

Incont  
ri ■ di  
fisica



**Tecniche Innovative per la rivelazione  
di particelle con materiali scintillanti,  
fotomoltiplicatori, fotorivelatori al  
silicio per la fisica delle alte energie**

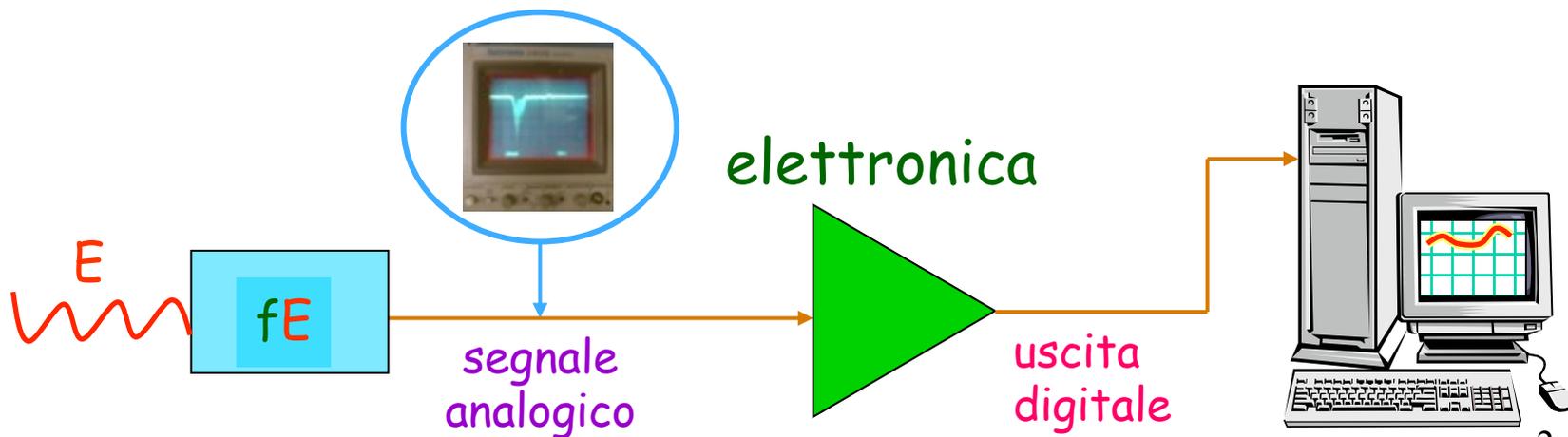
**Seminario Introduttivo**

# Logica

Principio di funzionamento generale di un rivelatore

particella di energia  $E$  → trasferimento di energia  $f E$  ( $f \leq 1$ )  
al rivelatore → conversione in forma d'energia accessibile

Rivelatori moderni sono essenzialmente elettrici:  $f E$  convertita in impulsi elettrici → necessaria elettronica per il trattamento dell'info



# Caratteristiche Generali

## Sensibilità

capacità di produrre segnale utilizzabile  $S$  per un dato tipo di radiazione di una data energia

(non esiste rivelatore sensibile a tutte le radiazioni di qualunque energia)

Dipende da:

- $\sigma$  delle reazioni ionizzanti, i.e. probabilità di conversione di  $f E$  in forma di ionizzazione
- massa del rivelatore: fissata  $\sigma$ ,  $\rho$  e  $V$  determinano frequenza delle interazioni  $\rightarrow$  massa richiesta dipende dal tipo e dall'energia della radiazione da rivelare

# Caratteristiche Generali

## Risposta

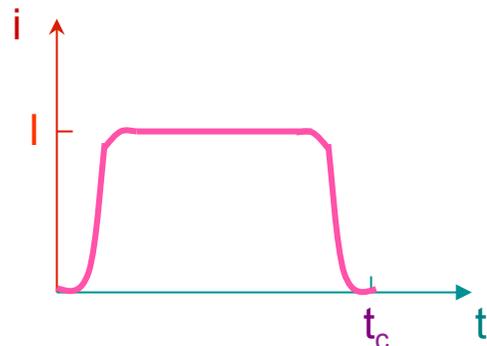
interazione di una particella nel rivelatore → rilascio (quasi istantaneo) di carica elettrica  $Q$  nel volume sensibile del rivelatore → raccolta tramite campo elettrico



$t_c$  = tempo di risposta

1 ps ÷ 1 ns in funzione del tipo di rivelatore

risposta del rivelatore: impulso di corrente



$$Q = \int_0^{t_c} dt i(t)$$

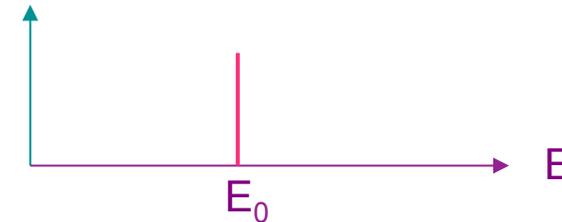
# Caratteristiche Generali

## Risoluzione Energetica

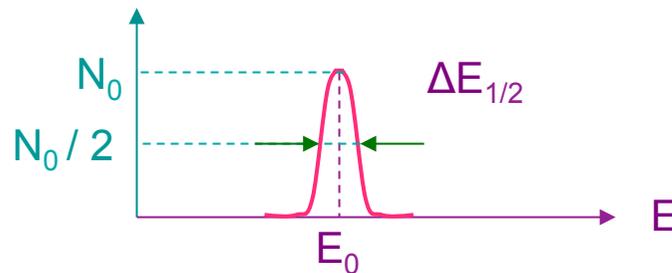
capacità del rivelatore di discriminare energie vicine

Misura: fascio monocromatico ( $E_0$ ) di particelle che incide sul rivelatore → osservazione dello spettro d'ampiezza risultante:

- Caso ideale:  $\delta$  di Dirac



- Caso reale: fluttuazioni nel n. di ionizzazioni → gaussiana



$$R = \frac{\Delta E_{1/2}}{E_0} \quad (\text{FWHM})$$

# Caratteristiche Generali

$\epsilon$  = energia media richiesta per una ionizzazione: funzione solo del tipo di materiale di cui è realizzato il rivelatore  $\rightarrow$  particella che deposita energia  $E$  compie, in media,  $J = E / \epsilon$  ionizzazioni !!

Natura poissoniana del processo di ionizzazione  $\rightarrow$  fluttuazione nel n. di ionizzazioni =  $J^{1/2}$



$$R \propto J^{1/2} / J = J^{-1/2}$$



$$R \propto E^{-1/2}$$

risoluzione energetica migliora al crescere dell' energia della radiazione da rivelare

# Caratteristiche Generali

## Efficienza

2 tipi d'efficienza:

i. assoluta

$$\epsilon_T = \frac{N_R}{N_S}$$

n. impulsi rivelati

n. particelle emesse  
dalla sorgente

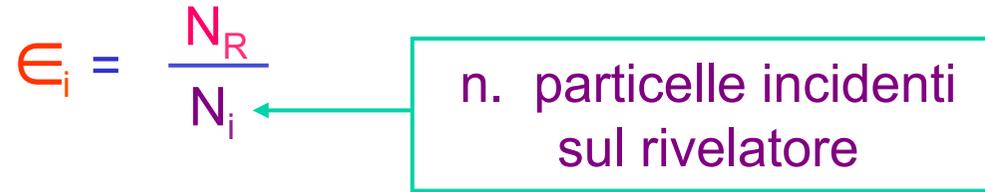
funzione di:

