro scintillatore sia di tipo plastico ma di tipo estruso sempre di spessore 1 cm e che converta l'energia rilasciata in un numero di fotoni inferiore di un fattore 10 (avremo 4000 fotoni in totale *per muon crossing*).
- ✓ Supponiamo che con la fibra raccogliamo solo il 10% dei fotoni emessi, quindi avremo 400 fotoni.
- Supponiamo anche che non siamo stati molto bravi nel fare l'accoppiamento fibra – SiPM e che perdiamo la metà dei fotoni, quindi lavoriamo con 200 fotoni.
- Supponiamo infine di leggere la fibra con un SiPM che abbia una P.D.E. (*Photon Detection Efficiency*) di circa il 32% (la P.D.E. è la probabilità che un fotone che arriva sul SiPM produca un segnale). Per cui dei 40000 fotoni teorici di partenza solo 64 produrranno un segnale (che ricordiamo è proporzionale al numero di fotoni incidenti)

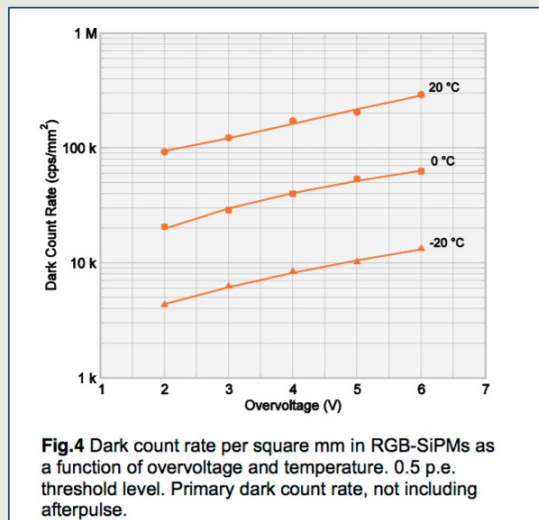
Geometrical, Electrical, and Optical Typical Characteristics (T_a = 20 °C)_

Symbol	Parameter	Product			
		ASD-RGB1S-M/MG	ASD-RGB1C-M/MG	ASD-RGB3S-M	ASD-RGB4S-M
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			

DOMANDA: quanto sarà l'ampiezza del segnale di uscita? Quanto incide il "noise" del SiPM sul segnale in uscita?

UN SEMPLICE ESERCIZIO

- ✓ Consideriamo alcuni importanti parametri dei SiPM:
- ✓ **Guadagno (gain) G** del SiPM. $G = (C_d \times \Delta V) / Q_e$, dove $\Delta V = V_{bias} - V_{bd}$. A partire da 1 fotoelettrone (p.e.) G indica quanti ne genera in uscita il nostro dispositivo; C_d è la capacità della singola cella (90 fC). Una cella, una volta colpita da una particella, scarica tutta la carica posseduta dalla propria capacità;
- ✓ **la costante di tempo di ricarica;**
- ✓ **la dark count rate**, ovvero il numero medio di conteggi registrati in assenza di luce (rumore termico statistico presente in condizioni di buio e proporzionale all'area attiva del dispositivo)



Durante la modalità di riposo, se per agitazione termica all'interno della regione attiva di un SiPM, si producono lacune o elettroni, si innesca una valanga e si osserva un impulso in uscita. Questo è chiamato un evento oscuro. Il numero di eventi per unità di tempo è chiamato DCR (dark count rate).

Nell'ipotesi di aver raccolto 64 p.e. avremo:

$$Q = \text{carica elettrone} \times \text{n. di p.e.} \times G = 1,6 \times 10^{-19} \times 64 \times 2,7 \times 10^6 = 27 \text{ pC}$$

La tensione in uscita al SiPM è:

$$V = Q / C_d = 27 \times 10^{-12} / 90 \times 10^{-15} \times 5520 = 27 \times 10^{-12} / 500 \times 10^3 \times 10^{-15} =$$

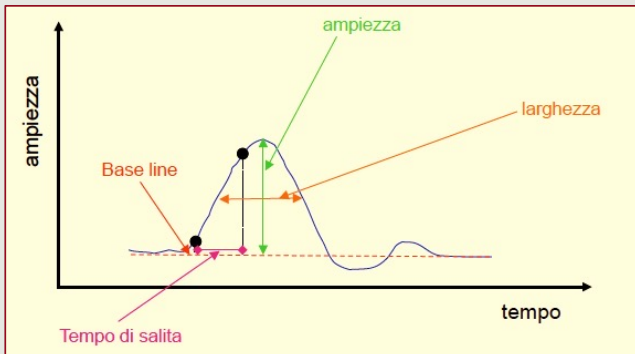
$$27 \text{ pC} / 500 \text{ pF} = 0,054 \text{ V} = 54 \text{ mV}$$

Il segnale di SiPM viene poi letto con un oscilloscopio con impedenza di ingresso pari a 50 Ω per cui si riduce della metà.

