

incont
ri di
fisica

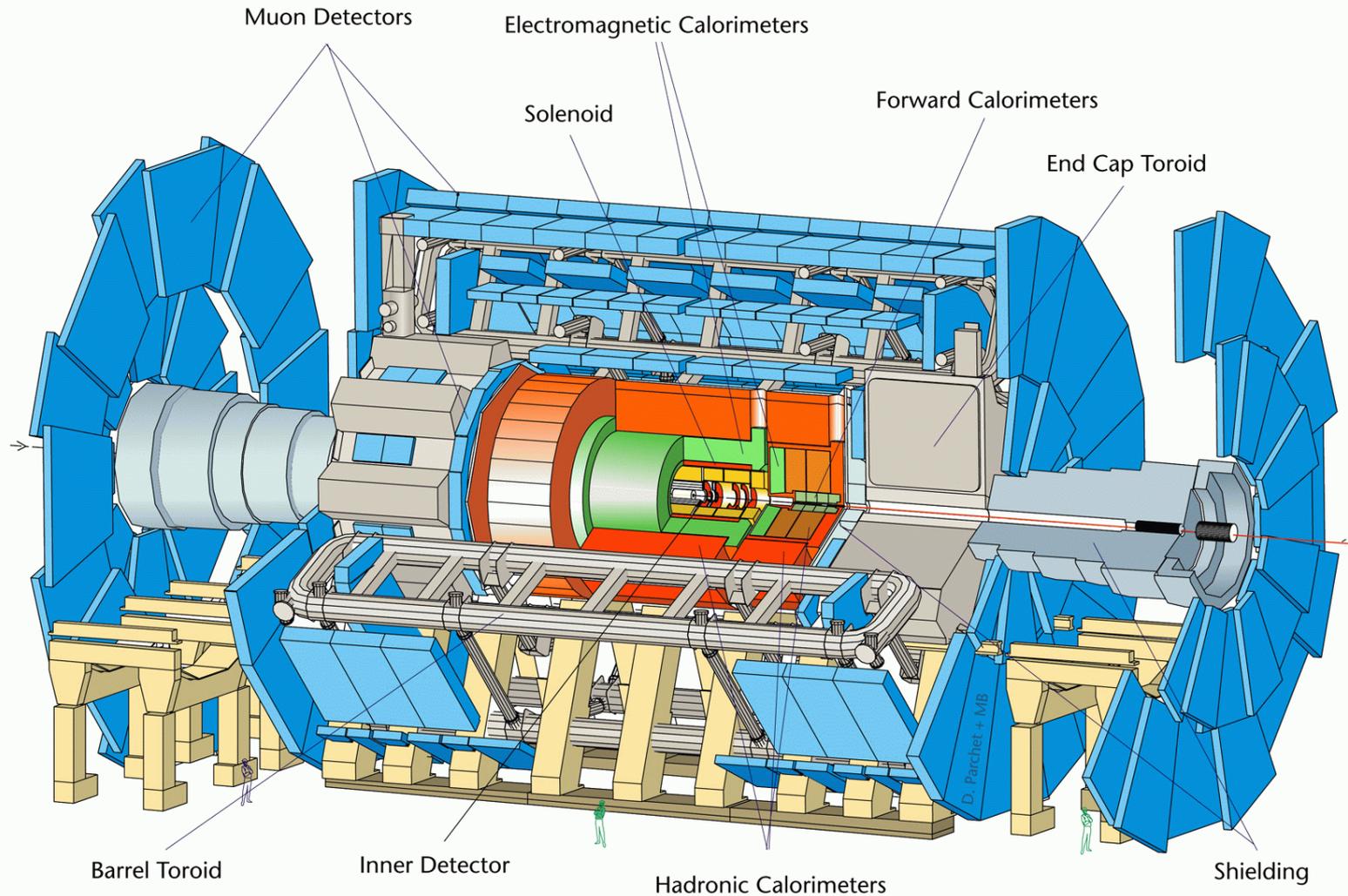


**Tecniche Innovative per la rivelazione
di particelle con materiali scintillanti,
fotomoltiplicatori, fotorivelatori al
silicio per la fisica delle alte energie**

Seminario Introduttivo

Rivelatore di particelle?

D712/mb-26/06/97

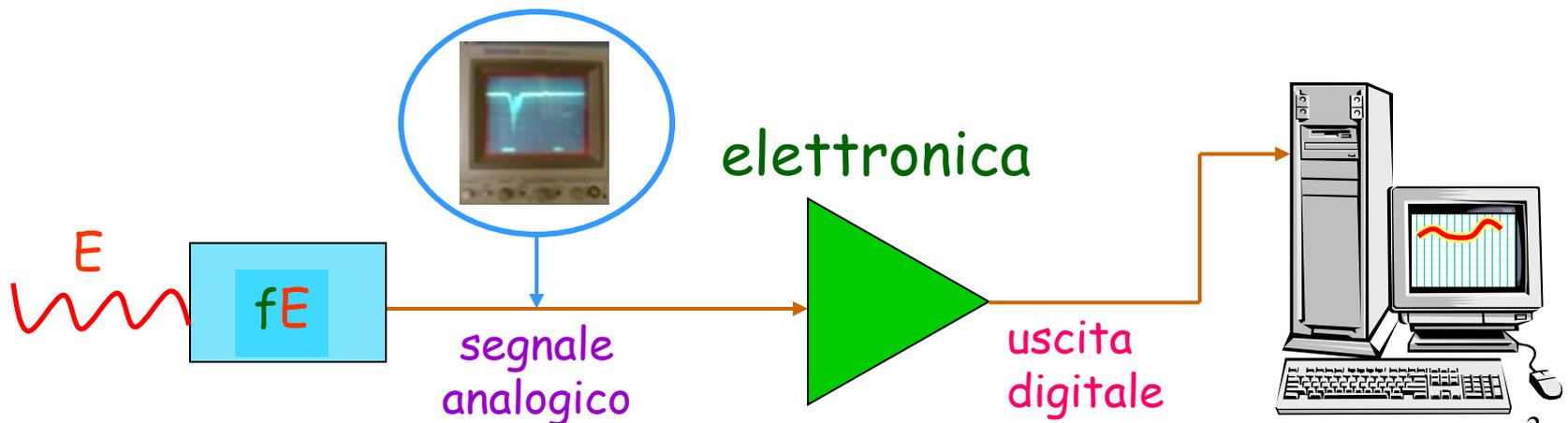


Logica di funzionamento

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**
- **Risposta**
- **Risoluzione Energetica**
- **Efficienza**