- geometria del rivelatore
- probabilità d'interazione nel rivelatore

# Caratteristiche Generali

ii. intrinseca  $\epsilon_i = \frac{N_R}{N_i}$

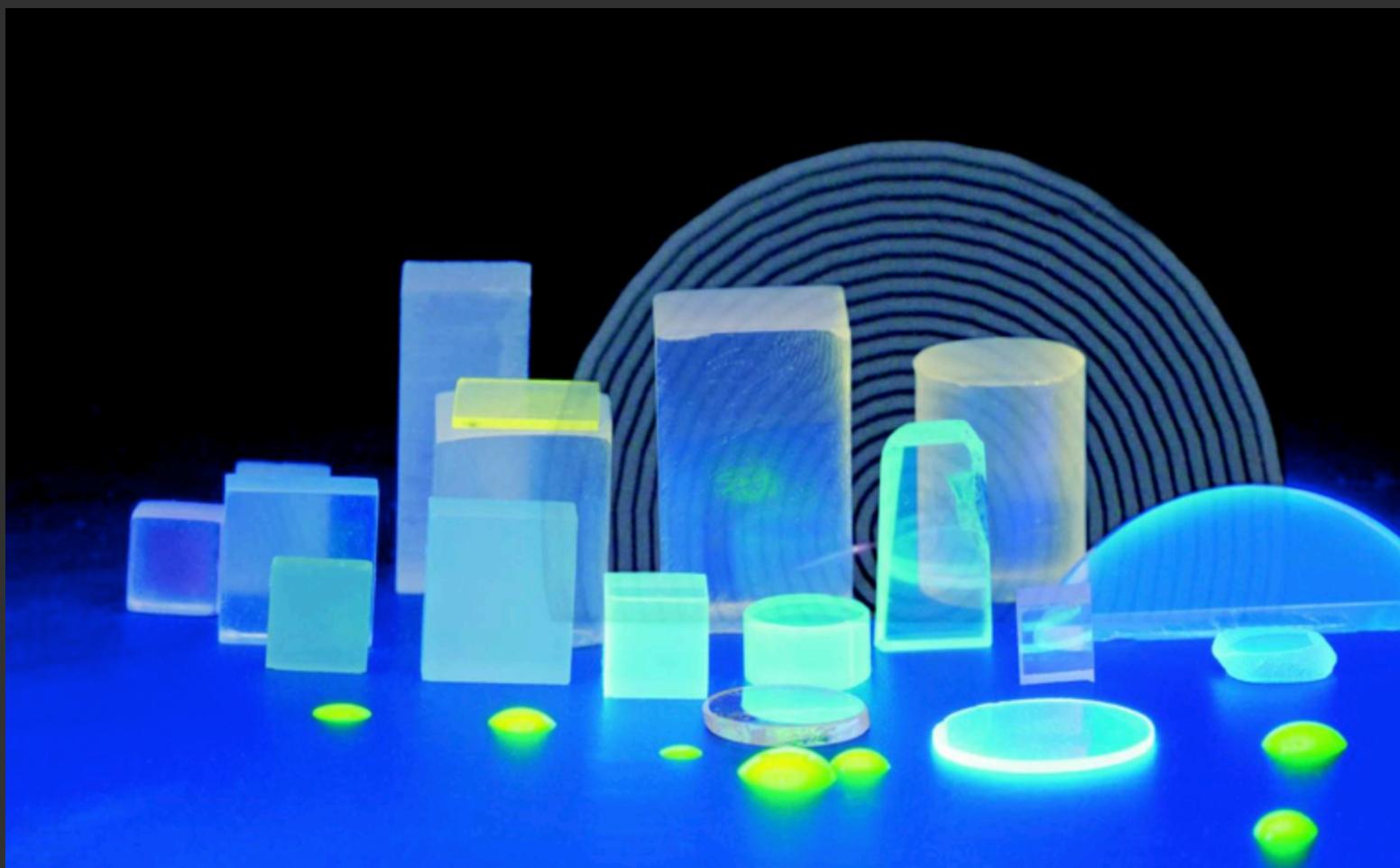
n. particelle incidenti sul rivelatore



funzione solo probabilità d'interazione nel rivelatore, i.e. dipende da:

- tipo & energia della radiazione
- materiale di cui è composto il rivelatore

# Scintillatori



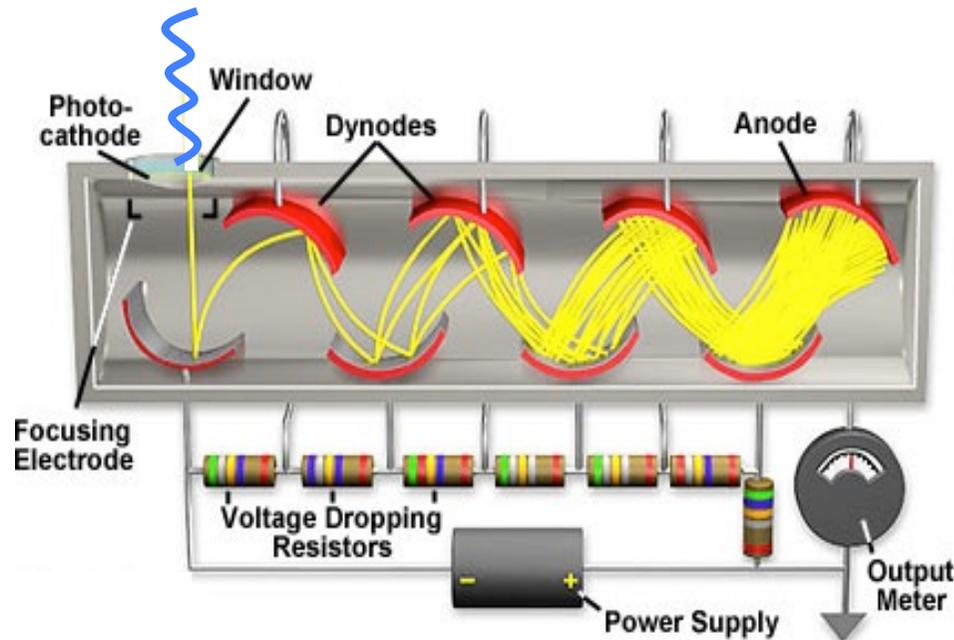
# Rivelatori a Scintillazione

## Principio di rivelazione basato sulla scintillazione

- Passaggio di radiazione attraverso materiale **scintillante**
- eccitazione di atomi e molecole del materiale
- **emissione di luce**
- raccolta e trasmessa (direttamente o via una **guida di luce**) ad un fotomoltiplicatore (PMT)
- convertita in una **corrente elettrica**
- analizzata da un **sistema elettronico**

# Fotomoltiplicatore

Fotone visibile colpisce **catodo** → **emissione**, per effetto fotoelettrico, di  $e^-$  che, causa la tensione applicata, è **accelerato** ed indirizzato **b)** verso il 1<sup>^</sup> dinodo → **emissione di  $e^-$  secondari** che sono **accelerati** ed indirizzati verso dinodo successivo → **formazione di cascata di  $e^-$**  attraverso i dinodi **c)** → **raccolta della cascata all' anodo d)**



tragitto **catodo – anodo**  
richiede circa **40 ns**

tempo di salita  
dell' impulso di corrente  
circa **2 ns**

# Fotomoltiplicatore

a) **Catodo:** parametro fondamentale è l' **efficienza quantica**

$$\eta(\lambda) = \frac{N_{\text{ph.e.}}}{N_{\text{ph.i.}}(\lambda)}$$

← n. fotoelettroni emessi

← n. fotoni incidenti

Materiale più usato: **Sb-Rb-Cs** →  $\lambda_M = 420 \text{ nm}$ ;  $\eta(\lambda_M) \cong 20 \%$

b) **Sistema di raccolta d' ingresso:** 2 requisiti essenziali

- raccolta efficiente, i.e. maggior n. di **e<sup>-</sup>** prodotti deve raggiungere il **1<sup>^</sup> dinodo**, ovunque siano generati sul catodo
- tempo impiegato dagli **e<sup>-</sup>** per giungere sul **1<sup>^</sup> dinodo** deve essere indipendente da p.to di generazione sul catodo: **influisce sulla risoluzione temporale del rivelatore**

# Fotomoltiplicatore



particolari configurazioni di campo elettrico

- c) Sistema di moltiplicazione: emissione di  $e^-$  molto simile all'effetto fotoelettrico: fotone è sostituito da  $e^-$  → guadagno di singolo dinodo =  $\delta$  → guadagno totale con  $n$  dinodi =  $\delta^n$

- Requisiti:
- alto  $\delta$  (2 ÷ 3)
  - stabilità dell'emissione secondaria
  - bassa emissione termoionica → basso rumore

Materiale: terra alcalina (per l'emissione secondaria) deposta su conduttore (campo elettrico per accelerare  $e^-$ ) → lega Cu-Be

# Rivelatori a Scintillazione

Caratteristiche salienti di questi rivelatori:

## a) Sensibilità all' Energia

al disopra di una certa energia minima, comportamento lineare dello scintillatore rispetto all' energia depositata, i.e. quantità di luce emessa  $\propto$  all' energia  $E$  che l' ha prodotta. PMT lineare  $\rightarrow$  ampiezza del segnale elettrico di uscita  $\propto E \rightarrow$  strumento adatto per fare spettrometria

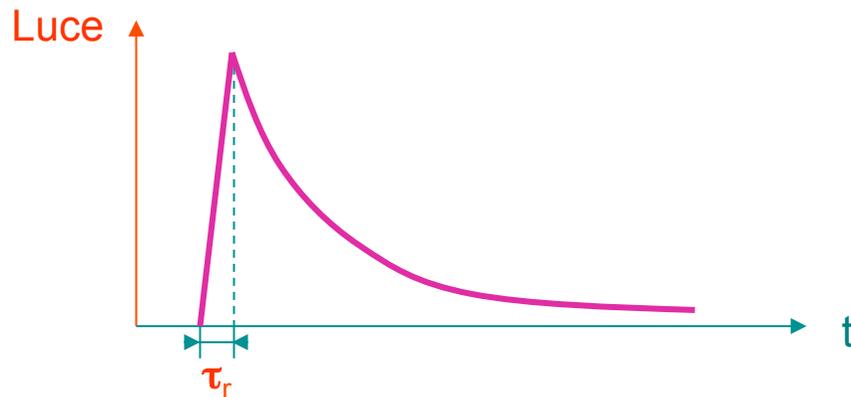
## b) Risposta veloce

tempi di risposta e recupero sono brevi rispetto a quelli tipici di altri rivelatori  $\rightarrow$  strumento adatto per ottenere info temporali (timing); alta velocità di risposta  $\rightarrow$  piccolo tempo morto  $\rightarrow$  sopporta alta rate