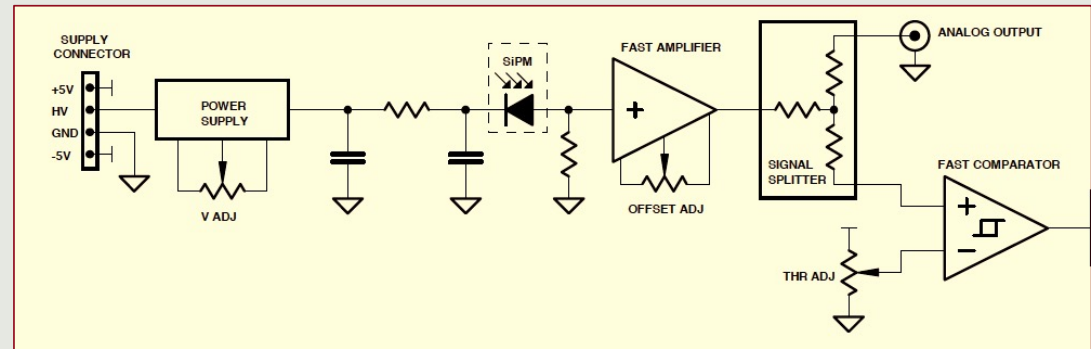
Quindi con solo **64 fotoni avremo circa 25 mV**. In genere viene comunque messo un amplificatore per migliorare il rapporto segnale rumore.

Sebbene la dark count rate del nostro dispositivo (3x3 mm²) sia di circa 1,8 MHz, possiamo ad esempio mettere la soglia del nostro comparatore intorno a 10 p.e. Questa soglia taglia tutto il dark noise e altri effetti come crosstalk e afterpulse e si vedranno senz'altro tracce pulite (a meno che non entri luce o ci siano errori di accoppiamento meccanico).

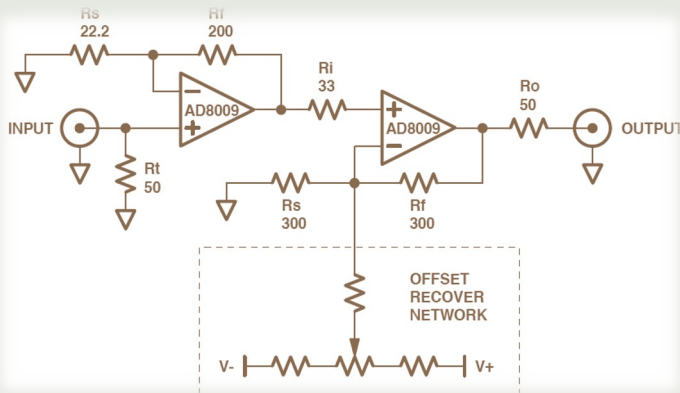
L'ELETTRONICA ANALOGICA



caratteristiche di un segnale analogico



schema a blocchi di un circuito di *front end*:
alimentazione, amplificazione, discriminazione



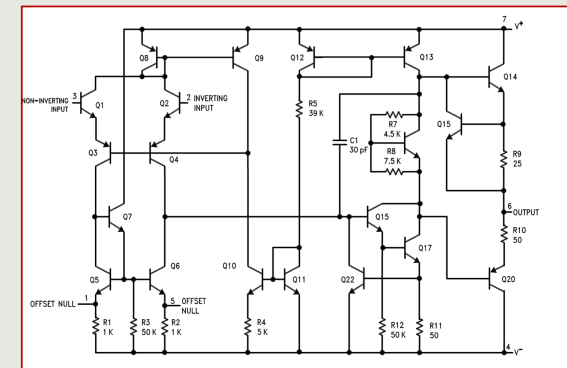
schema di un *fast amplifier*
in configurazione *non invertente* che guadagna complessivamente 10 con circuito di regolazione dell'offset

$$A_v = 1 + R_f/R_s$$

I segnali sono soggetti a distorsioni:

1. Intrinseche (*rumore*)
2. Esterne (*pickup, instabilità di tensione, cattivi collegamenti*)

Quello da ottimizzare è sempre il rapporto segnale rumore (S/N)



schema a blocchi funzionale di una amplificatore operazionale (LM741)

COME SI PASSA DALL' ANALOGICO AL DIGITALE

Per selezionare quali impulsi analogici devono essere trasformati in digitali si usano dei **discriminatori**. I più comuni sono i **discriminatori a soglia**. La discriminazione viene normalmente fatta sul tempo di salita del segnale analogico (*leading edge*).