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 \rightarrow massa richiesta dipende dal tipo e dall'energia della radiazione da rivelare

Caratteristiche Generali

Risposta

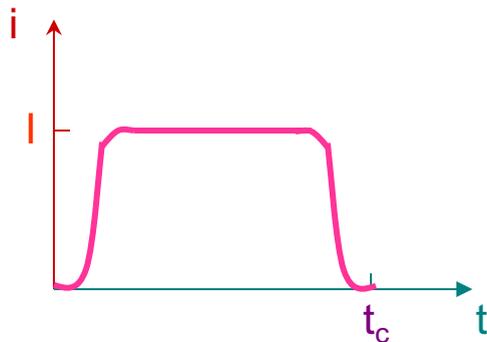
interazione di una particella nel rivelatore → rilascio (quasi istantaneo) di carica elettrica Q nel volume sensibile del rivelatore → raccolta tramite campo elettrico



t_c = tempo di risposta

1 ps ÷ 1 ns in funzione del tipo di rivelatore

risposta del rivelatore: impulso di corrente



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

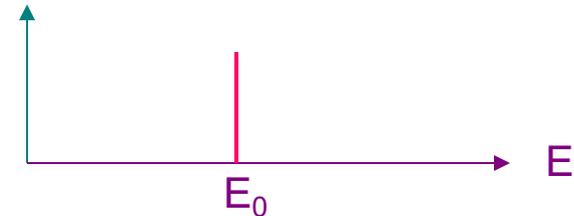
Caratteristiche Generali

Risoluzione Energetica

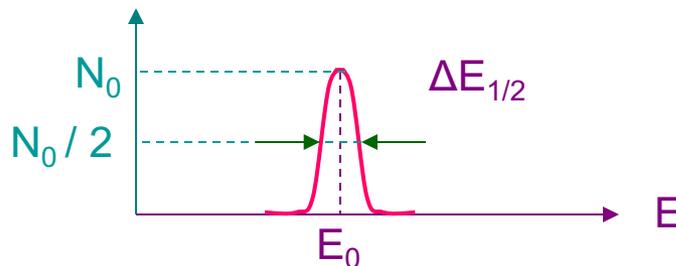
capacità del rivelatore di discriminare energie vicine

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

- Caso ideale: δ di Dirac



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



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

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



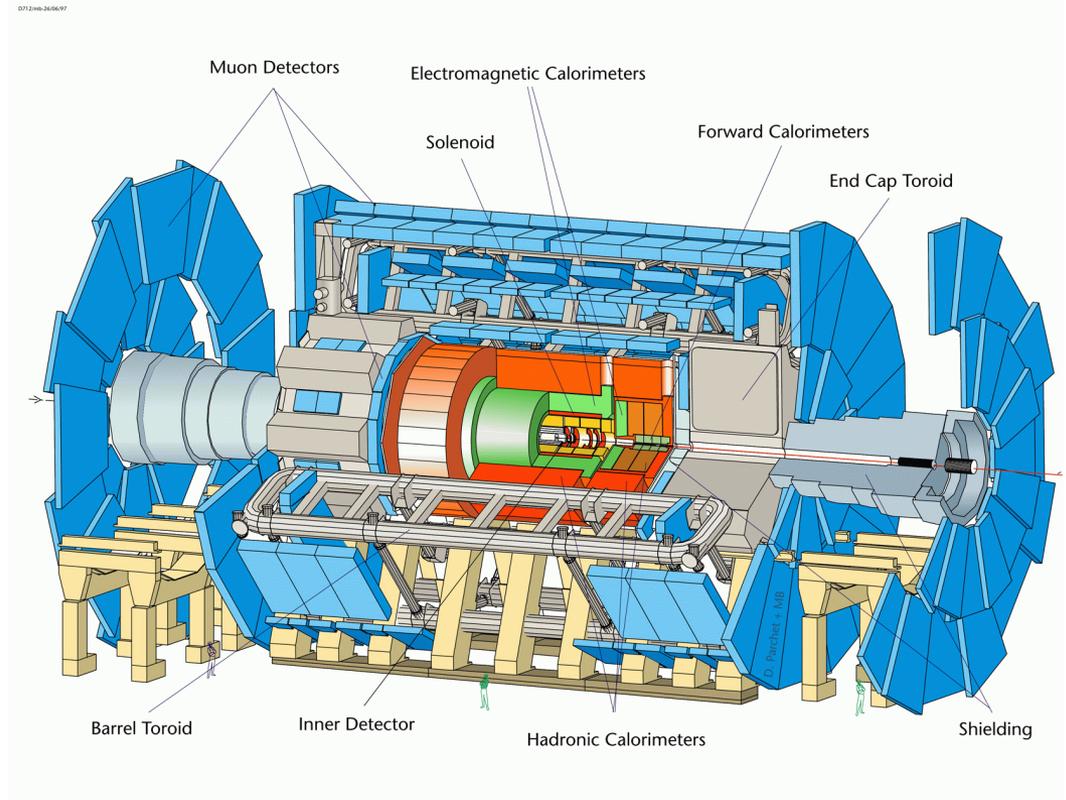
funzione solo **probabilità d'interazione nel rivelatore**, i.e. dipende da:

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

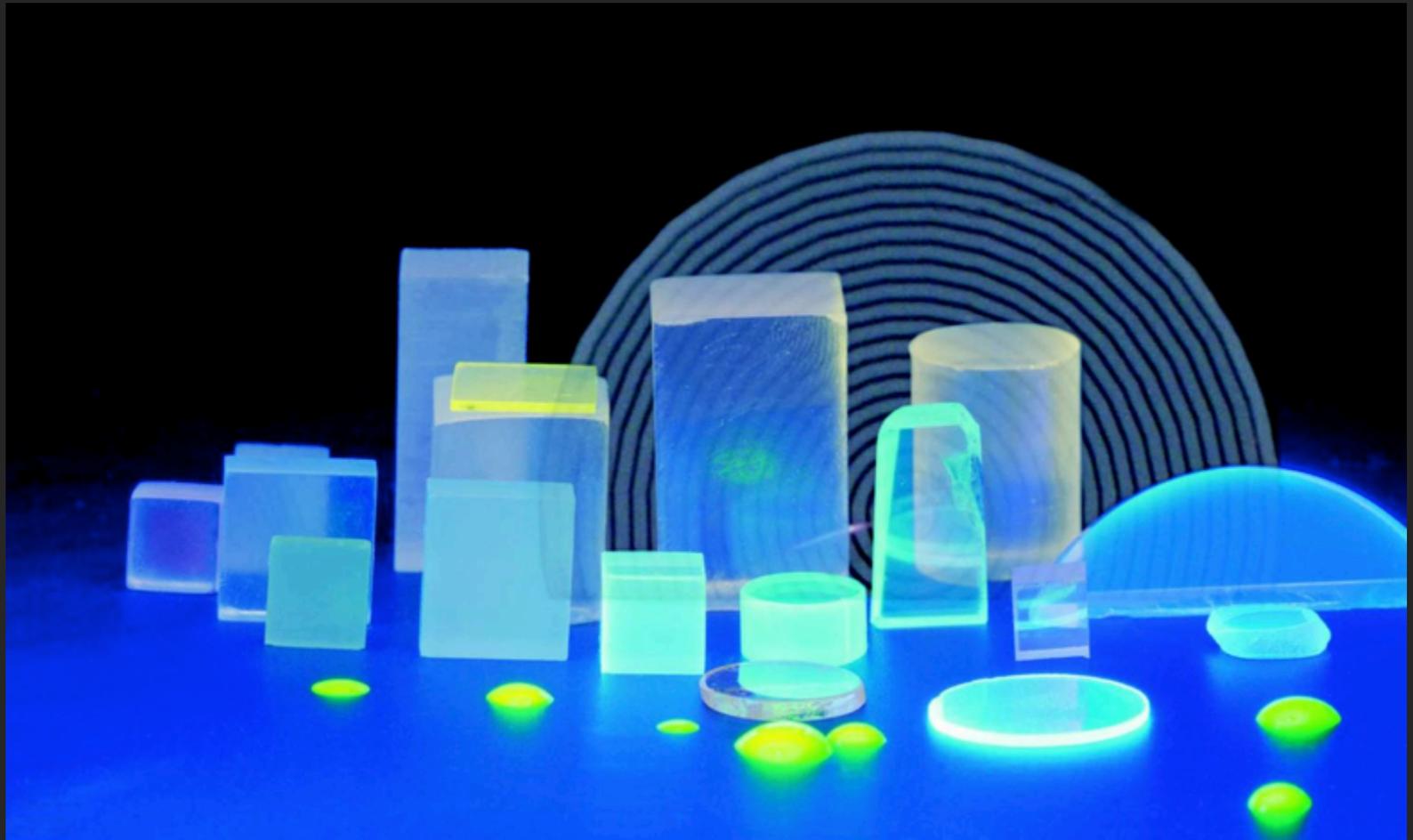
Rivelatore di particelle?

Ora capiamo perché:

- Si ha struttura a cipolla
- Diversi rivelatori compongono un esperimento di Fisica delle Alte Energie
- I rivelatori occupano posizioni diverse



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

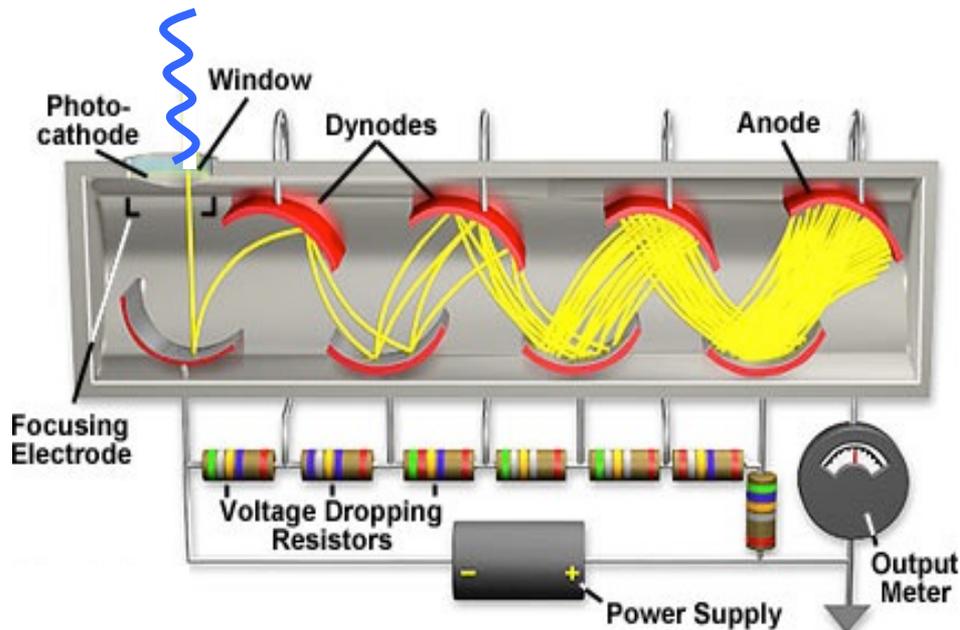
Come detto all'inizio:

Principio di funzionamento generale di un rivelatore

particella di energia E → trasferimento di energia al rivelatore →
conversione in forma d'energia accessibile

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)**

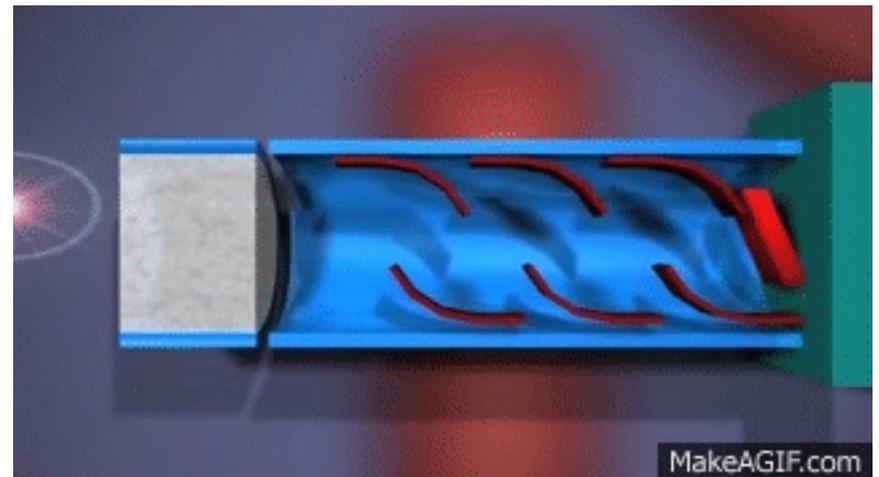
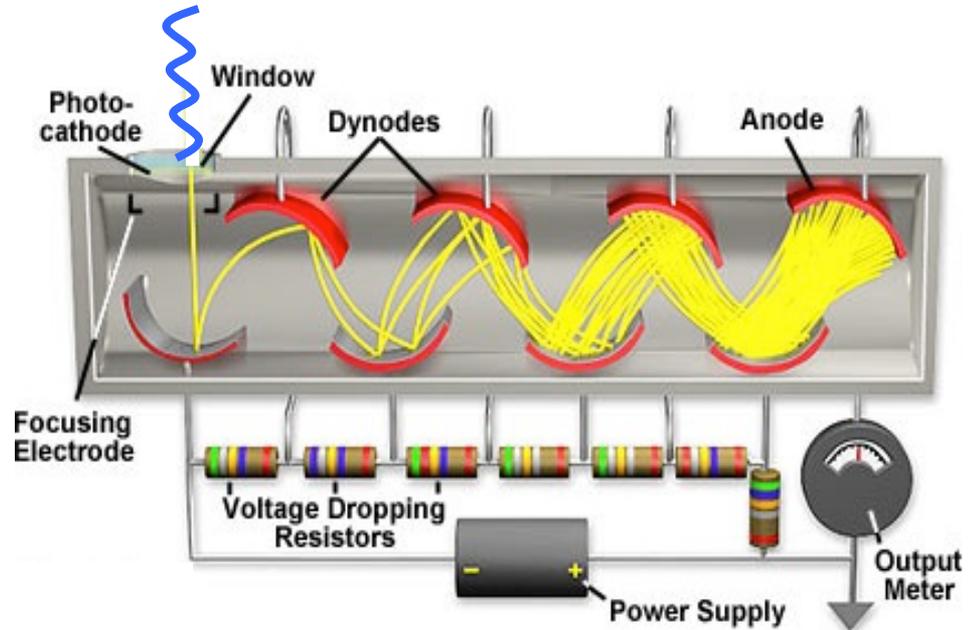


tragitto **catodo – anodo**
richiede circa **40 ns**

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

Fotomoltiplicatore

- Fotone visibile colpisce **catodo**
- emissione, per effetto fotoelettrico, di e^- che, causa la tensione applicata, è **accelerato** ed indirizzato verso il 1^o dinodo
- emissione di e^- **secondari** che sono **accelerati** ed indirizzati verso dinodo successivo
- formazione di **cascata di e^-** attraverso i dinodi
- raccolta della cascata all' anodo



Fotomoltiplicatore

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

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

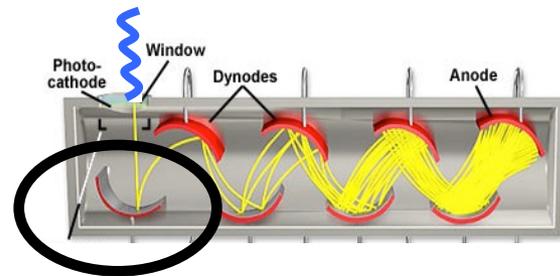
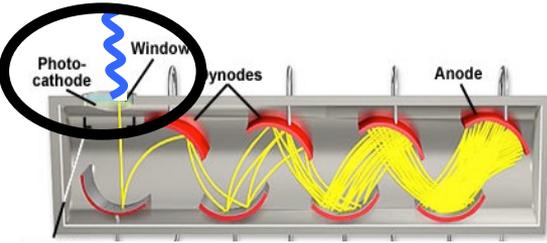
← n. fotoelettroni emessi

