Incontri di fisica

INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali di Frascati

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

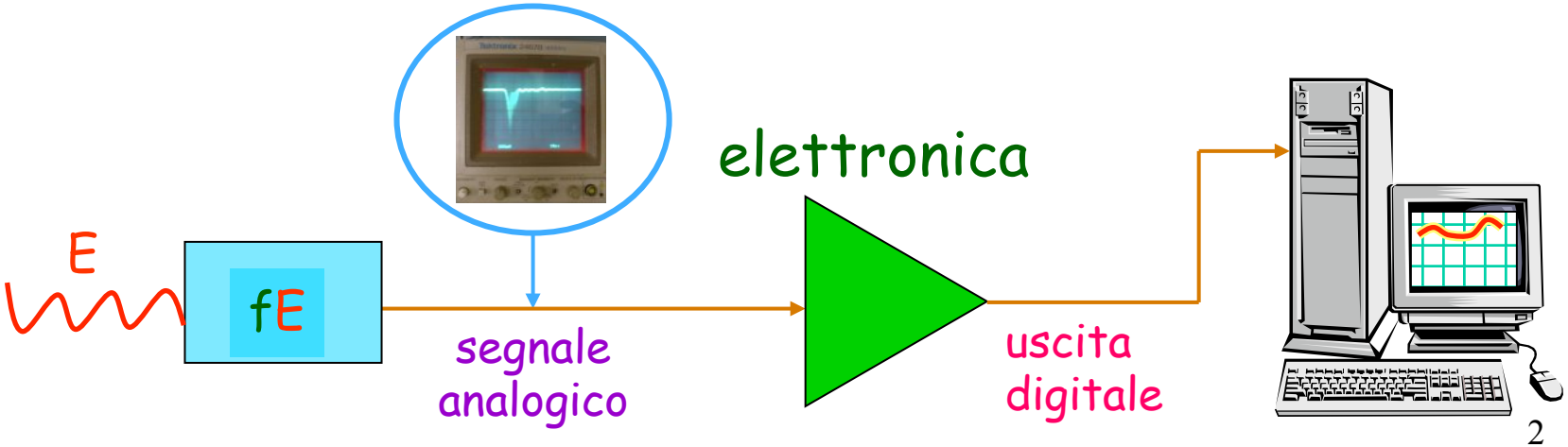
Seminario Introduttivo

Logica

Principio di funzionamento generale di un rivelatore

particella di energia E → trasferimento di energia f E (f ≤ 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:

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

Caratteristiche Generali

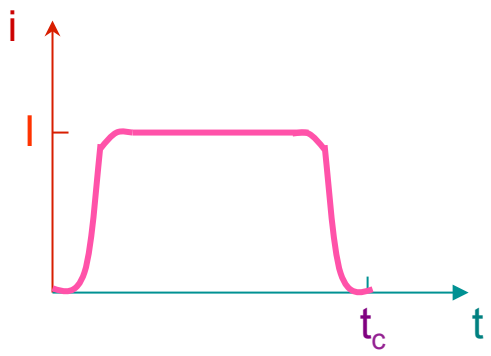
Risposta

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 ÷ 1ns in funzione del tipo di rivelatore

risposta del rivelatore: impulso di corrente



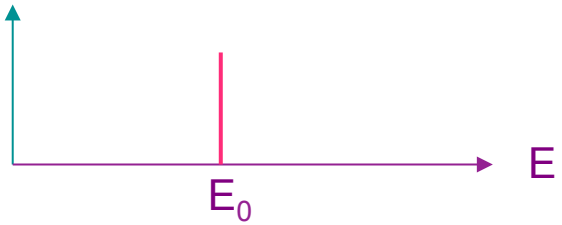
$$Q = \int_0^{t_c} dt \; i(t)$$

Caratteristiche Generali

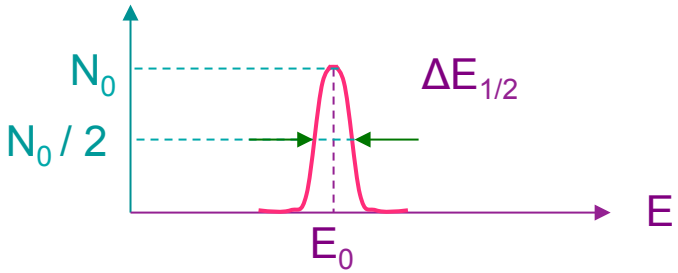
Risoluzione Energetica capacità del rivelatore di discriminare energie vicine

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

- Caso ideale: δ di Dirac



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



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

Caratteristiche Generali

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

Natura poissoniana del processo di ionizzazione → 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 $\in_i = \frac{N_R}{N_i}$

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

Concetti preliminari

Grandezze fondamentali

Energia E [eV] – energia acquisita da un elettrone sottoposto alla d.d.p. di 1 Volt

$1\ \text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\ \text{J}$ Multipli: keV, MeV, GeV, TeV, …

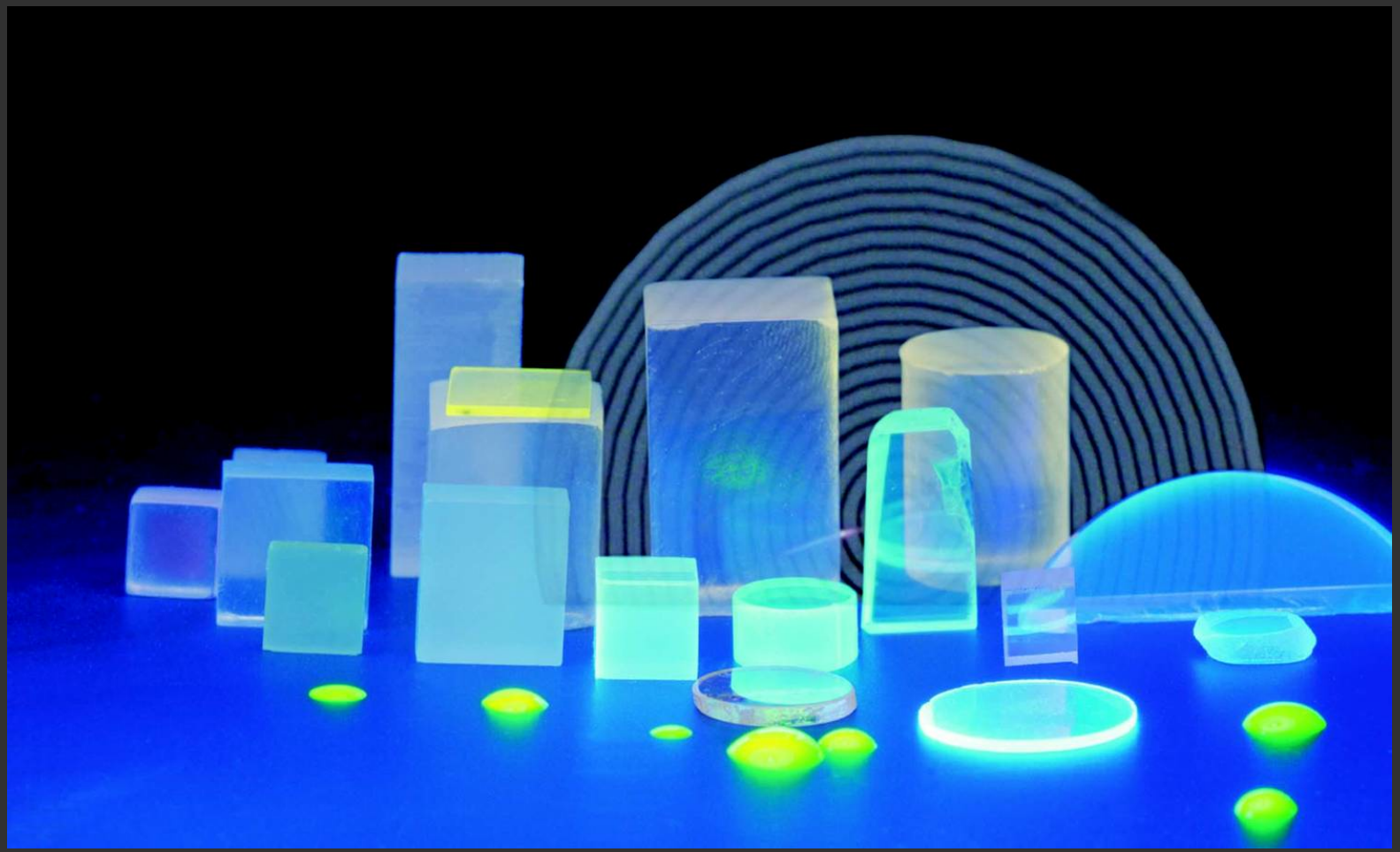
Massa a riposo m [eV/c^2] – misurata tramite $E = mc^2$