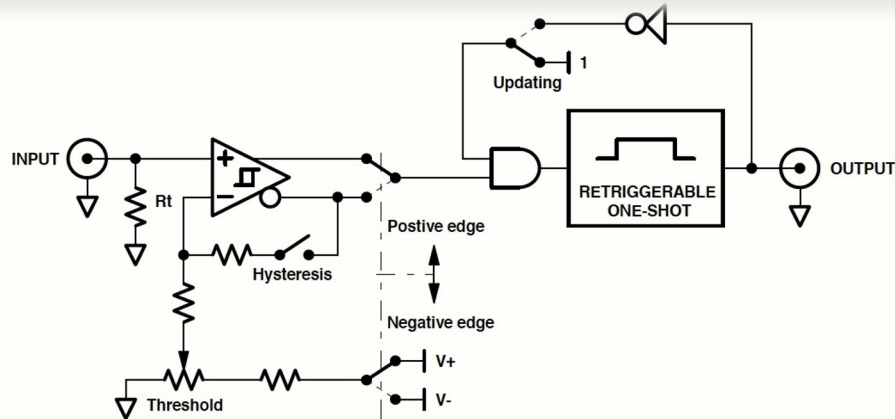
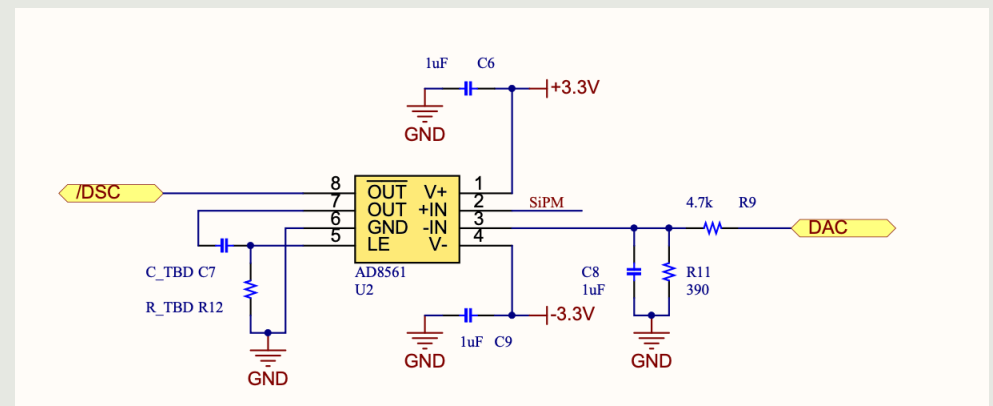
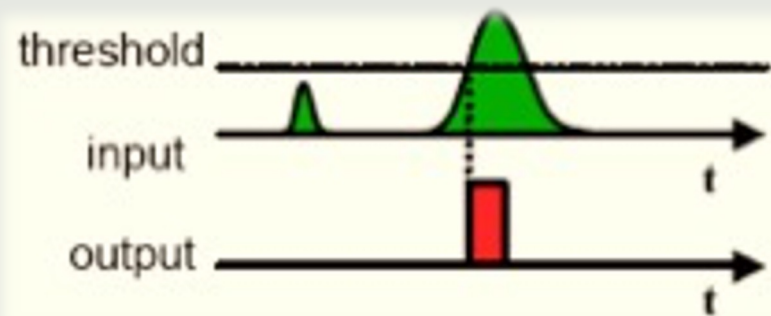


Fig. 6.1 – Leading-edge discriminator



Circuito di discriminazione di un singolo canale del CRC

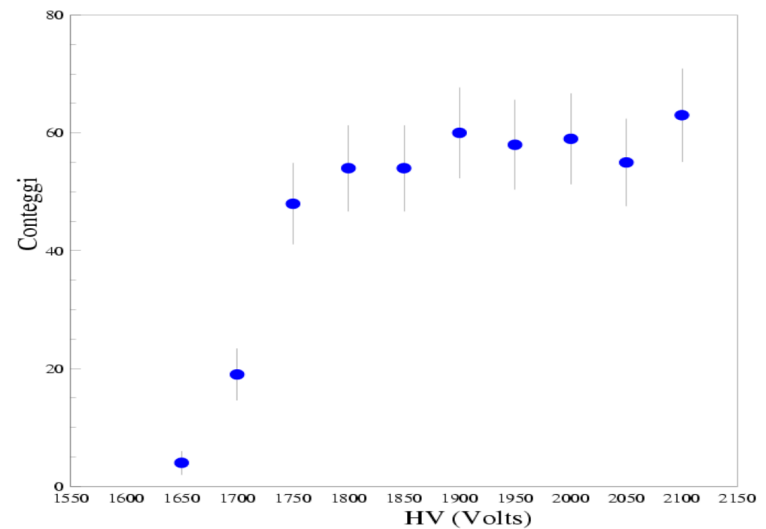
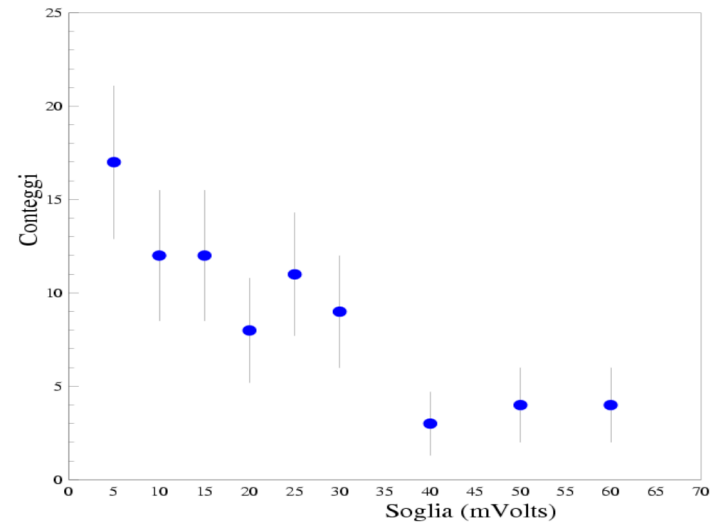