← n. fotoni incidenti

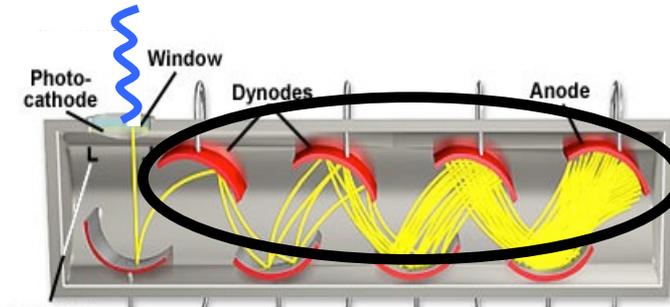
Materiale più usato: Sb-Rb-Cs → $\lambda_M = 420$ nm; $\eta(\lambda_M) \cong 20\%$

- 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



- 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

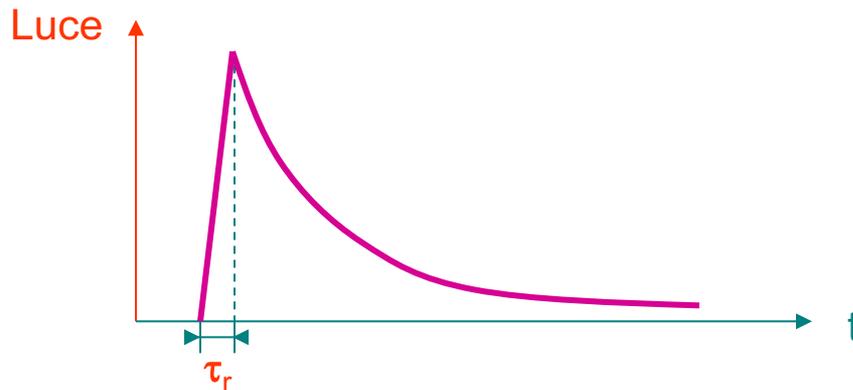
b) Risposta veloce

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

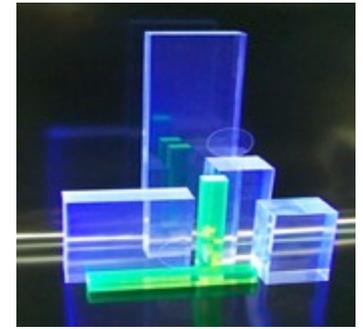
Materiali che esibiscono la proprietà della **luminescenza**:
quando esposti a certe forme d'energia (radiazione, **calore**, ...) **assorbono e riemettono energia in forma di luce visibile**

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

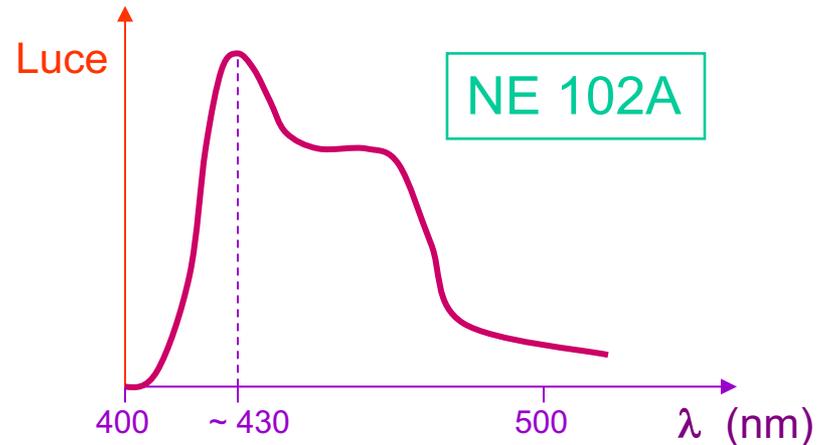
Particolarmente usati sono i **plastici**:

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

Inoltre:

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

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

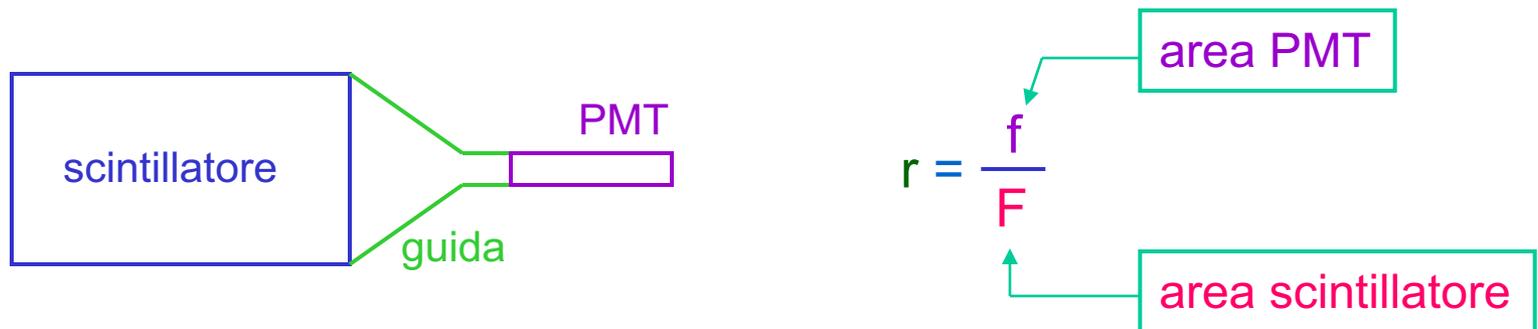


Svantaggi: facilmente attaccati da solventi organici (**acetone**)