$1\ \text{eV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-36}\ \text{kg}$

Impulso p [eV/c] – misurata tramite $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$

$1\ \text{eV}/c = 0.535 \times 10^{-27}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$

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

Tubo elettronico che converte la luce in corrente elettrica misurabile

Struttura di schematica di un PMT

all' interno di un tubo di vetro sottovuoto si hanno:

a) catodo di materiale fotosensibile (converte fotoni in elettroni)

b) sistema di raccolta degli elettroni

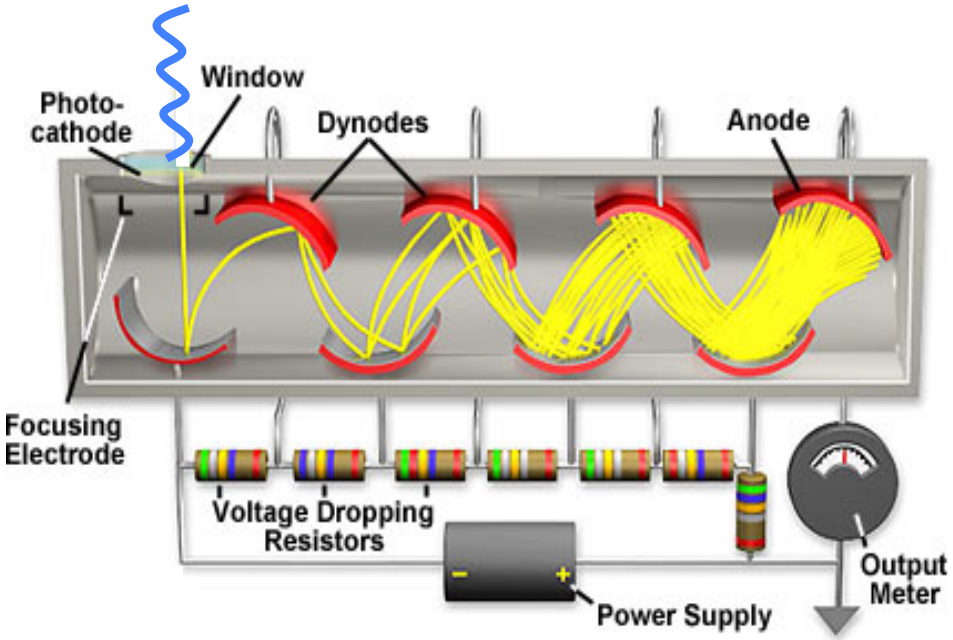
c) moltiplicatore di elettroni (sistema di dinodi)

d) anodo di raccolta per la produzione del segnale finale

tensione (HV) è applicata al sistema catodo - dinodi - anodo tramite un partitore in modo da avere una d.d.p. a scala lungo la struttura

Fotomoltiplicatore

Fotone visibile colpisce catodo → emissione, per effetto fotoelettrico, di e^- che, causa la tensione applicata, è accelerato ed indirizzato b) verso il 1^ 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

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

n. fotoelettroni emessi

n. fotoni incidenti

Materiale più usato: Sb-Rb-Cs → λ_M = 420 nm; $\eta(\lambda_M) \cong 30\ \%$

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

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

Fotomoltiplicatore

→ particolari configurazioni di campo elettrico
(quasi mai campi magnetici)

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

Requisiti:

- alto δ $(2 \div 3)$
- 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

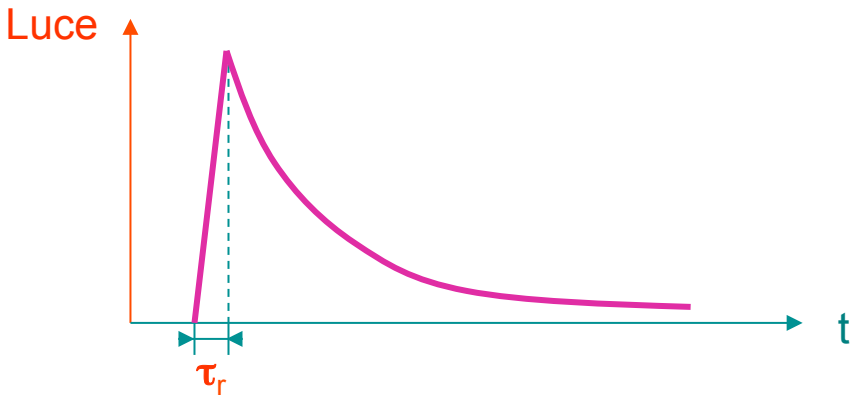
b) Risposta veloce

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

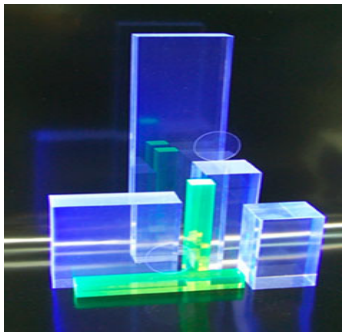
Materiali che esibiscono la proprietà della luminescenza:
quando esposti a certe forme d'energia (radiazione, calore, …)
assorbono e riemettono energia in forma di luce visibile