PLATEAU DI SOGLIA E DI TENSIONE

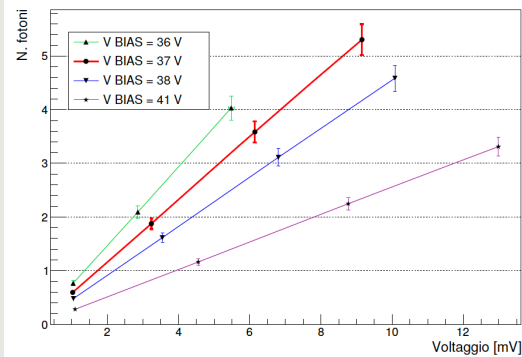
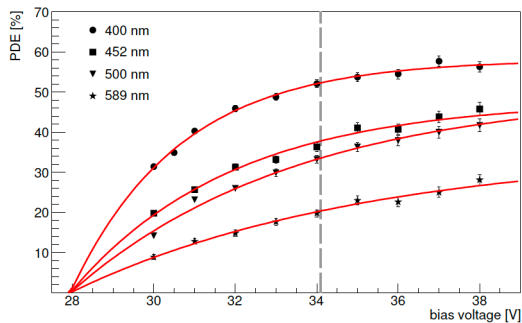
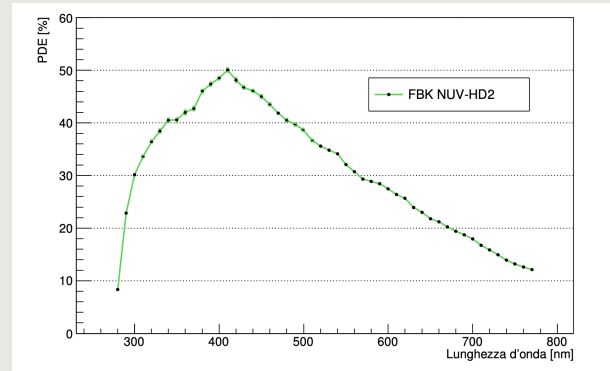
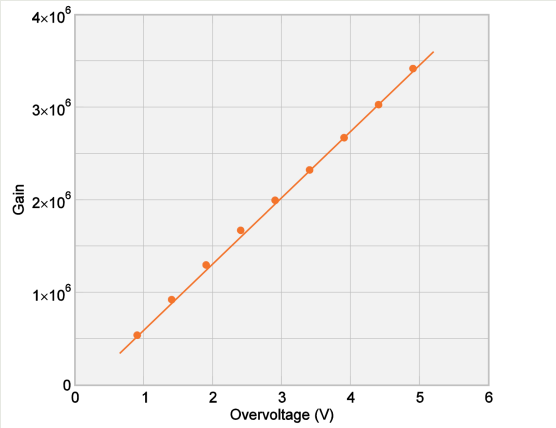
Plateau di soglia: si misurano i conteggi al variare della tensione di soglia del discriminatore. La curva mostra un andamento prima decrescente e poi stabile, tipico di una curva di soglia. La zona “piatta” è detta “plateau” e permette di definire il valore della soglia da impostare. Se la soglia scelta è troppo bassa, non vengono filtrati gli eventi rumorosi, se la soglia è troppo alta, c'è il rischio di perdere eventi “buoni” (diminuisce l'efficienza).

Plateau di tensione: si misurano i conteggi (in un intervallo di tempo fissato), ovvero il numero di particelle rivelate in funzione della tensione di alimentazione applicata al dispositivo. Si può notare che l'efficienza di un PMT cresce al variare della tensione, fino a raggiungere un valore di “plateau”. La tensione di lavoro viene scelta in questa zona, per avere la massima stabilità del rivelatore (cioè efficienza stabile nel tempo).

Questo vale anche per i SiPM?



SiPM Working Parameters



Il numero di fotoni incidenti sulla superficie del sensore può essere calcolato misurando l'ampiezza del picco del segnale rilevato con un'oscilloscopio.

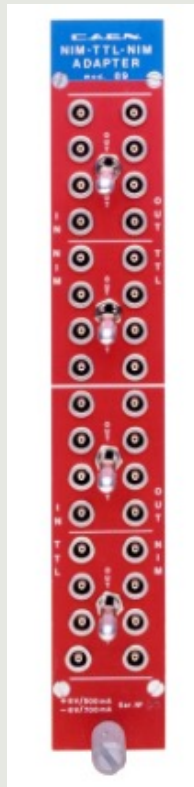
Sappiamo che il guadagno (G) è per definizione la tensione che si genera dalla valanga provocata da un fotone, tensione che a sua volta varia a seconda della tensione di bias applicata al sensore. Possiamo semplicemente ricavare il numero N di fotoelettroni con questa formula:

$$N = \frac{\text{ampiezza del segnale}}{\text{guadagno}}$$

In linea di principio, maggiore è la sovratensione (V_{ov}), maggiori saranno le prestazioni del SiPM. In realtà, l'efficienza di rilevamento tende a saturarsi mentre il rumore continua ad aumentare (anche più che linearmente). Esiste perciò un limite superiore alla tensione di polarizzazione. Oltretutto abbiamo visto che all'aumentare della tensione applicata al sensore, per via dell'aumento del guadagno (e del crosstalk), diminuisce il numero di fotoni rilevati.

LA STRUMENTAZIONE

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



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

il segnale standard:



stato di quiete
livello 0V

segnale
livello -0.8V

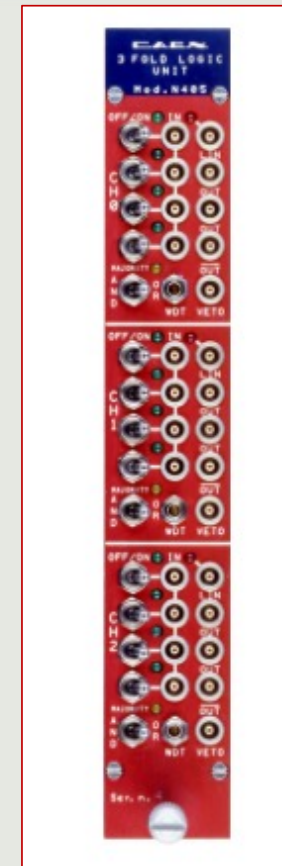
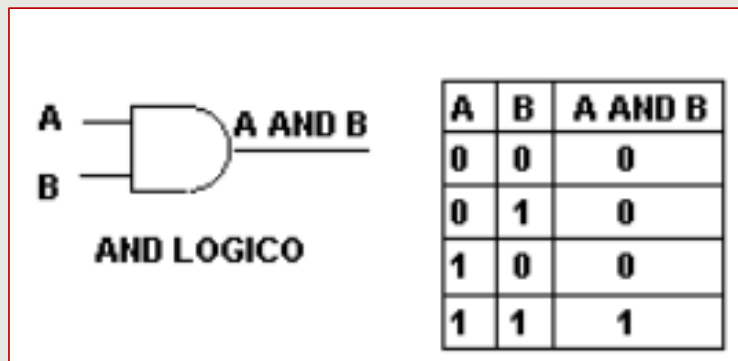
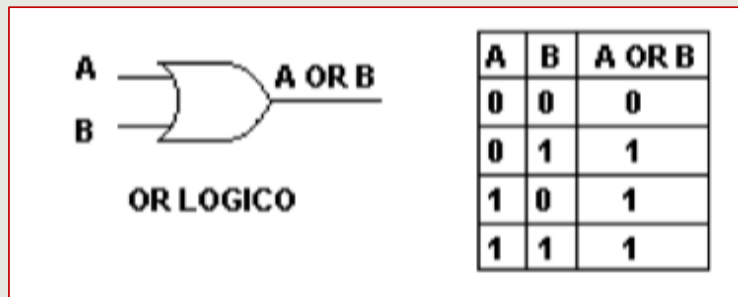
0.8V su 50Ω
16 mA su 50Ω

BIN CONNECTOR	PIN	FUNCTION
	1	RESERVED
	2	RESERVED
	3	RESERVED
	4	RESERVED
	5	
	6	
	7	±200 VOLTS D.C.
	8	SPARE
	9	+6 VOLTS
	10	-6 VOLTS
	11	RESERVED
	12	SPARE
	13	RESERVED
	14	RESERVED
	15	RESERVED
	16	+12 VOLTS
	17	-12 VOLTS
	18	SPARE
	19	RESERVED
	20	RESERVED
	21	RESERVED
	22	RESERVED
	23	RESERVED
	24	RESERVED
	25	RESERVED
	26	RESERVED
	27	RESERVED
	28	RESERVED
	29	RESERVED
	30	RESERVED
	31	RESERVED
	32	RESERVED
	33	RESERVED
	34	RESERVED
	35	RESERVED
	36	RESERVED
	37	RESERVED
	38	RESERVED
	39	RESERVED
	40	RESERVED
	41	RESERVED
	42	RESERVED
	43	RESERVED
	44	RESERVED
	45	RESERVED
	46	RESERVED
	47	RESERVED
	48	RESERVED
	49	RESERVED
	50	RESERVED
	51	RESERVED
	52	RESERVED
	53	RESERVED
	54	RESERVED
	55	RESERVED
	56	RESERVED
	57	RESERVED
	58	RESERVED
	59	RESERVED
	60	RESERVED
	61	RESERVED
	62	RESERVED
	63	RESERVED
	64	RESERVED
	65	RESERVED
	66	RESERVED
	67	RESERVED
	68	RESERVED
	69	RESERVED
	70	RESERVED
	71	RESERVED
	72	RESERVED
	73	RESERVED
	74	RESERVED
	75	RESERVED
	76	RESERVED
	77	RESERVED
	78	RESERVED
	79	RESERVED
	80	RESERVED
	81	RESERVED
	82	RESERVED
	83	RESERVED
	84	RESERVED
	85	RESERVED
	86	RESERVED
	87	RESERVED
	88	RESERVED
	89	RESERVED
	90	RESERVED
	91	RESERVED
	92	RESERVED
	93	RESERVED
	94	RESERVED
	95	RESERVED
	96	RESERVED
	97	RESERVED
	98	RESERVED
	99	RESERVED
	100	RESERVED



LA STRUMENTAZIONE

Coincidenza: circuito che consente di avere un segnale logico ALTO in uscita quando sono ALTI tutti gli ingressi entro un certo intervallo di tempo (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** (da 0 o 1).



LA STRUMENTAZIONE

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

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



CONCETTO DI EFFICIENZA DI UN RIVELATORE

L'efficienza di un rivelatore è la misura della probabilità di ottenere una risposta dal rivelatore stesso. Indica il numero di particelle contate rispetto a quelle che effettivamente attraversano il rivelatore.

Efficienza assoluta di un rivelatore:

- dipende fortemente dalla geometria e dalle proprietà di interazione del rivelatore. E' data dal rapporto:

$$E_{ass} = \frac{Nr}{Ns}$$

NUMERO DI PARTICELLE
REGISTRATE DAL RIVELATORE

NUMERO DI PARTICELLE EMESSE
DALLA SORGENTE

Efficienza intrinseca di un rivelatore:

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

$$E_{in} = \frac{Nr}{Ni}$$

NUMERO DI PARTICELLE
REGISTRATE DAL RIVELATORE

NUMERO DI PARTICELLE INCIDENTI
SUL RIVELATORE

CONCETTI DI EFFICIENZA PER UN SiPM

- L'efficienza di rilevazione dei fotoni di un SiPM ovvero la *photon detection efficiency (PDE)* è la probabilità che un fotone in arrivo sulla superficie del SiPM produca un impulso di uscita.

$$PDE_{SiPM} = \frac{N_{fr}}{N_{fa}}$$

NUMERO DI FOTONI RIVELATI

NUMERO DI FOTONI IN ARRIVO

- L'efficienza geometrica o *fill factor (FF)*, tiene conto del fatto che ogni microcella nel SiPM ha necessariamente un'area morta sulla sua periferia per ospitare strutture isolanti e piste conduttrici per l'instradamento del segnale
- L'efficienza quantica o *quantum efficiency (Qe)* esprime la probabilità che un fotone che colpisce il SiPM venga effettivamente trasmesso al silicio, assorbito nel silicio e infine convertito in una coppia elettrone/lacuna. *Qe* è una funzione della lunghezza d'onda e dell'incidenza angolare dei fotoni in arrivo.