# Scintillatori

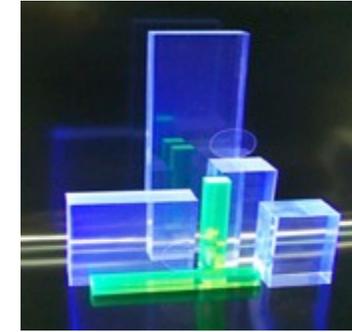
Materiali che esibiscono la proprietà della **luminescenza**:  
quando esposti a certe forme d'energia (radiazione, calore, ...) **assorbono e riemettono energia in forma di luce visibile**

- riemissione immediata (entro 10 ns) → **fluorescenza**
- riemissione ritardata ( $\sim \mu\text{s} \div \sim \text{ora}$ ) → **fosforescenza**



*N.B.* – tempo di salita  $\tau_r \ll \tau_d$

# Scintillatori



Requisiti di un **buono** scintillatore:

- ✓ alta efficienza per la conversione **Energia** → **Luce**
- ✓ **trasparenza** alla sua luce di fluorescenza
- ✓ emissione luminosa in **regione di frequenza sovrapposta** a quella di sensibilità del **PMT**
- ✓ **piccolo**  $\tau_d$

Tipi di scintillatori:

- ❖ cristalli organici ( $C_{14}H_{10}$ ,  $C_{14}H_{12}$ ,  $C_{10}H_8$ )
- ❖ liquidi e plastici organici ( $C_{18}H_{14}$ ,  $C_{24}H_{16}N_2O_2$ )
- ❖ cristalli inorganici (NaI, CsI, BGO,  $BaF_2$ )
- ❖ miscele gassose (90%  $^3He$  + 10% Xe)
- ❖ vetri (silicati di Li e B)

# Scintillatori Organici

composti di idrocarburi aromatici contenenti strutture ad anello benzenico condensate

Caratteristica essenziale: piccolo  $\tau_d$  (< qualche ns)

Meccanismo di scintillazione: eccitazione di livelli molecolari in un materiale fluorescente primario che diseccitandosi emette luce UV.

Luce UV è facilmente assorbita nella maggior parte dei materiali organici → aggiunta di secondo materiale fluorescente in cui questa luce è convertita in luce visibile: wavelength shifter, i.e. materiale con spettro di assorbimento compatibile con quello di emissione del primario e spettro di emissione adattato alla risposta spettrale del PMT

# Scintillatori Organici

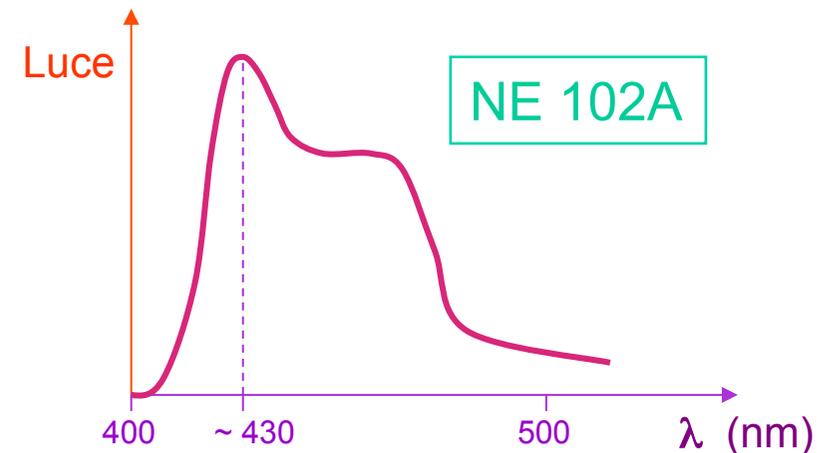
Particolarmente usati sono i **plastici**:

- $\tau_d = 2 \div 3$  ns
- grande quantità di luce

Inoltre:

- facilmente sagomabili (film sottili, fogli, blocchi, cilindri)
- resistenti all' acqua pura e a colle al silicio
- basso costo

*N.B.* – basso  $Z$  → adatti per rivelazione di  $e^-$

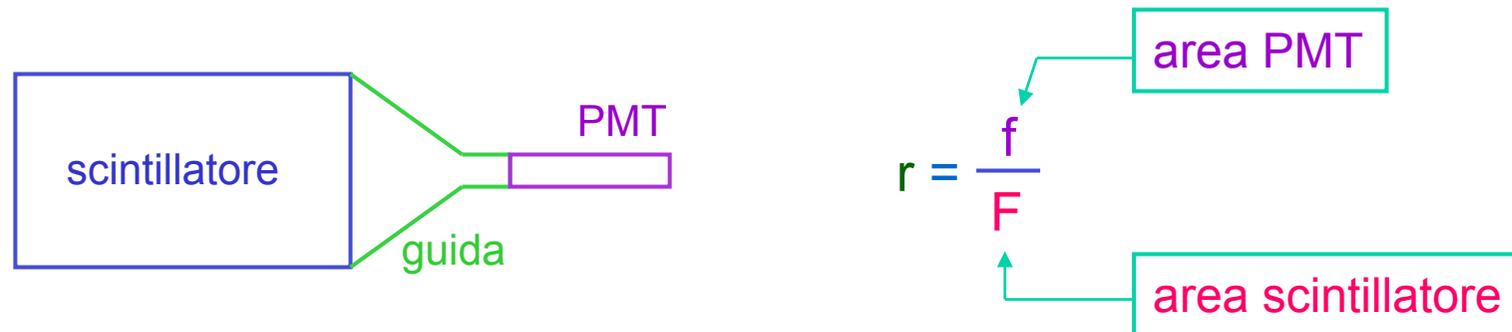


**Svantaggi:** facilmente attaccati da solventi organici (**acetone**)

# Guida di Luce

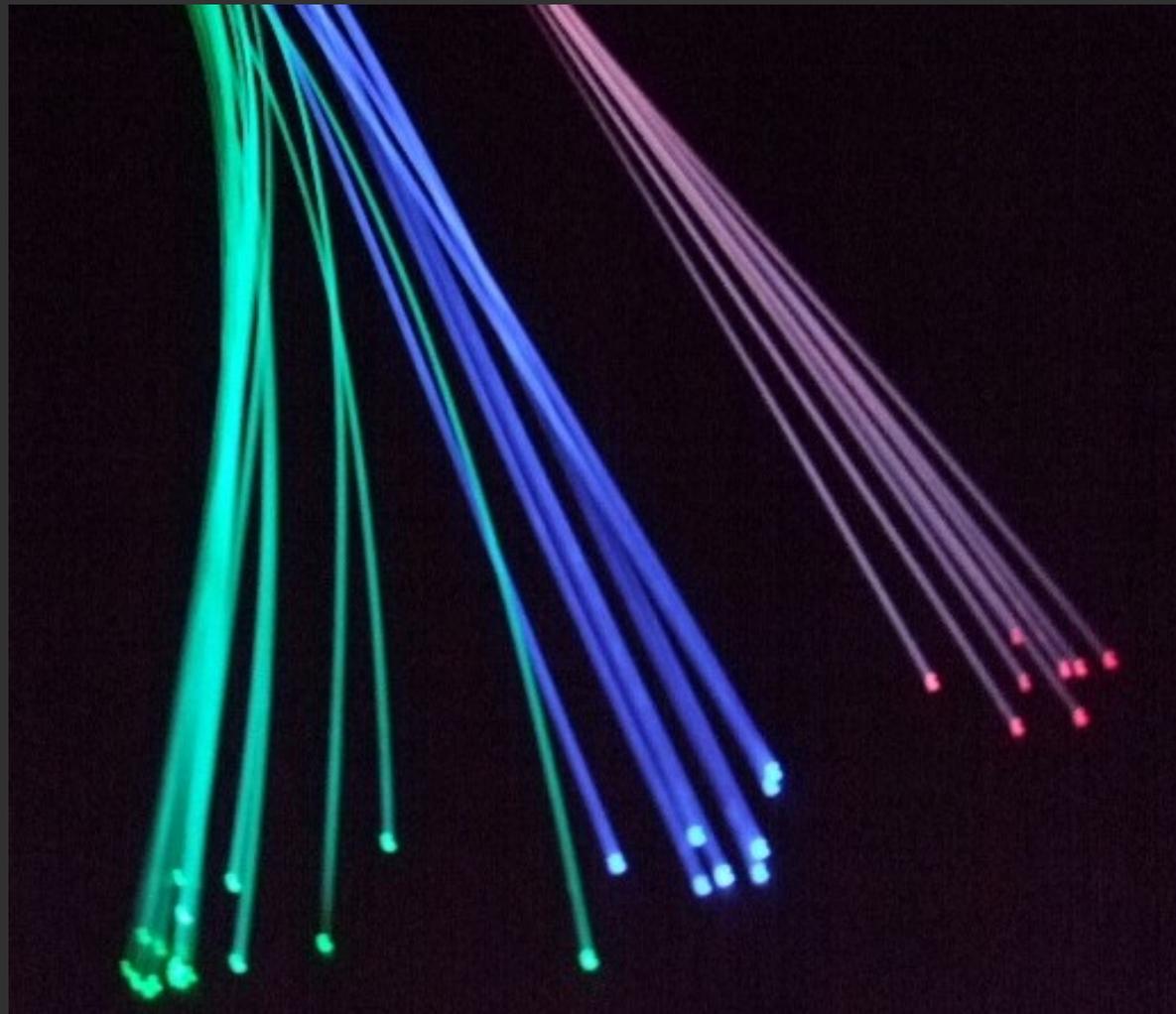
Sistema di trasporto della luce di scintillazione verso il PMT