- riemissione immediata (entro 10 ns) → fluorescenza
- riemissione ritardata (~ μs ÷ ~ 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 τ_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 τ_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

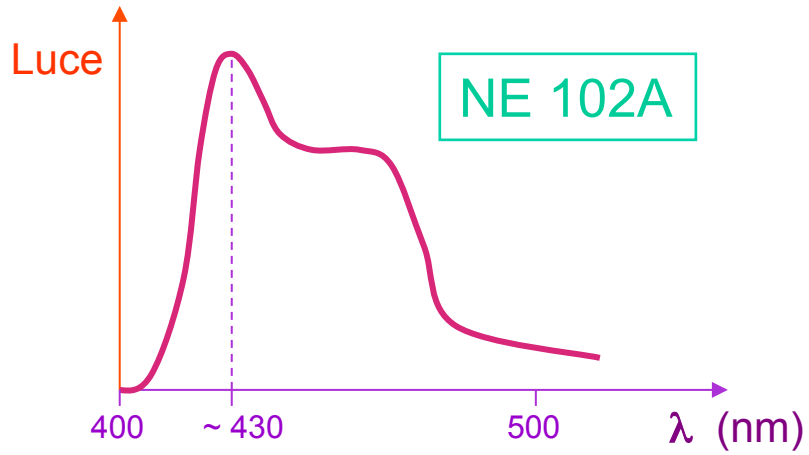
Particolarmente usati sono i plastici:

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

Inoltre:

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

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

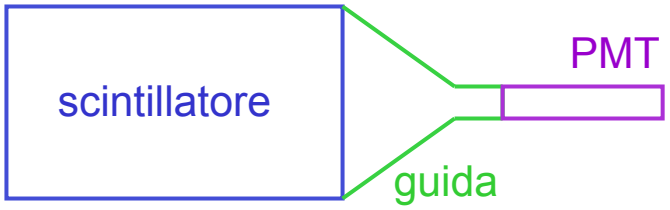


Svantaggi: facilmente attaccati da solventi organici (acetone)