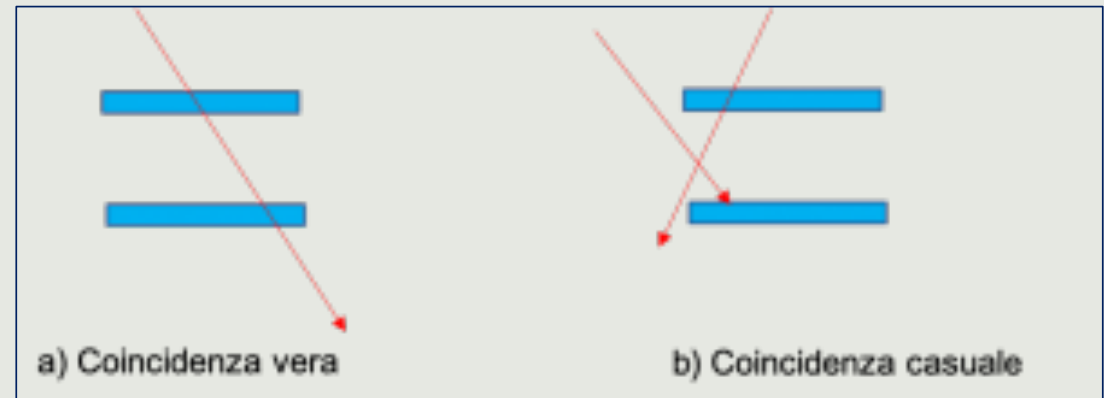
LA TECNICA DELLE COINCIDENZE CON IL CRC

I conteggi di un singolo rivelatore sono dovuti, oltre che ai raggi cosmici, a radioattività ambientale, a rumore dell'elettronica e in generale a eventi casuali non correlati tra loro. Il metodo utilizzato, sia per ridurre gli eventi casuali sia per discriminare le particelle cariche, è la tecnica delle coincidenze.

Una coincidenza è il segnale che si ottiene quando più rivelatori collegati tra loro rispondono in maniera contemporanea al passaggio di una particella. Poiché il segnale ha sempre larghezza finita, la coincidenza si ha se i segnali si sovrappongono entro un certo intervallo temporale.

Le coincidenze **non sono tutte vere**, infatti se 2 rivelatori sono posti uno sull'altro si possono avere i seguenti casi:

1. una particella li attraversa entrambi (evento unico);
2. due particelle diverse li attraversano contemporaneamente (coincidenza casuale)



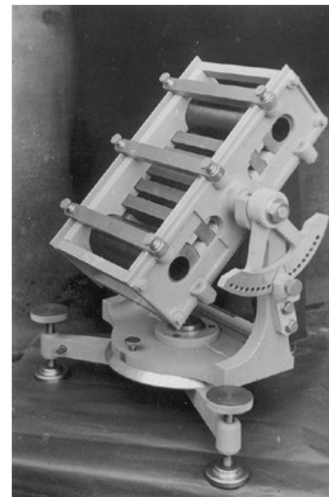
LA TECNICA DELLE COINCIDENZE CON IL CRC

In generale, per effettuare misure precise, soprattutto se gli eventi sono molto rari, è necessario stimare le coincidenze casuali per poterle eliminare. La rate delle coincidenze casuali è legata al numero dei rivelatori dalla legge:

$$R_n = n \times (R_{singola})^n \times \tau^{n-1}$$

dove n è il numero dei rivelatori e τ è il tempo durante il quale si ha la coincidenza. All'aumentare del numero dei contatori le coincidenze casuali diminuiscono drasticamente di ordini di grandezza.

Fu il fisico italiano Bruno Rossi che realizzò il primo circuito di coincidenza tra più di 2 rivelatori e perfezionò la tecnica che permetteva di metterli in coincidenza anche a grande distanza.



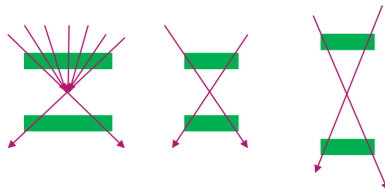
Telescopio per raggi cosmici di Bruno Rossi

LA TECNICA DELLE COINCIDENZE CON IL CRC

Il CRC che abbiamo utilizzato è costituito da 4 contatori messi uno sopra l'altro a distanza di circa 7 cm in una configurazione che viene definita telescopica, cioè con i centri dei piani allineati su una linea retta chiamata asse. I 4 piani possono poi essere e connessi tutti e 4 o meno ad un circuito di coincidenza. Questo consente di:

1. selezionare una particolare direzione di provenienza all'interno dell'angolo solido individuato dall'accettanza geometrica (più i piani sono distanti più l'angolo solido è piccolo, **più precisa è la direzione ma minore il campo visivo**);