Materiale plastico (plexiglass) opportunamente sagomato in modo da adattare la superficie di uscita dello scintillatore con quella d'ingresso del PMT → solo una frazione  $r$  della luce prodotta raggiunge il PMT



**aumento** di  $r$  per mezzo di geometrie più complicate (**twisted**): strisce separate di plexiglass attaccate all'estremità dello scintillatore e attorcigliate in modo da convergere nel PMT

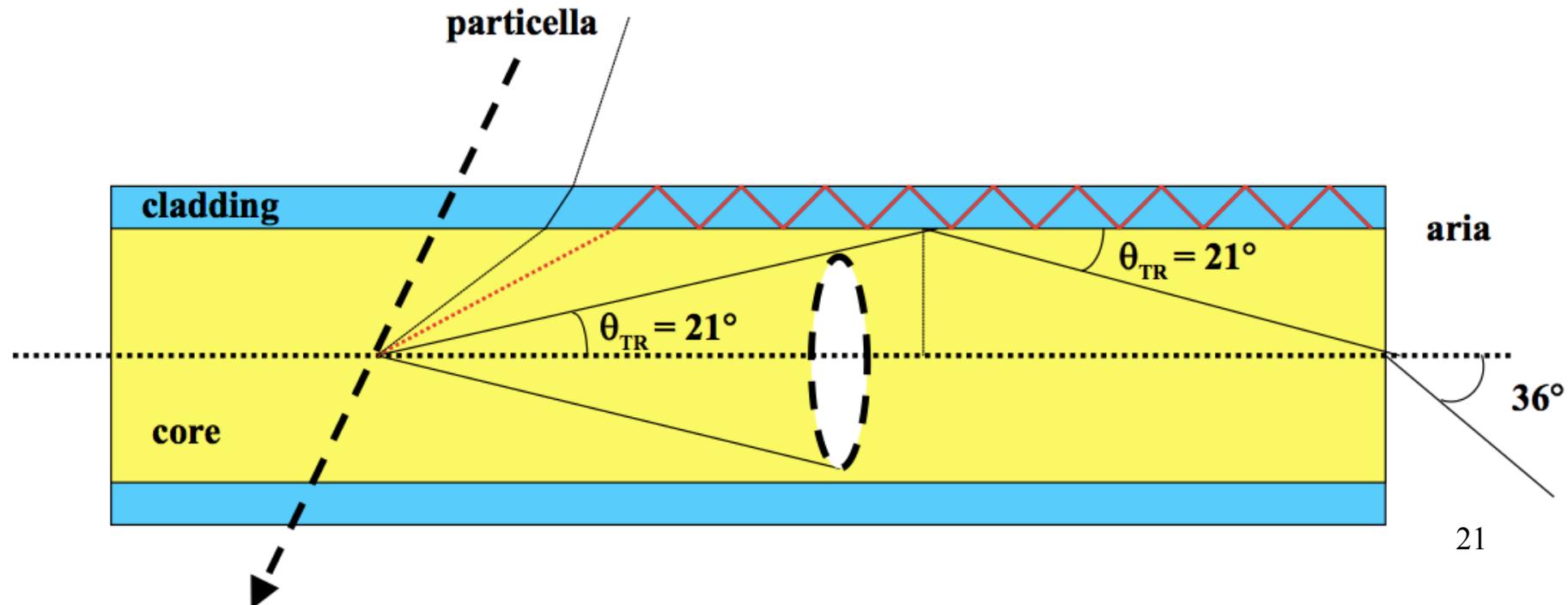
# Fibre Scintillanti



# Fibre scintillanti

Uno scintillatore puo' essere realizzato sotto forma di una fibra ottica. La fibra e' costituita da un nucleo interno chiamato "**core**" e da un rivestimento trasparente detto "**cladding**". Il core e' un materiale plastico (polistirene) opportunamente "drogato" con **molecole organiche**, l'indice di rifrazione e'  $n_1=1.6$ . Il cladding e' costituito di plexiglass  $n_2=1.49$ .

La luce nella fibra si propaga nel **core** per **riflessioni multiple**, procedendo entro un cono di apertura  $\Theta_{TR}=21^\circ$  (angolo di trapping, cioe' di "intrappolamento" della luce).



# Fibre scintillanti

Le fibre scintillanti presentano una **attenuazione esponenziale della luce** trasmessa in funzione della distanza percorsa dalla luce stessa.

$I(x) = I(0) e^{-x/\lambda}$  dove:

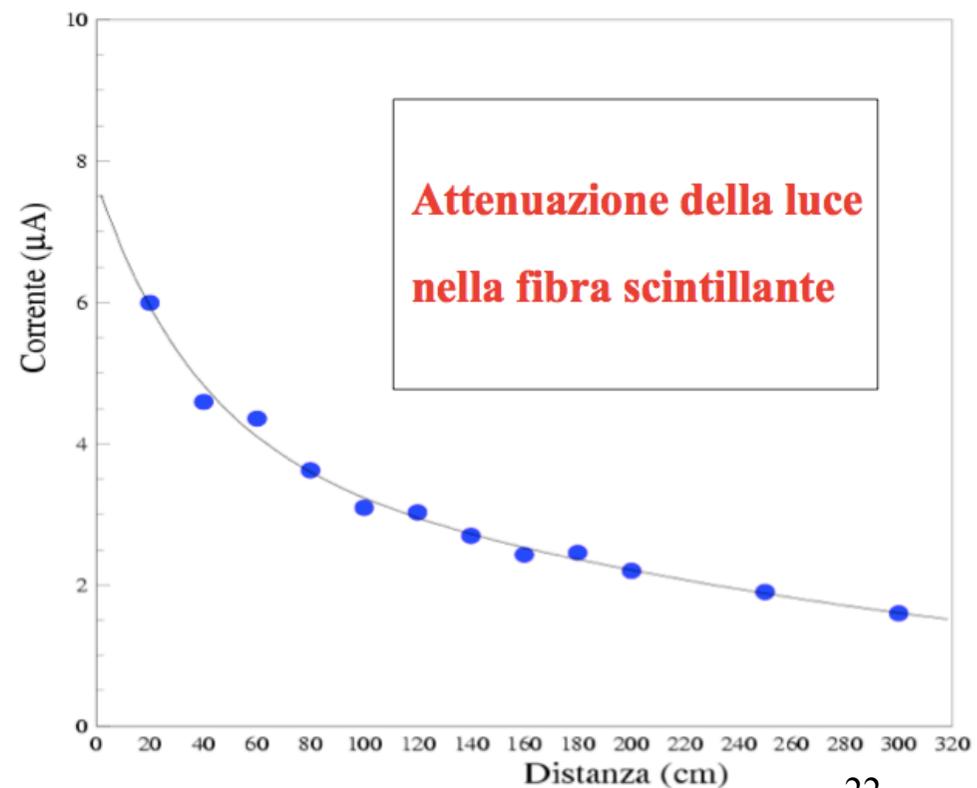
$x$  = distanza percorsa dalla luce

$\lambda$  = lunghezza di attenuazione

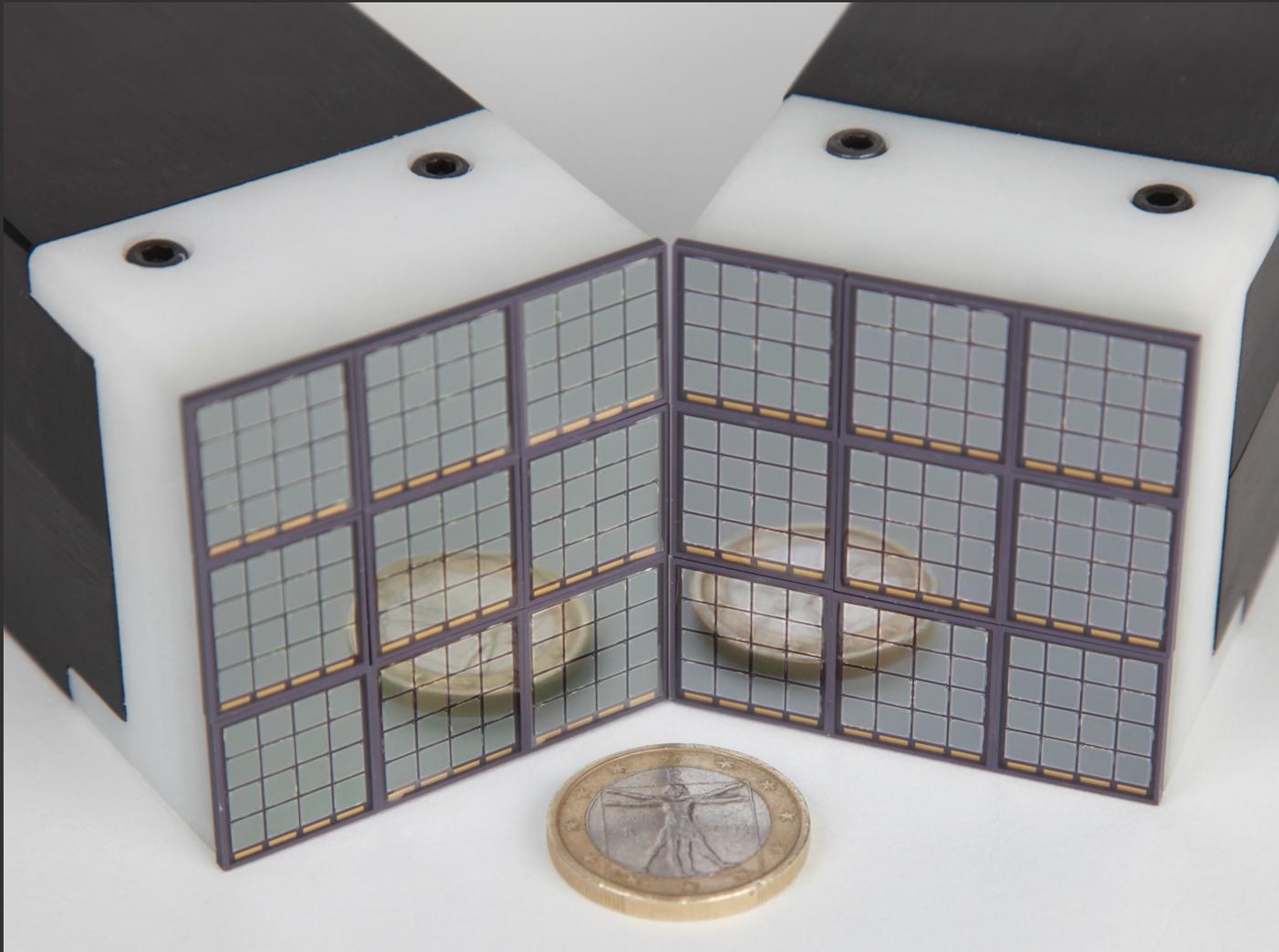
La lunghezza di attenuazione è la distanza per cui la luce inizialmente prodotta si è attenuata di un fattore “e” [ $\ln(e)=1$ ] (cioè  $e \sim 2.7$ ).

Le fibre scintillanti hanno il vantaggio di avere una grande lunghezza di attenuazione ( $\lambda=3\div 4$  m) e quindi il loro impiego è consigliato nel caso di rivelatori “lunghi”.

2002/06/27 17.55



# Silicon Photomultiplier



# SiPM

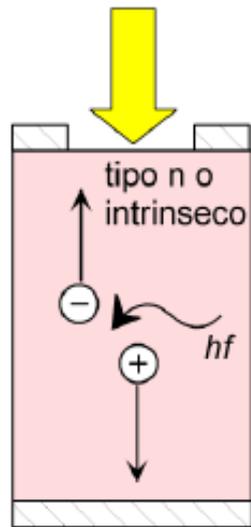
Perché lasciare i vecchi PMT e passare al silicio?

Perché cerchiamo un rivelatore che soddisfi queste caratteristiche:

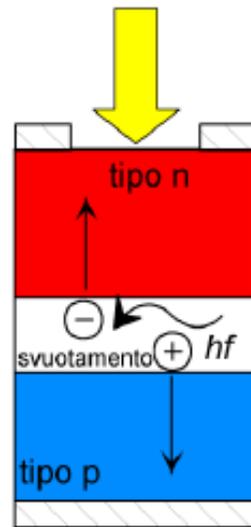
- Alta efficienza quantica
- Alto guadagno
- Alta efficienza a bassi livelli di luce
- Conteggio di fotoni
- Alta linearita'
- Ottima risoluzione temporale
- Basso consumo (senza divisore di tensione)
- Robusto, stabile, compatto
- Insensibile a campi magnetici
- Basso costo

La ricerca di **nuovi fotorivelatori** porta inevitabilmente ai dispositivi al **silicio**

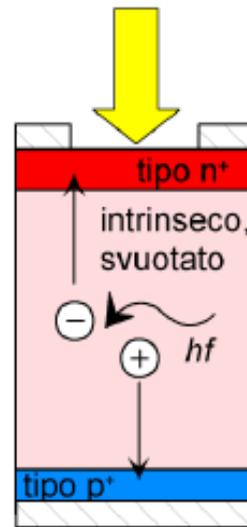
## Giunzioni p-n



Fotoconduttore

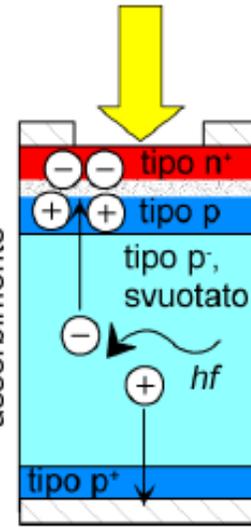


Fotodiodo *pn*



Fotodiodo *pin*

**G=1**



Fotodiodo a valanga

**APD**  
**G=50-100**



= gas

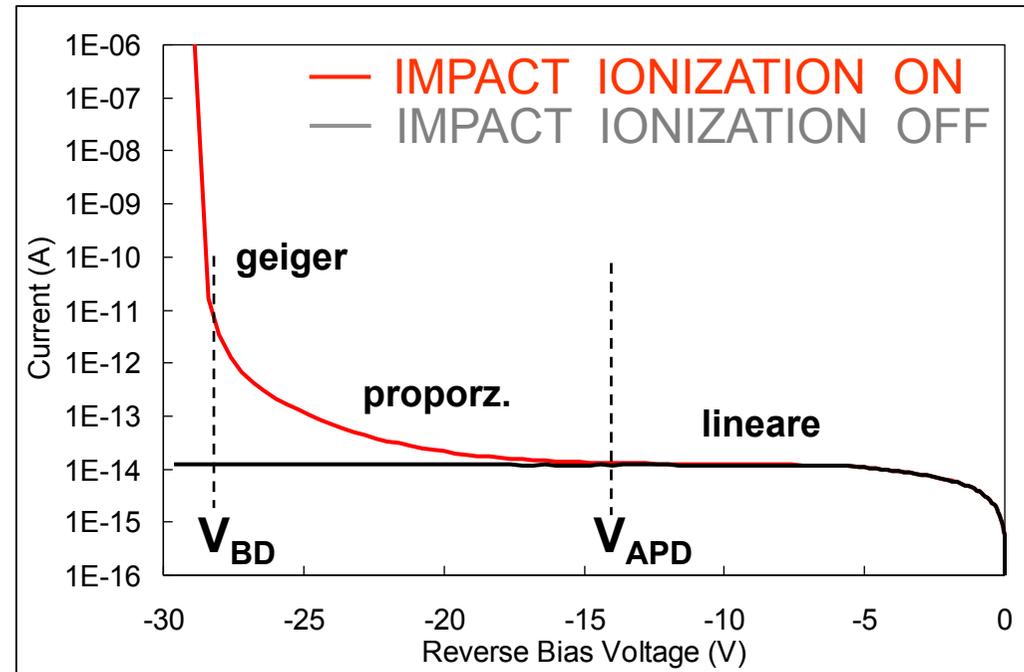
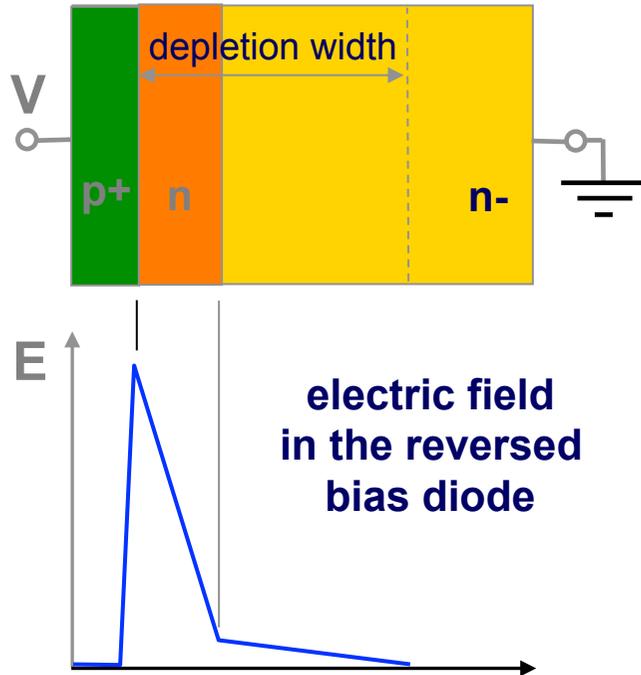
Camere a ionizzazione