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



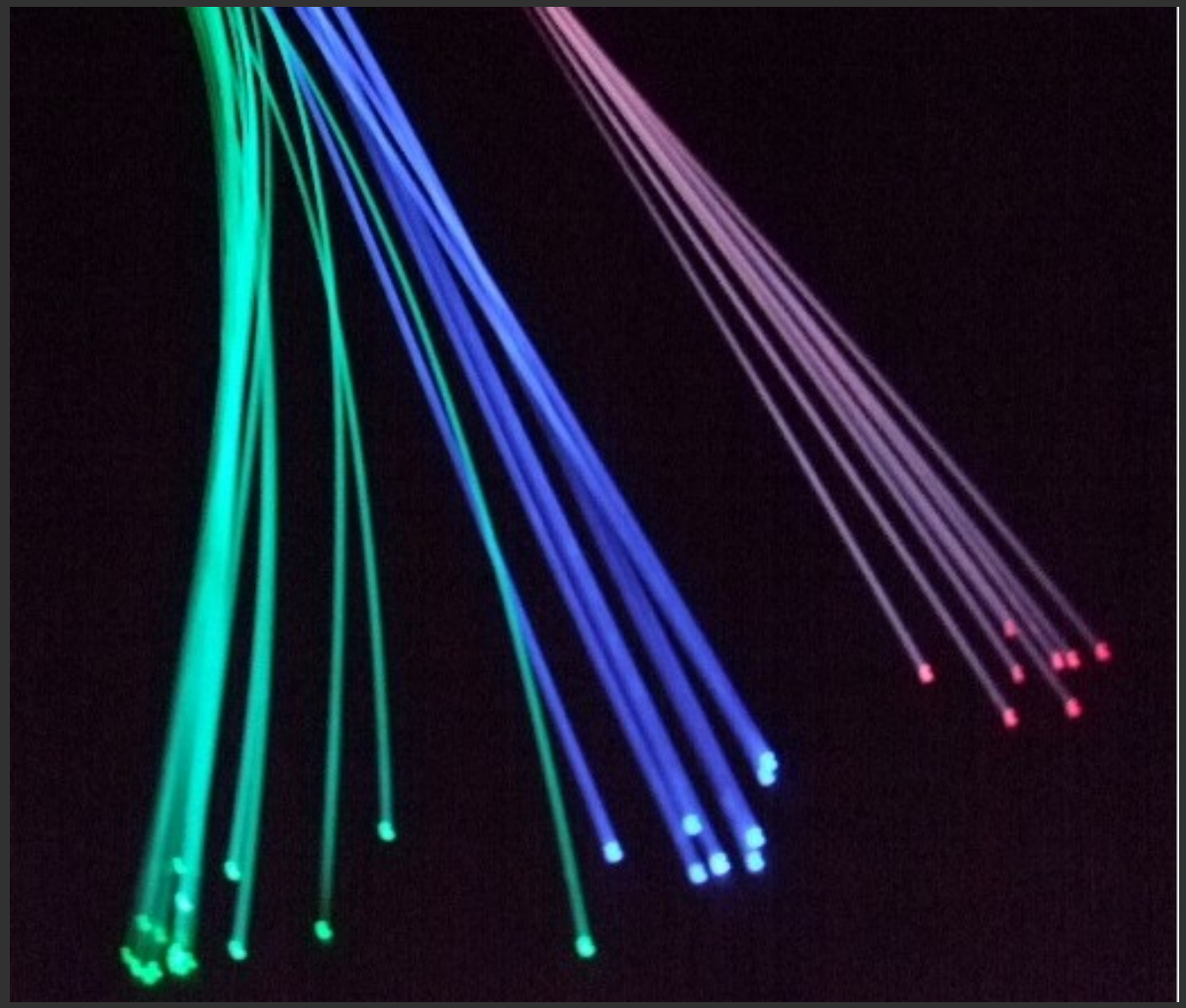
$$r = \frac{f}{F}$$

area PMT

area scintillatore

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

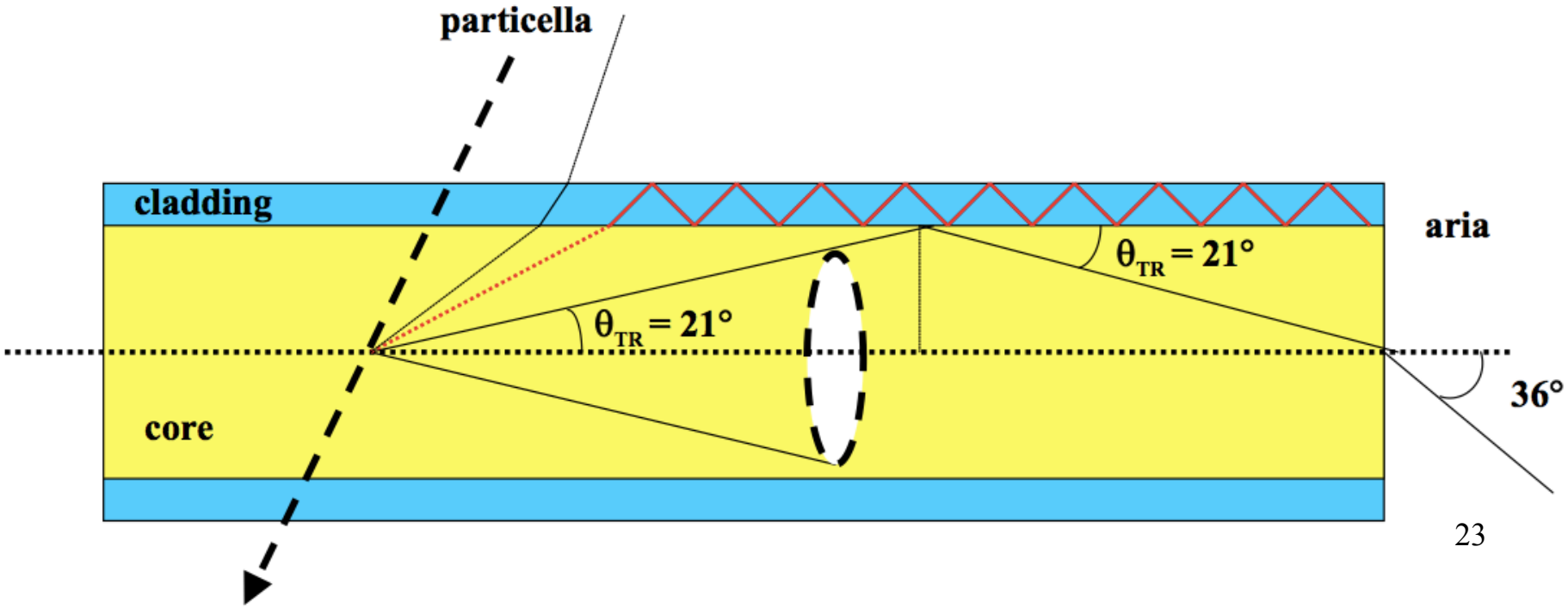
Fibre Scintillanti



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` $\mathbf{n_1=1.6}$. Il cladding e` costituito di plexiglass $\mathbf{n_2=1.49}$.