Guida di Luce

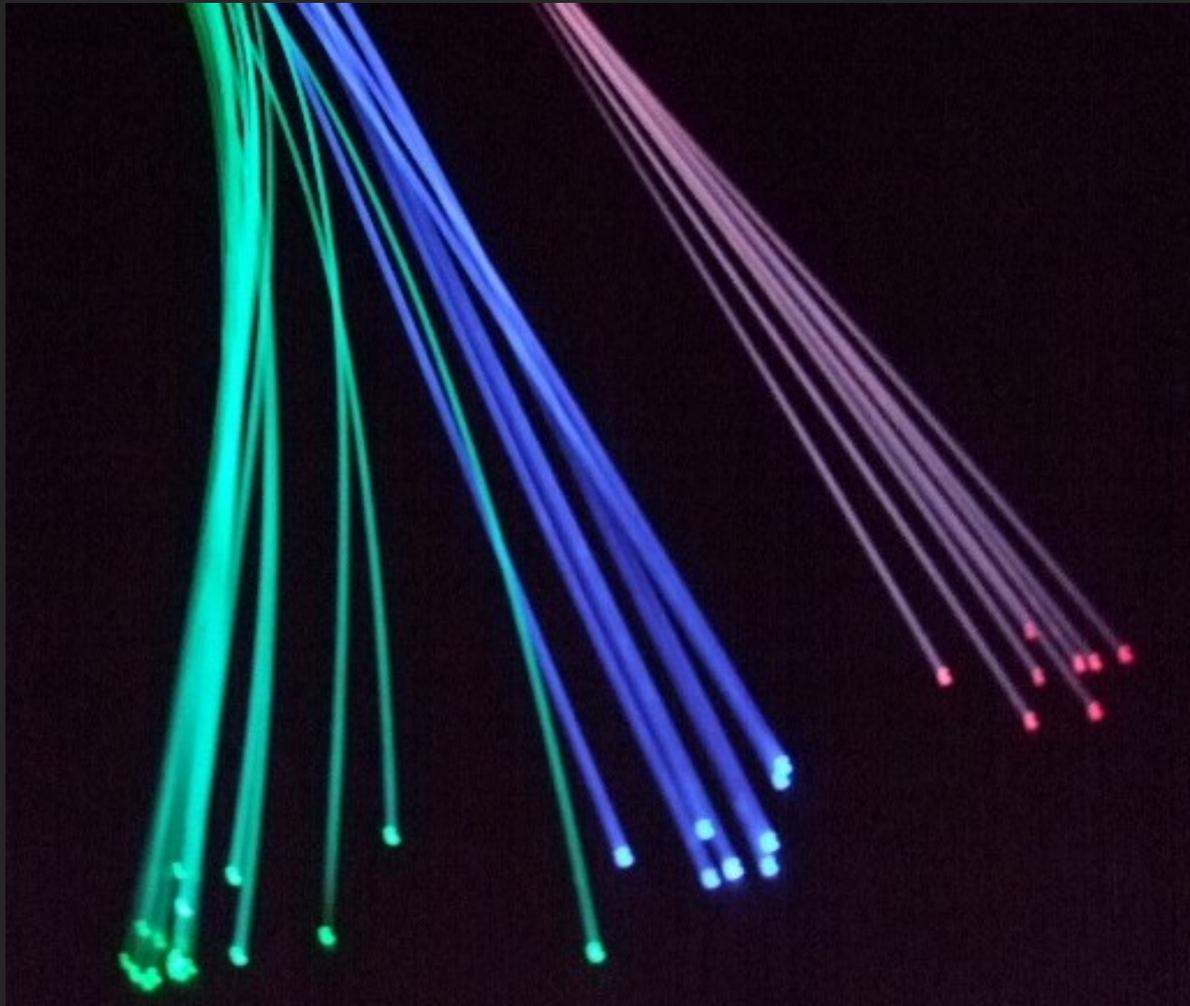
Sistema di trasporto della luce di scintillazione verso il PMT