camere proporzionali

tubi a streamer/RPC

# Regime Geiger Limitato in Si

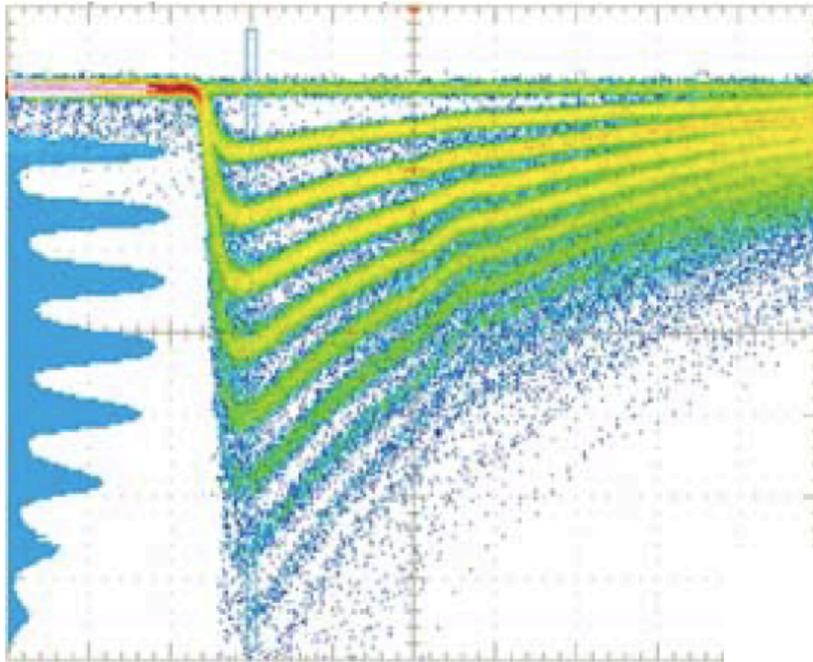
diode structure



$V < V_{APD}$   $\Rightarrow$  **fotodiode**  
 $V_{APD} < V < V_{BD}$   $\Rightarrow$  **APD**  
 $V > V_{BD}$   $\Rightarrow$  **Geiger-mode APD**

**coppie raccolte/coppie generate = 1**  
**coppie raccolte/coppie generate = M**  
**collected pairs/generated pair = ind.**