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



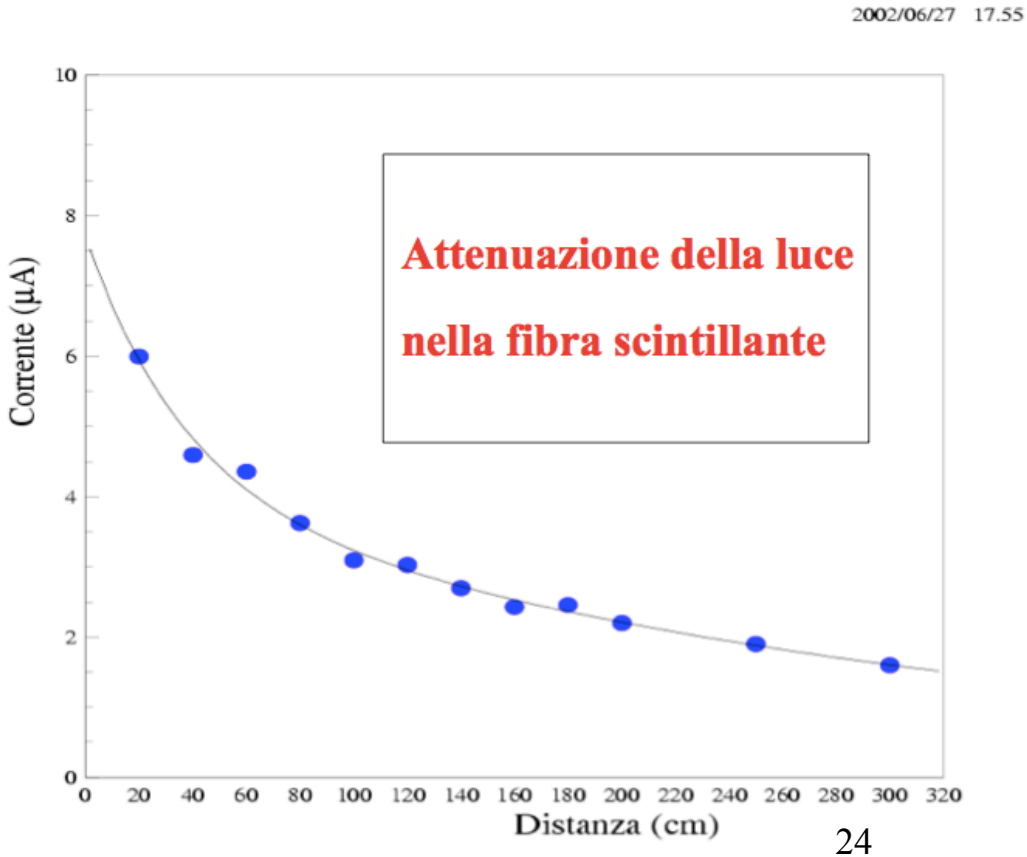
Fibre scintillanti

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

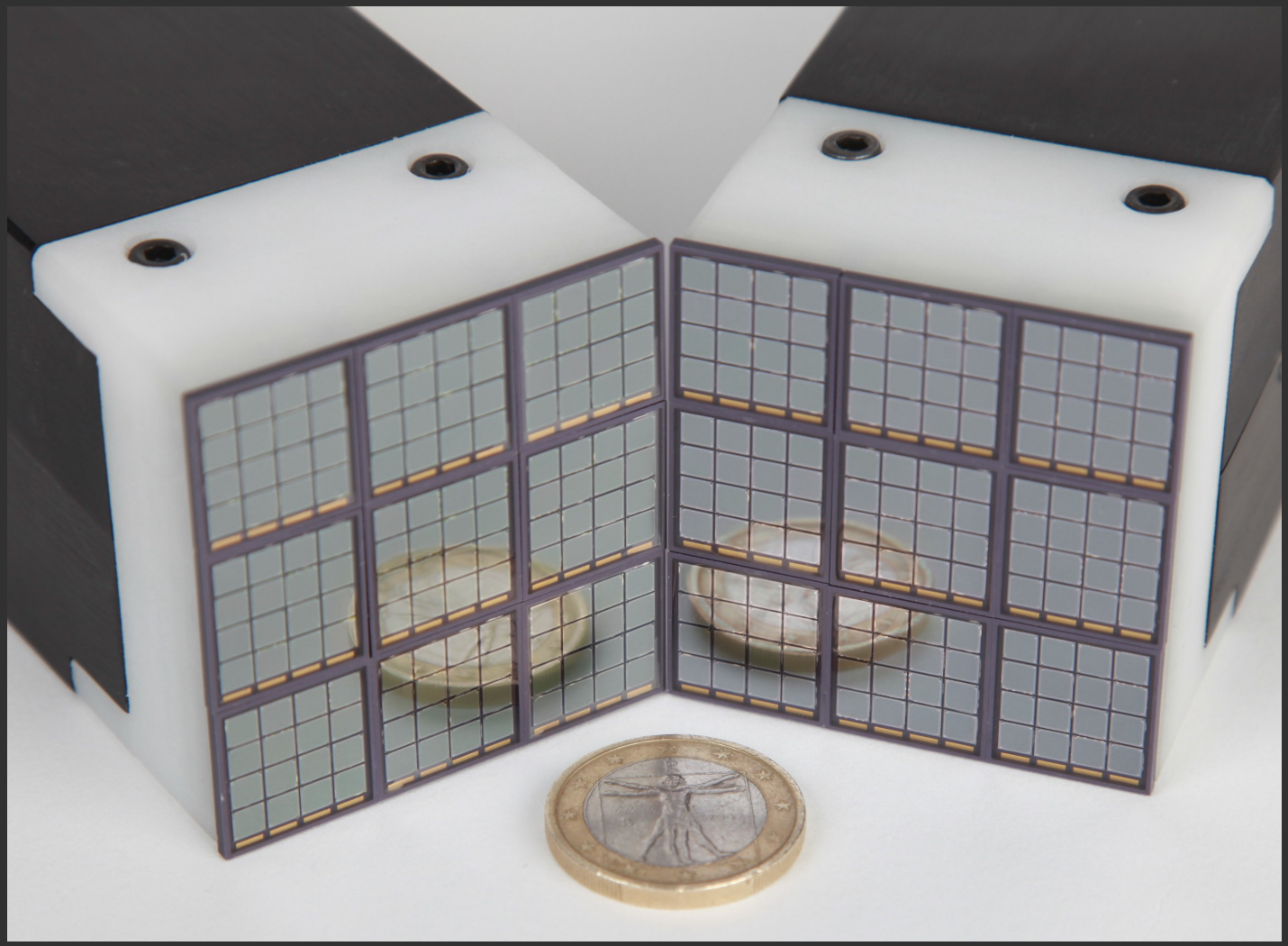
$I(x) = I(0)\, e^{-x/\lambda}$ dove:
x = distanza percorsa dalla luce
λ = lunghezza di attenuazione

La lunghezza di attenuazione e` la distanza per cui la luce inizialmente prodotta si e` attenuata di un fattore "e" [ln(e)=1] (cioe` e ~ 2.7).

Le fibre scintillanti hanno il vantaggio di avere una grande lunghezza di attenuazione (λ=3÷4 m) e quindi il loro impiego e` consigliato nel caso di rivelatori "lunghi".



Silicon Photomultiplier



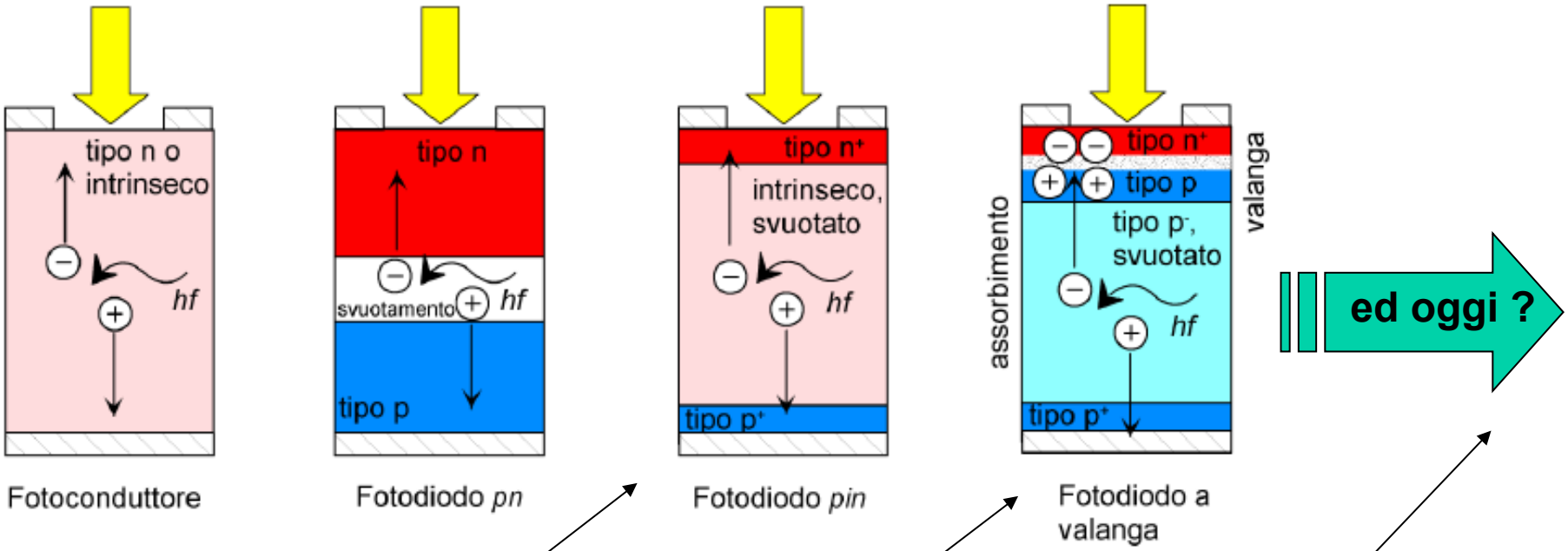
SiPM

Perché lasciare i vecchi PMT e passare al silicio?