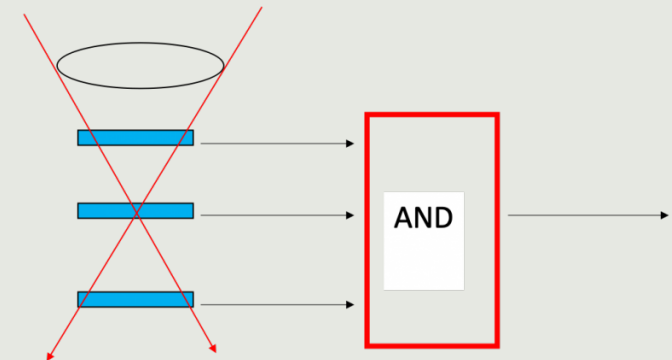
Più piccoli e più distanti tra loro sono i rivelatori, maggiormente sarà definito l'angolo di provenienza dei muoni



Accettanza di un rivelatore: porzione di angolo solido entro il quale sono visti (accettati) gli eventi. E' una proprietà geometrica

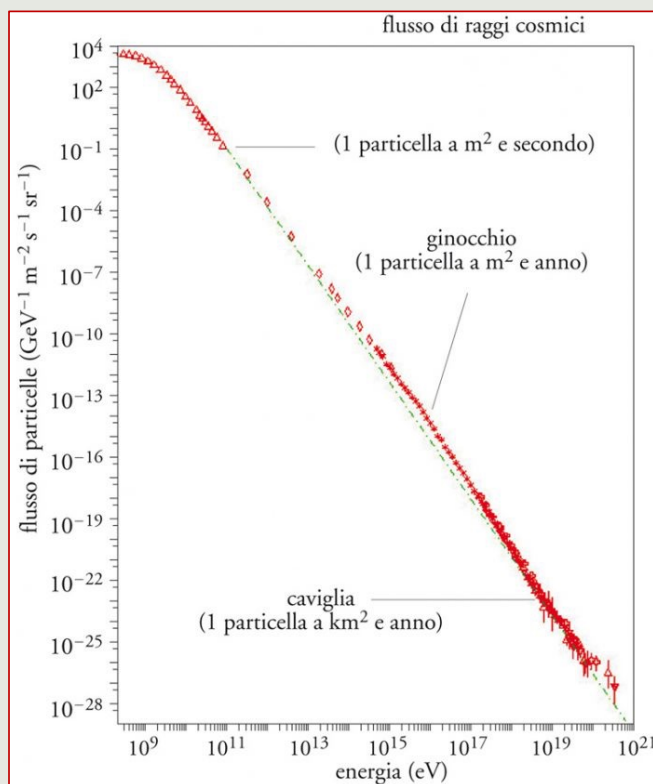
2. selezionare il tipo di particella in funzione del numero di piani di contatori (più sono i piani, più le particelle che li attraversano in coincidenza sono penetranti). Nel nostro caso non può che trattarsi di muoni, uniche particelle cariche penetranti a livello del suolo.

Qualora mettessimo in coincidenza solo 3 piani anziché 4, a parità di distanza tra i piani, avremmo una maggiore apertura del cono visivo del telescopio e quindi misureremo un conteggio di particelle maggiore. Attenzione alla differenza tra flusso e conteggio di particelle.



DIFFERENZA TRA FLUSSO E RATE

La figura mostra il cosiddetto “spettro dei raggi cosmici”, cioè il numero di particelle che colpisce l’atmosfera terrestre in funzione della loro energia. Sull’asse verticale è indicata la quantità o flusso di particelle, ovvero il numero di particelle per m^2 secondo (unità di area), steradiante (angolo solido) ed energia in un determinato range ΔE , mentre sull’asse orizzontale è riportata l’energia misurata in elettronvolt (eV). **Questo prende il nome di flusso differenziale.**



Spesso non è possibile determinare l’energia delle singole particelle ma si misurano tutte le particelle a partire da una certa energia di soglia E_0 . Si parla allora di **flusso integrale** di particelle per m^2 , s^{-1} , sr^{-1} .

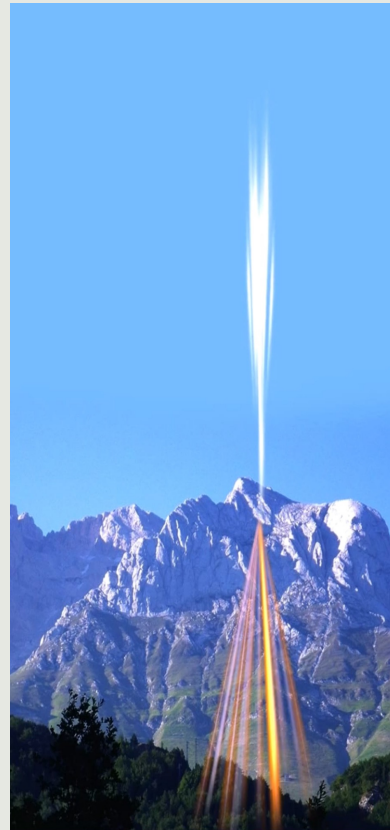
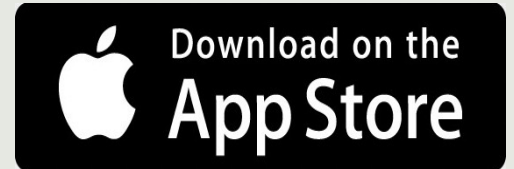
Quello che si misura però in ogni esperimento di raggi cosmici è il **rate** di conteggi dN/dt e non il flusso!