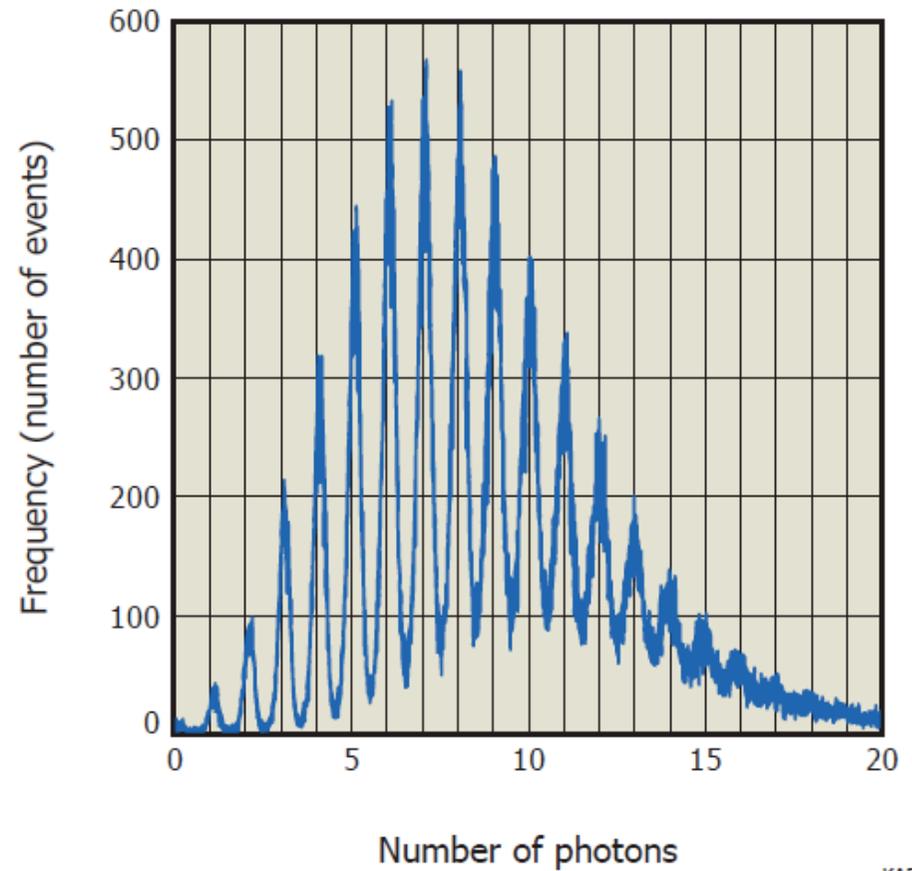
Number of photons

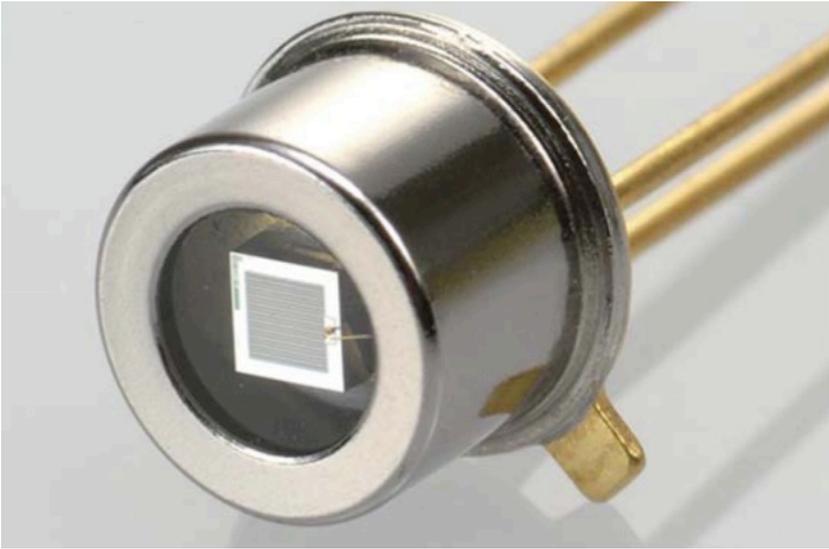
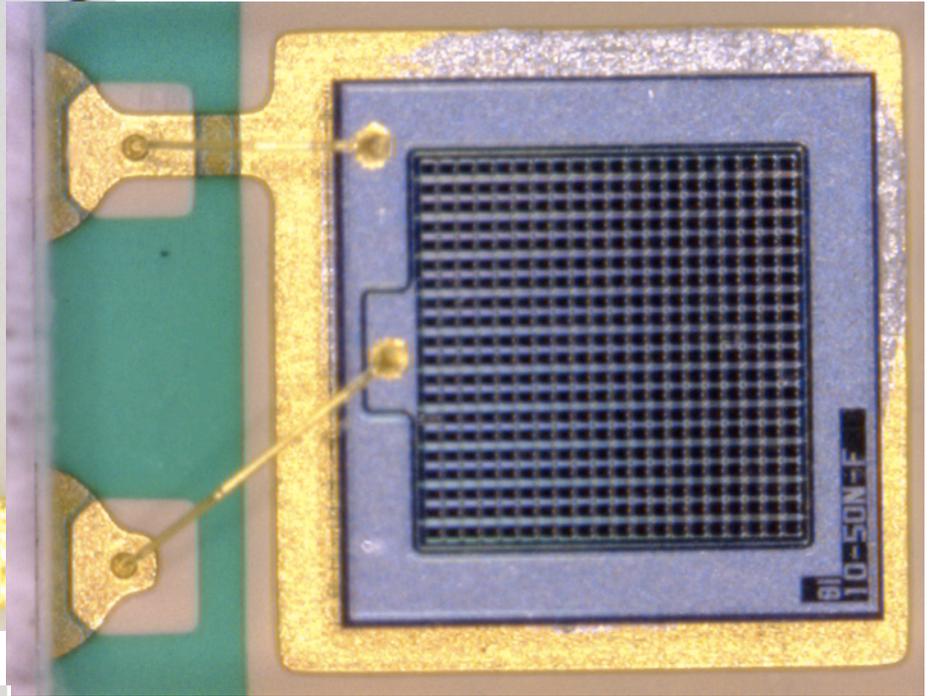
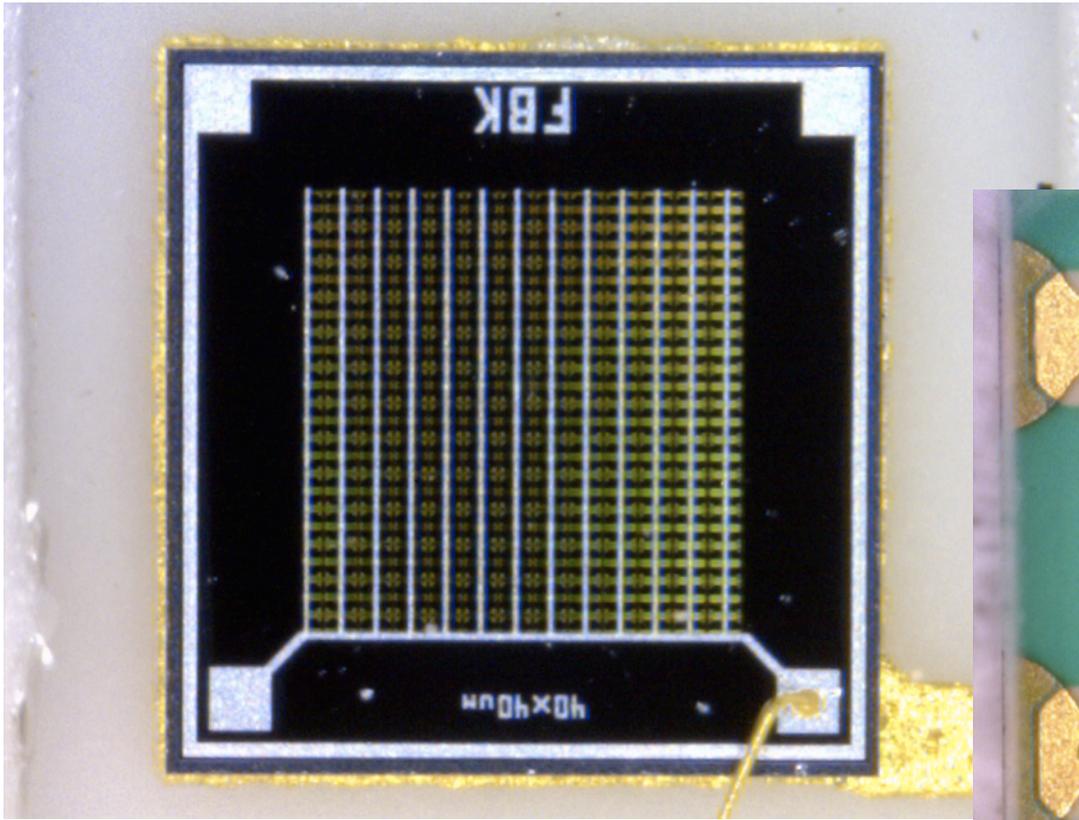


Time

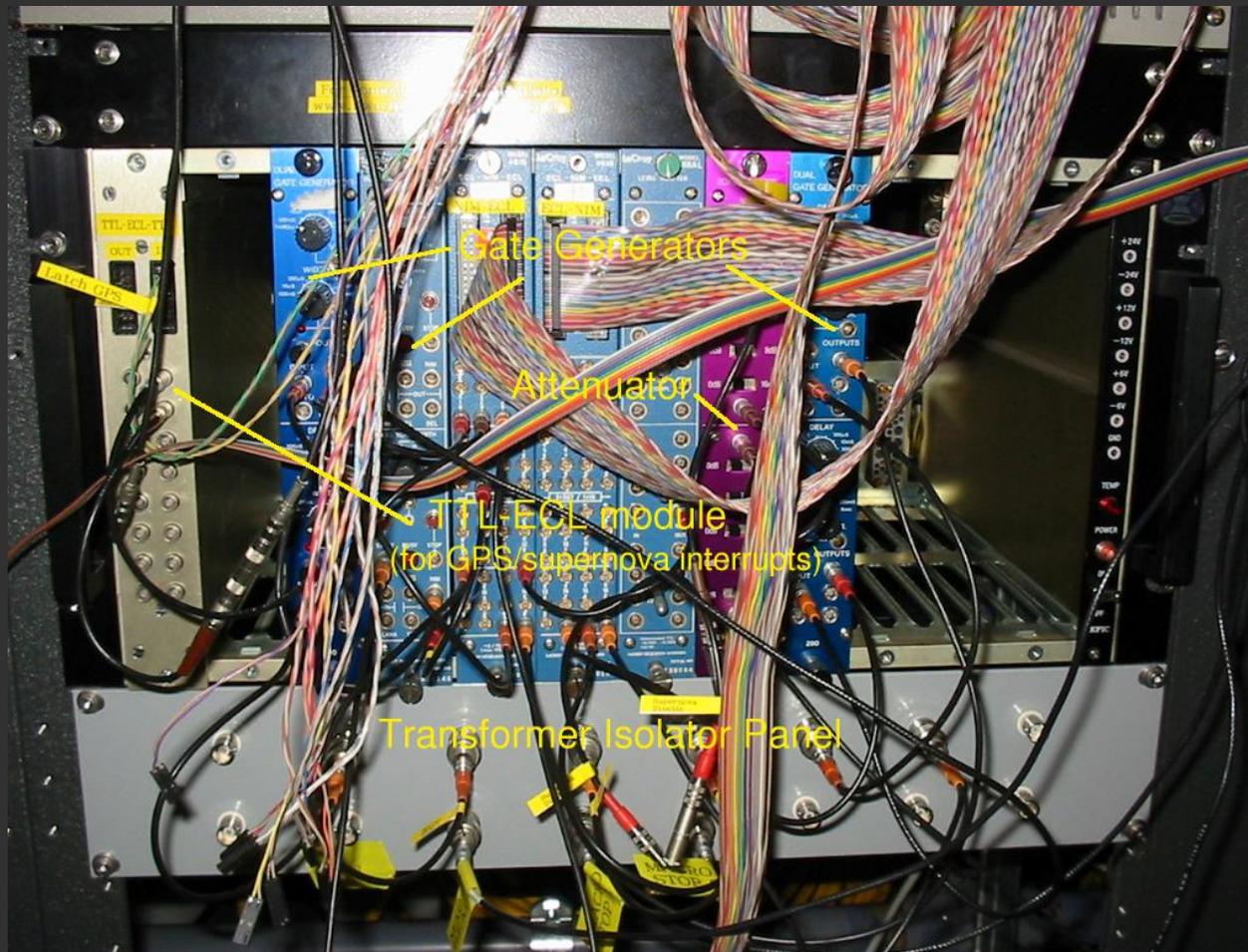
Segnale in carica

Segnale Oscilloscopio





# Gestione Segnali



# A scuola?



# A scuola ...

Un'idea semplice e a costo zero è venuta ai ricercatori del Winsconsin Ice Cube Particle Astrophysics Center:

- Ogni smartphone ha una fotocamera al silicio che funziona grazie all'effetto fotoelettrico
- I pixel della CCD vengono eccitati dal passaggio della luce i.e. della radiazione elettromagnetica
- Ogni radiazione che passa attraverso la CCD rilascia energia ...

# A scuola ...

- Il passaggio di un muone cosmico rilascia energia nel pixel della fotocamera
- Basta “rivelare” questi muoni per trasformare uno smartphone in un rivelatore di particelle

COME?