- 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



G=1

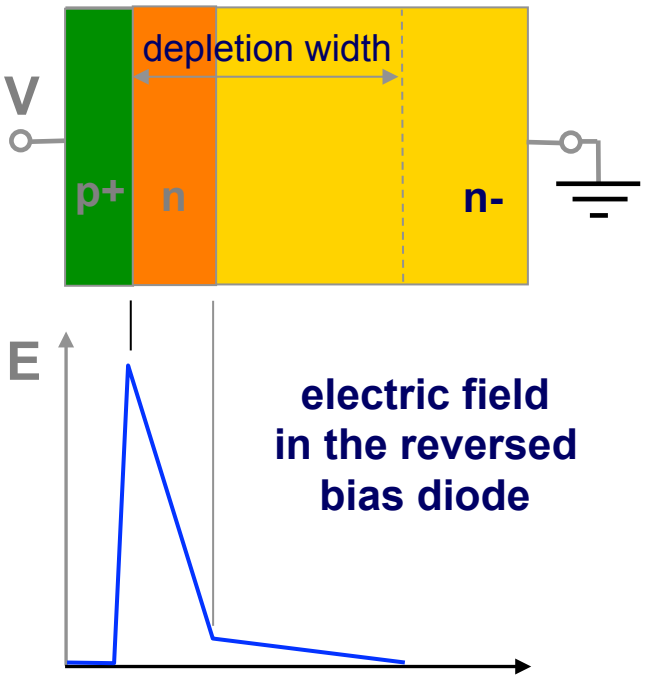
APD
G=50-100

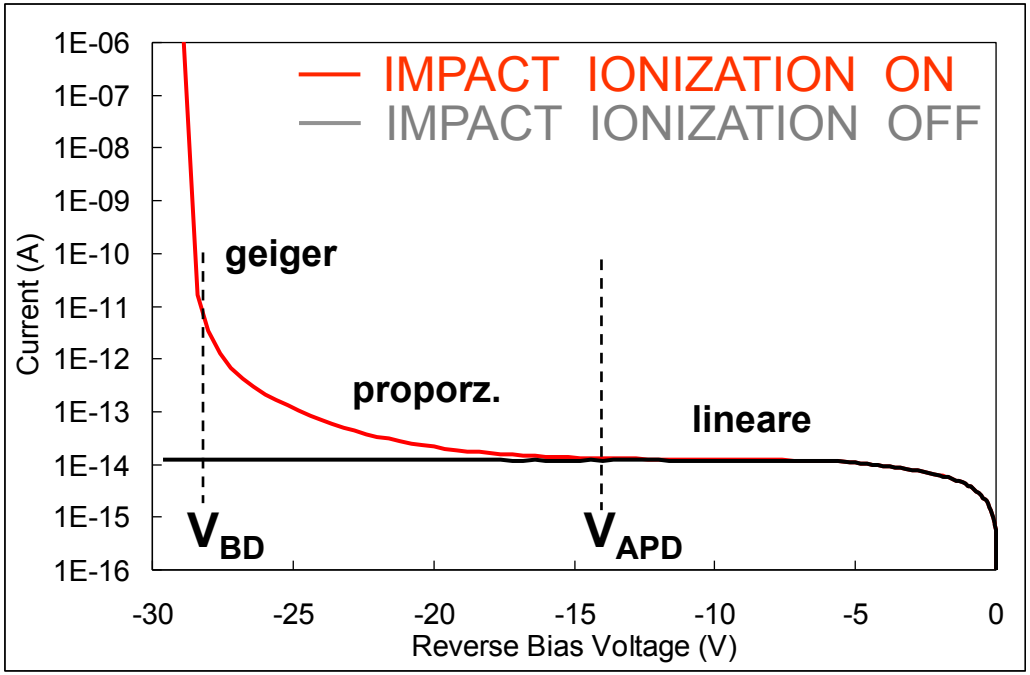
= gas

Camere a ionizzazione **camere proporzionali** **tubi a streamer/RPC**

Regime Geiger Limitato in Si

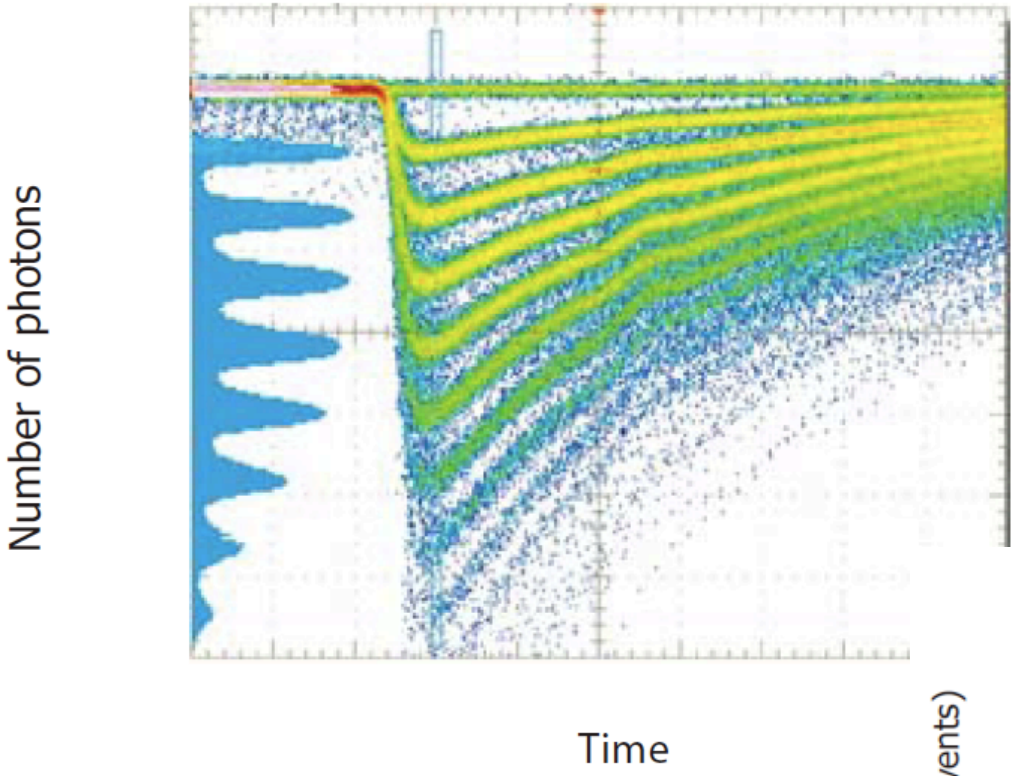