Come ottenere il flusso a partire dal rate di coincidenze e dalle caratteristiche del detector? Questo è punto cruciale di ogni esperimento. In generale il flusso di particelle di una data energia E è dato da:

$$\Phi(E) = \frac{C_i}{\Delta E \Delta T G \epsilon}$$

cioè dal rapporto tra il numero di coincidenze misurate per la particella i diviso per la sua energia, il tempo di misura ΔT , l’accettanza del telescopio G in $m^2 \text{sr}$ (capacità di «raccolta» del rivelatore), la sua efficienza e nel selezionare e rivelare la particella i .

*Vi ricordate dell'App
Cosmic Rays Live?*



Decodifichiamo

«Leggiamo» il CRC

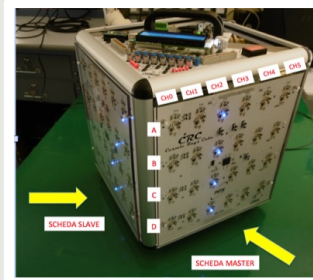
Spiegazione per la decodifica manuale:

- il dato è costituito da un numero di evento e da due **stringhe esadecimali**. La prima stringa esadecimale si riferisce alla scheda slave (guardando il telescopio e la scheda a sx), la seconda stringa si riferisce alla scheda master (guardando il telescopio e quella a dx).

Per individuare la barra di scintillatore colpita dal muone si fa così:

- si convertono le due stringhe esadecimali in binario. Ad ogni numero o lettera esadecimale corrispondono 4 cifre binarie. Alla fine avremo due stringhe (di soli «1» o «0») lunghe 32 bit, una relativa alla scheda slave (vista Y) e l'altra a quella master (vista X);
- partendo dalla sinistra delle due stringe di 32 bit, si tolgono gli zeri posizionati ai posti 1, 2, 9, 10, 17, 18, 25, 26. Si ottiene una stringa di 24 bit;
- la sequenza dei primi 6 bit è relativa alla scheda slave. I bit vanno posizionati 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.

Ma sarà tutto più semplice usando EXCEL!!!



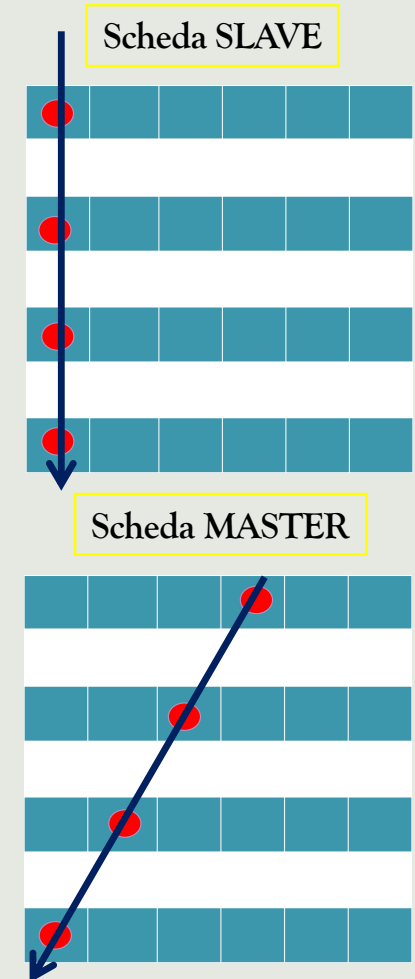
```

19:48 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 02010808
3022 20202020 04081020
3023 08040201 01020608
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

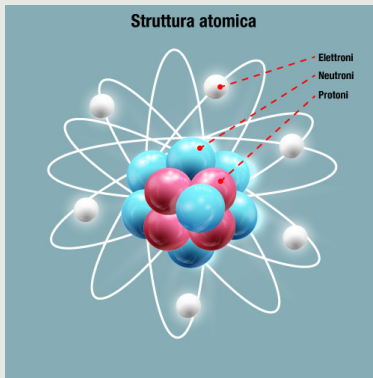
Evento n.3022



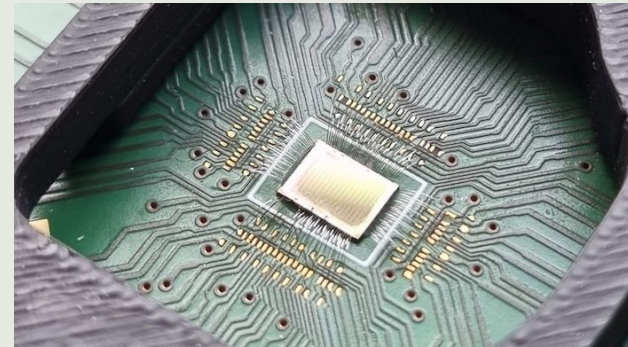
E PER FINIRE...



SE ANCORA NON AVETE ODIATO LA FISICA



E L' ELETTRONICA...



....POTRESTE ESERCITARVI NELL'ANALIZZARE QUALCHE EVENTO PRESO DALL'APP, RICOSTRUIRE CON EXECEL LA TRACCIA NELLE DUE VISTE E CON GEOGEBRA DETERMINARE LA VISTA DELL'EVENTO NELLO SPAZIO

<https://web.infn.it/OCRA/misura-della-rate-di-muoni-cosmici/>

GRAZIE PER L'ATTENZIONE