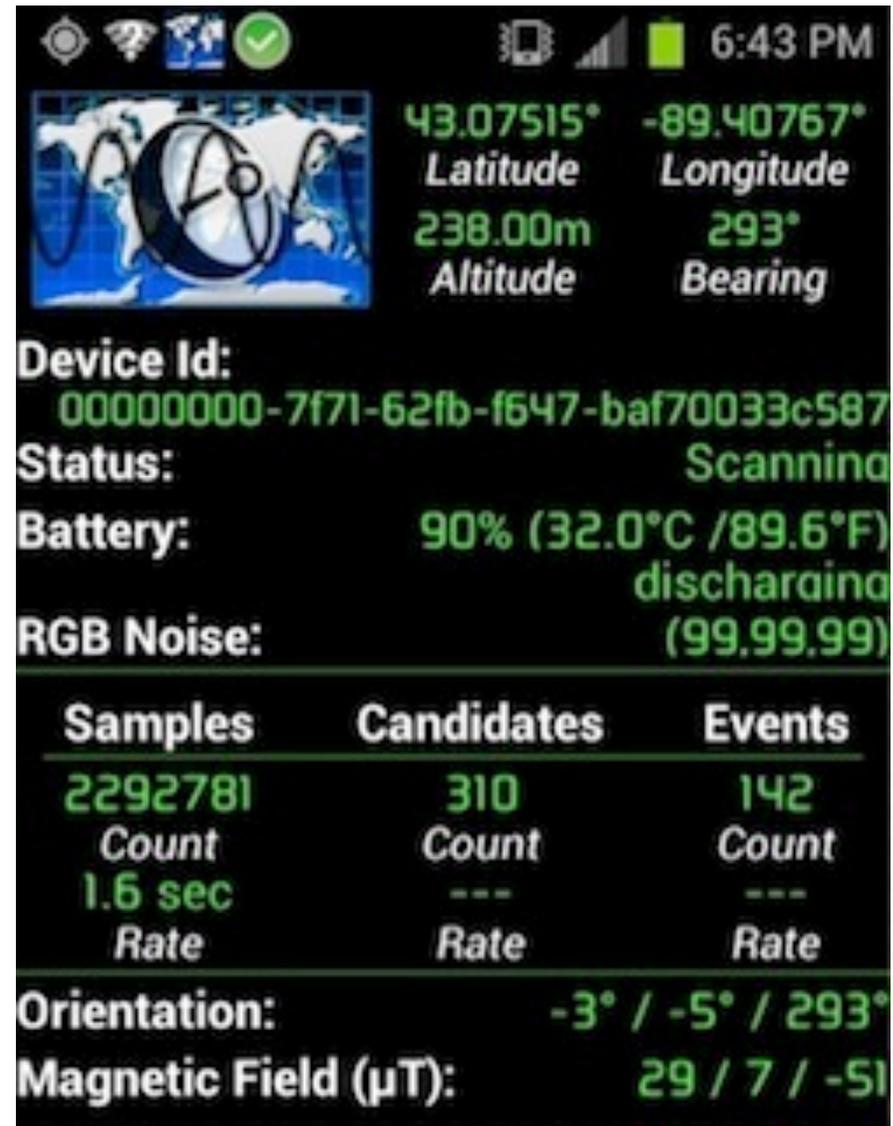
# A scuola ...

- Uno o più strati di scotch nero sulla fotocamera e ....  
**BASTA!**
- 2 Applicazioni sviluppate e già disponibili  
**GRATUITAMENTE** per Android
- <http://wipac.wisc.edu/learn>
- DECO app: online monitor
- DECO datalogger



# A scuola ...

- DECO per iOS in sviluppo
- Esistono già altre applicazioni che sfruttano lo stesso principio per realizzare contatori Geiger
- In base alle condizioni ambientali scegliete quali particelle rivelare
- Esiste una bibliografia notevole sulle esperienze di laboratorio realizzabili mediante smartphone



# A scuola ...

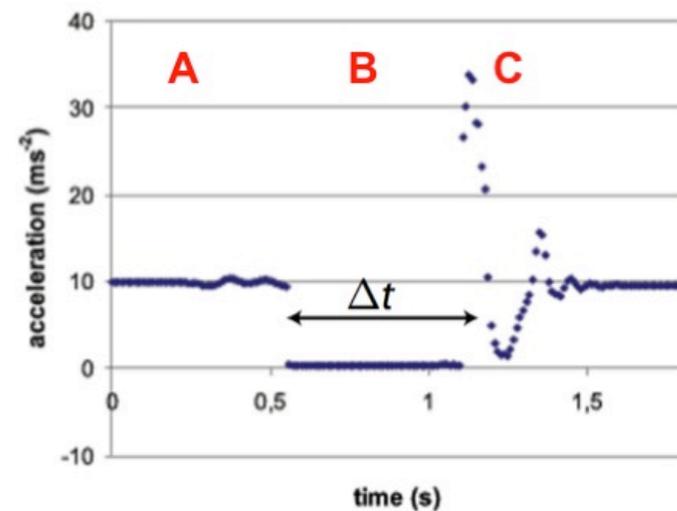
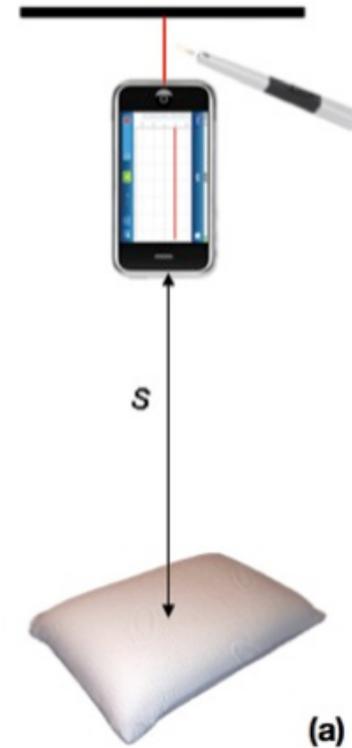
- I nostri smartphone sono dei potenti sistemi per l'elaborazione delle informazioni, dotati di un notevole numero di sensori
- Questi sistemi possono essere utilizzati per realizzare esperienze e laboratori didattici quasi a costo zero



# A scuola ...

Misura dell'accelerazione di gravità:

- Sfruttando un solo accelerometro possiamo misurare  $g$
- Dati raccolti durante la caduta libera
- Misurata l'altezza e il tempo di caduta libera si ricava "g".



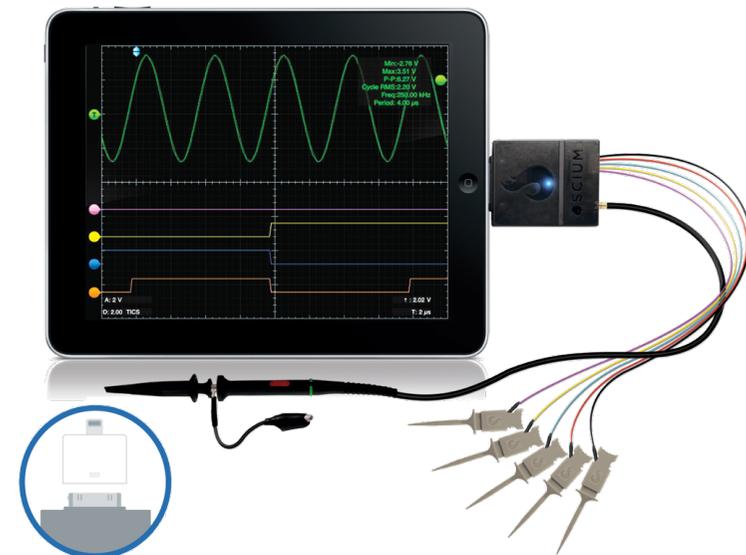
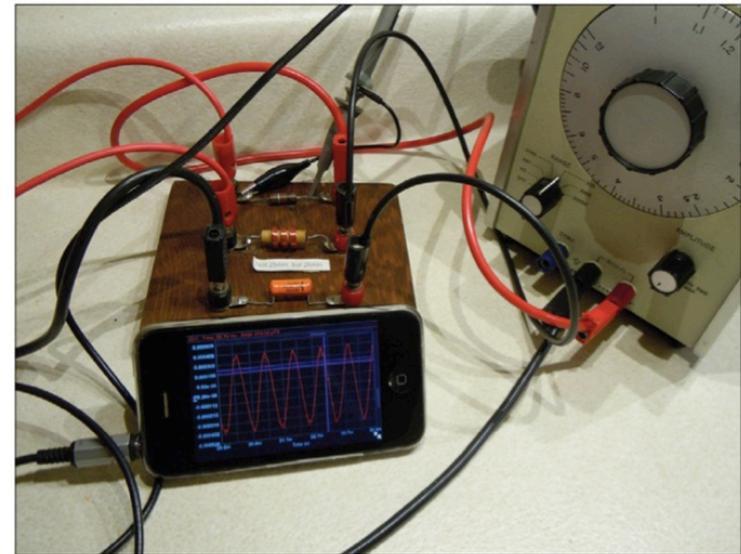
# A scuola ...

Uno degli strumenti essenziali per fare laboratorio è un oscilloscopio.

Strumenti anche entry level hanno un costo di alcune migliaia di euro.

Per fare laboratorio dobbiamo pensare ad un certo numero di tavoli di lavoro ognuno con un oscilloscopio.

La manutenzione costa ....



# A scuola ...

Possibili alternative a basso costo?

Arduino – Raspberry Pi

Possibilità di realizzare strumentazione di laboratorio attraverso altre esperienze di laboratorio ....