diode structure



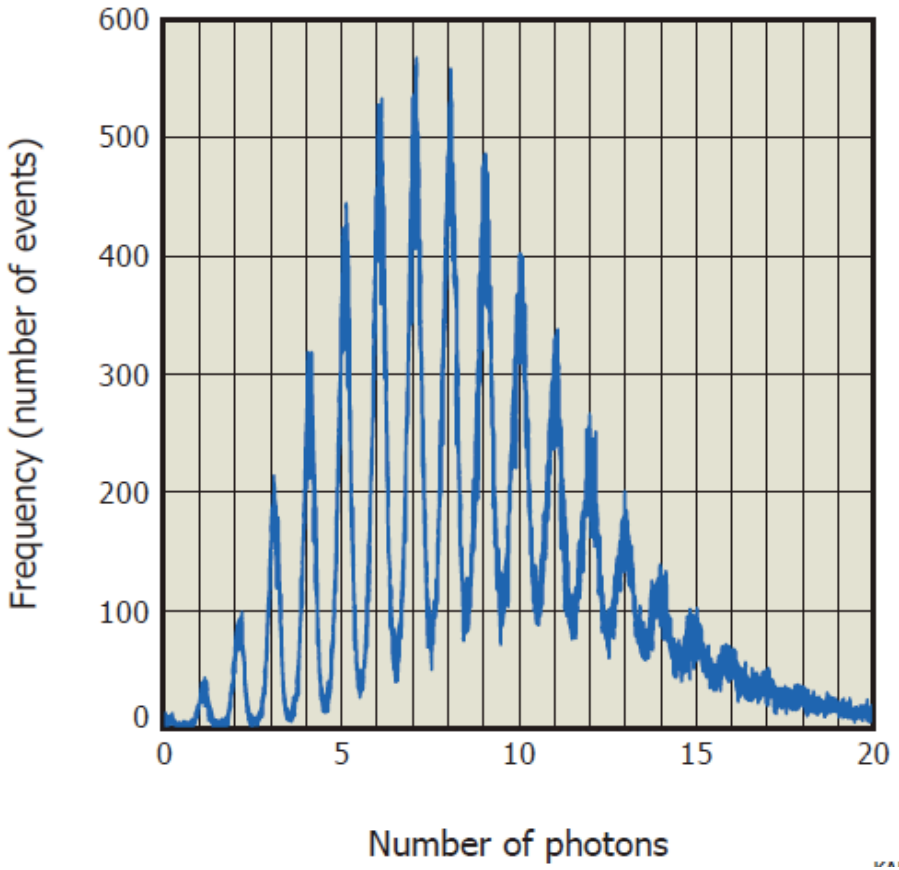


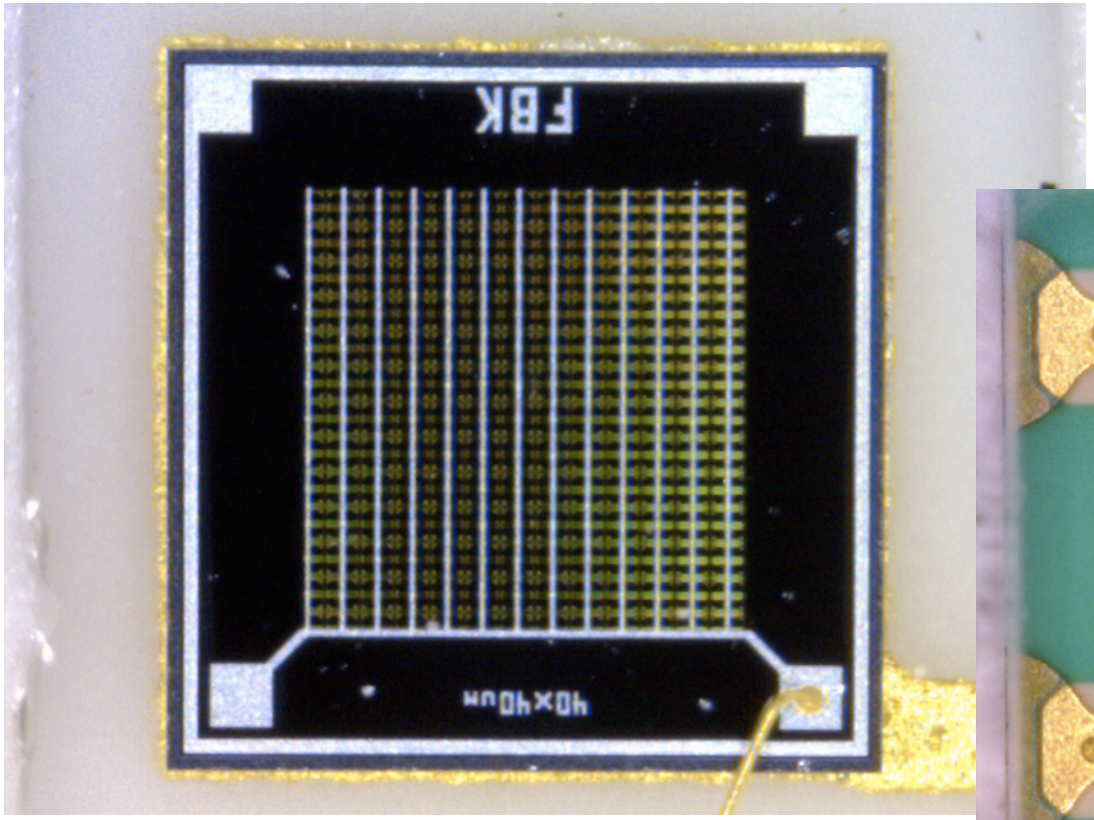
$V < V_{APD}$	=> fotodiodo	coppie raccolte/coppie generate = 1
$V_{APD} < V < V_{BD}$	=> APD	coppie raccolte/coppie generate = M
$V > V_{BD}$	=> Geiger-mode APD	collected pairs/generated pair = ind.

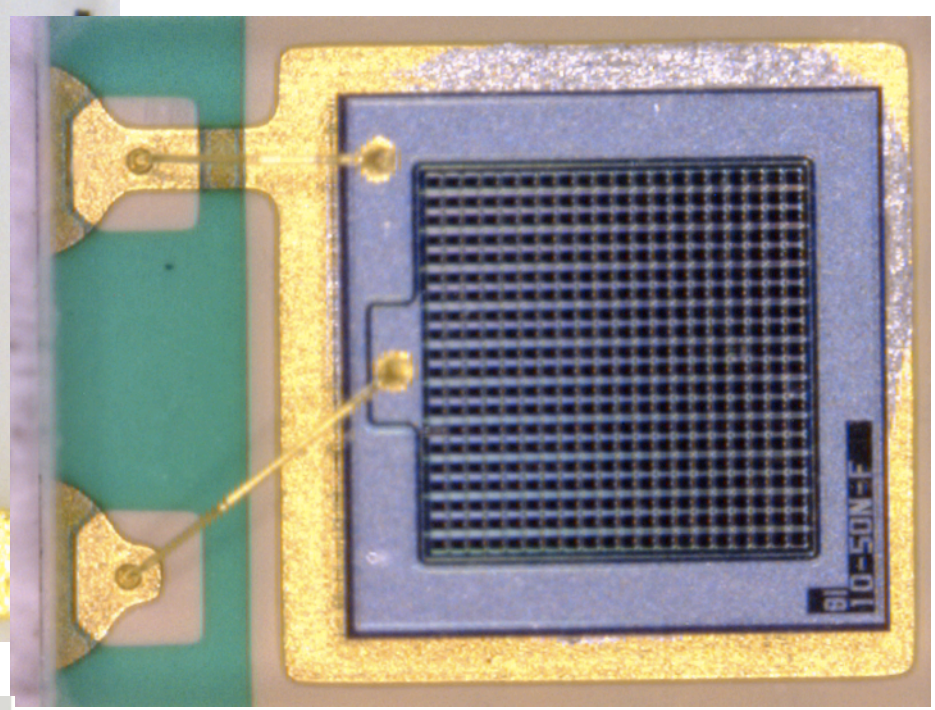
Segnale Oscilloscopio

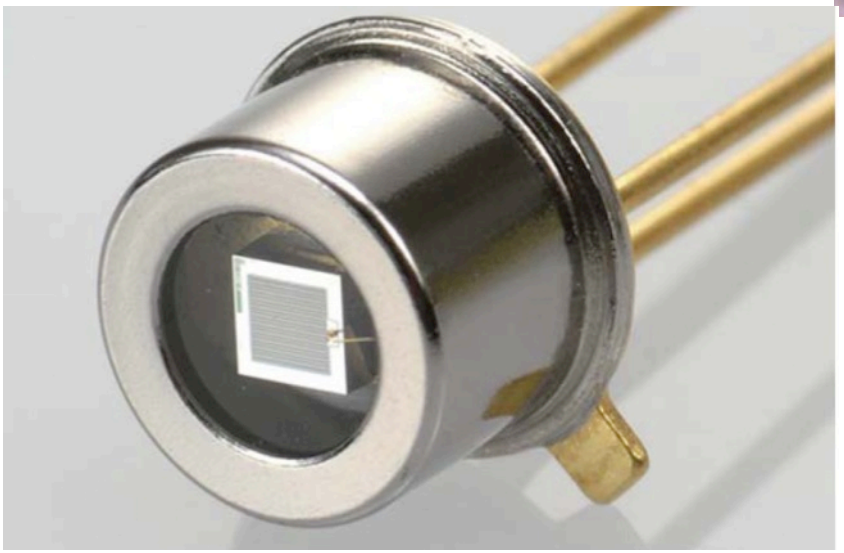


Segnale in carica

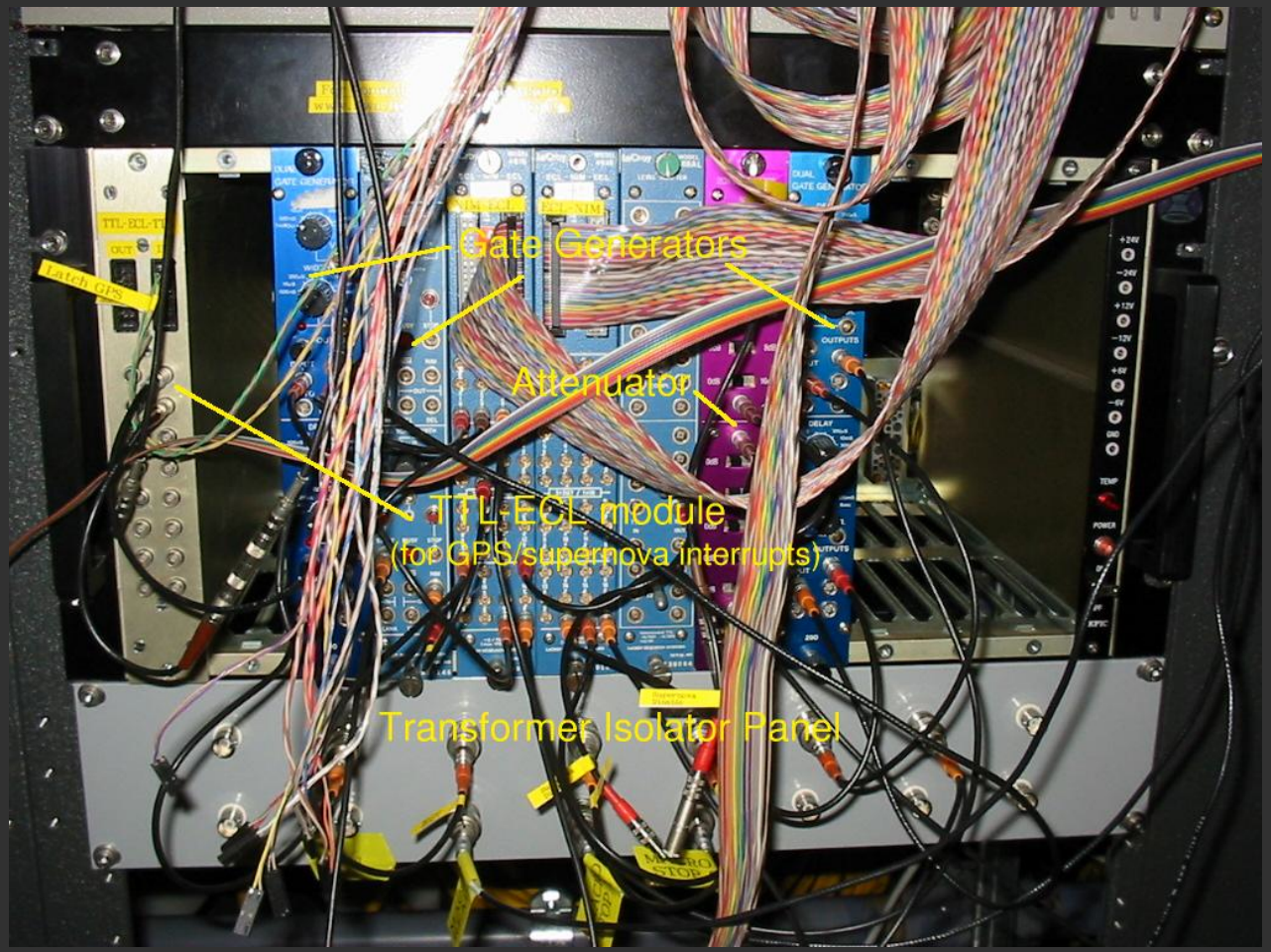



FBK
10×10μm


10-50N-F

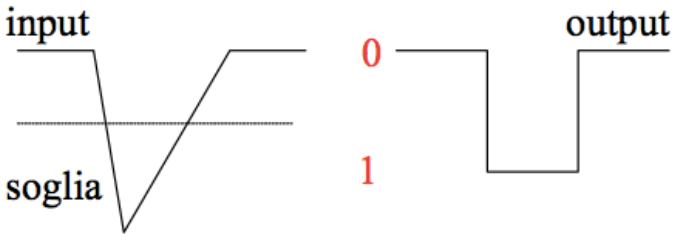


Gestione Segnali

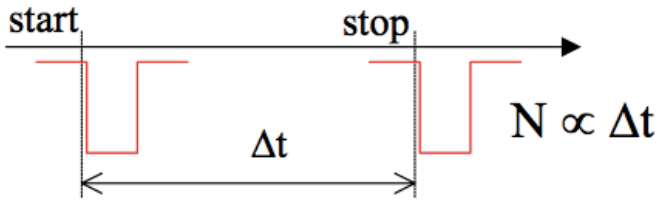


Strumentazione Utilizzata

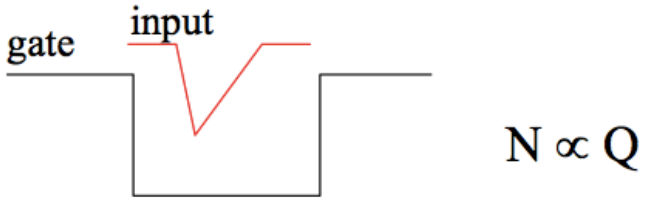
Discriminatori a soglia DISCR: circuiti che trasformano il segnale analogico proveniente dal fotomoltiplicatore in un segnale digitale (di valore 0 o 1), se il segnale in ingresso supera un certo valore minimo (detto soglia).



I **TDC** (Time to Digital Converter) forniscono un numero di conteggi N proporzionale al tempo di arrivo della particella (stop) .



Gli **ADC** (Analog to Digital Converter) forniscono un numero di conteggi N proporzionale alla carica elettrica totale Q del segnale del PM, a sua volta proporzionale all'energia persa dalla particella nelle fibre.



Gli **SCALER** contano il numero di segnali digitali in ingresso.

A scuola?

DOVE LA METTO LA LAVAGNA MULTIMEDIALE ?
SCUOLA
COURIERE
ROBERTO MANGOSI

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