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

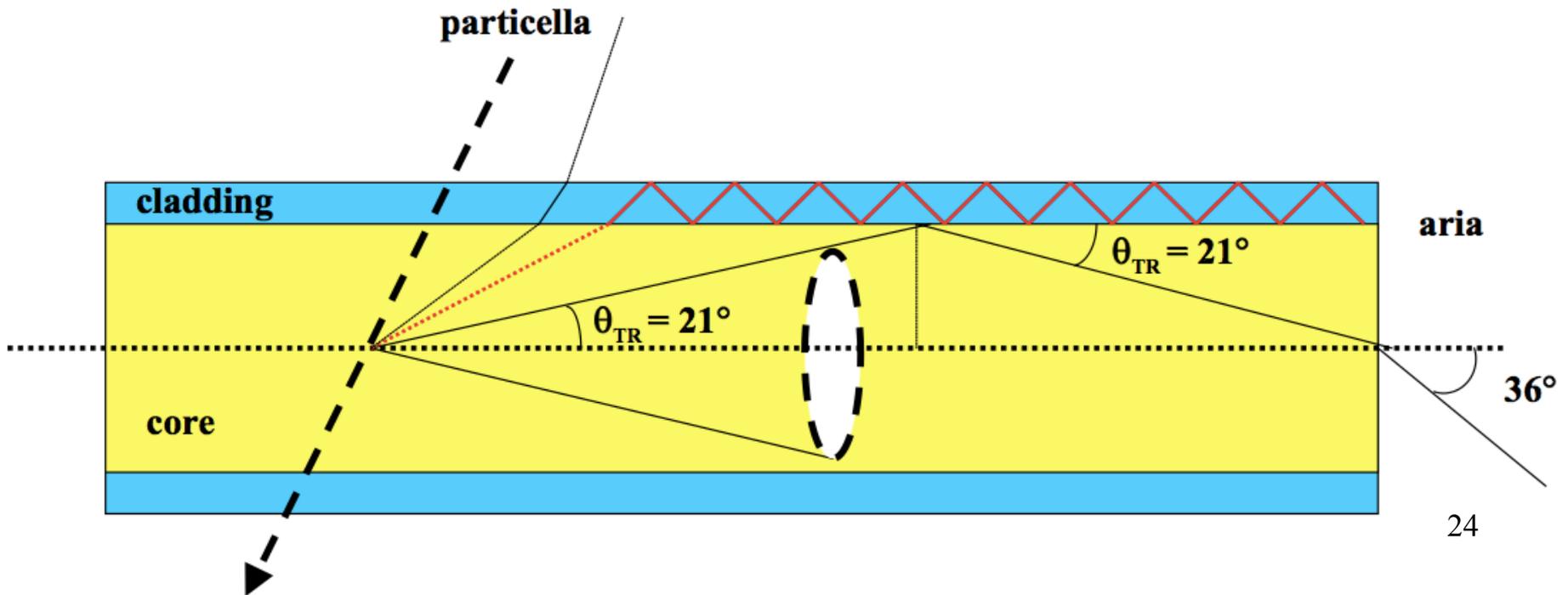
Fibre Scintillanti



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.

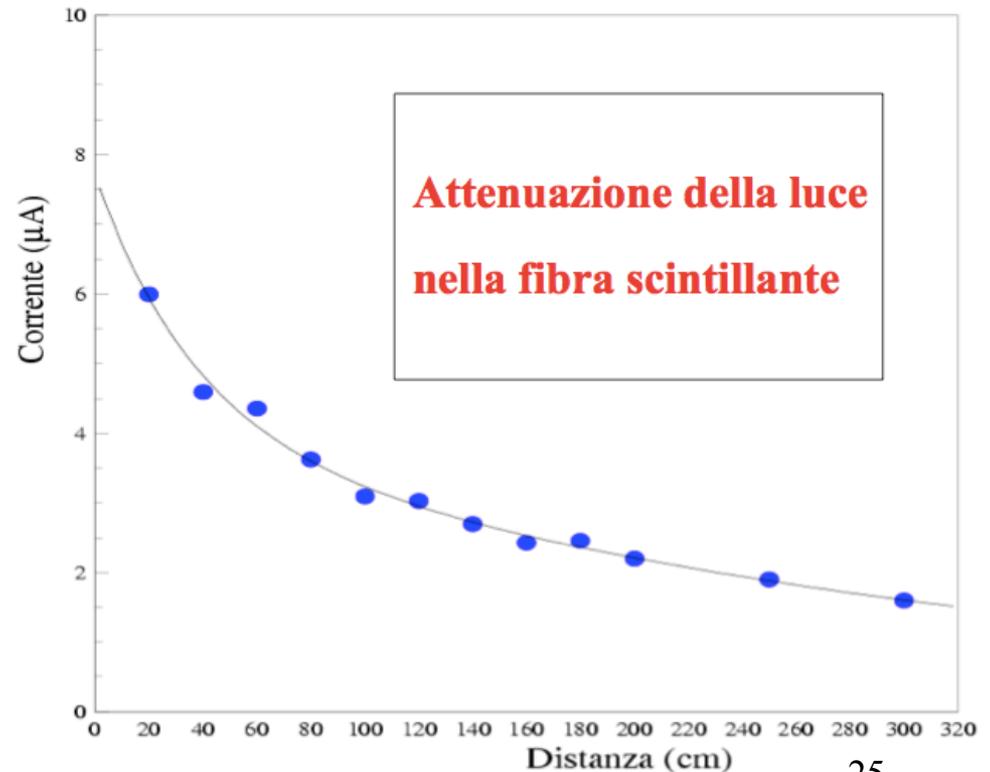
$I(x) = I(0) e^{-x/\lambda}$ dove:

x = distanza percorsa dalla luce

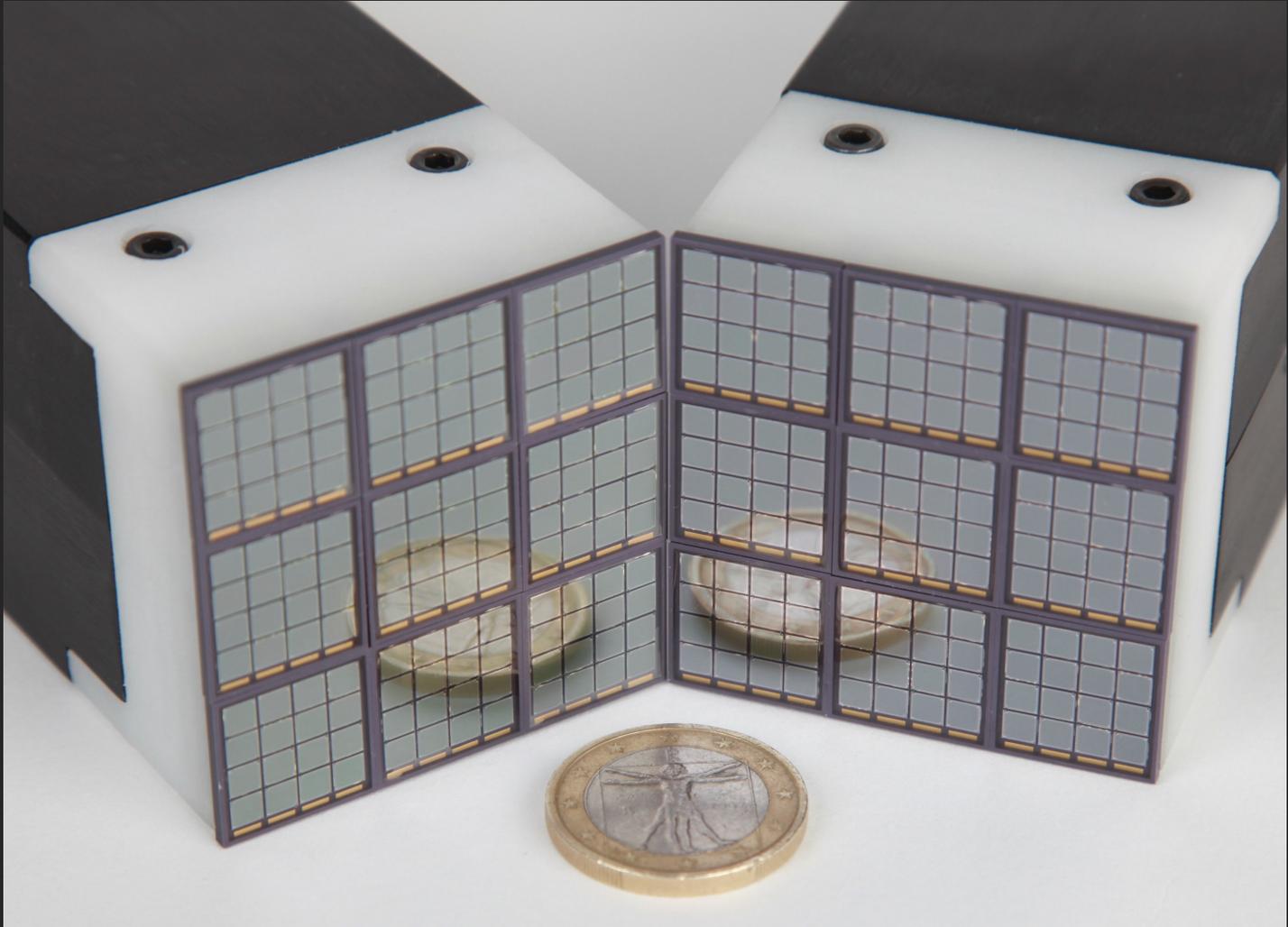
λ = lunghezza di attenuazione

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

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



Silicon Photomultiplier



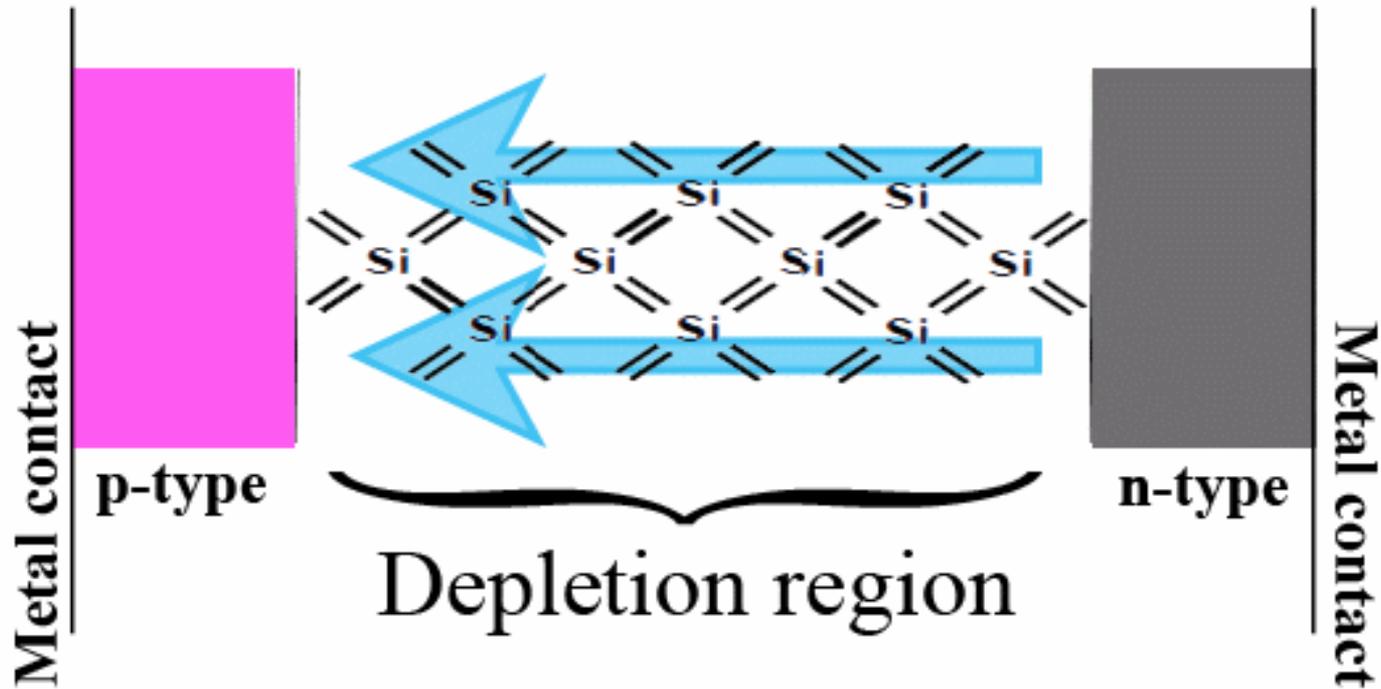
SiPM

Perché lasciare i vecchi PMT e passare al silicio?

Perché cerchiamo un rivelatore che soddisfi queste caratteristiche:

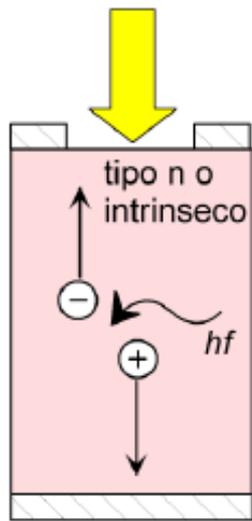
- Alta efficienza quantica
- Alto guadagno
- Alta efficienza a bassi livelli di luce
- Conteggio di fotoni
- Alta linearita'
- Ottima risoluzione temporale
- Basso consumo (senza divisore di tensione)
- Robusto, stabile, compatto
- Insensibile a campi magnetici
- Basso costo

Effetto Fotovoltaico: il fotodiode

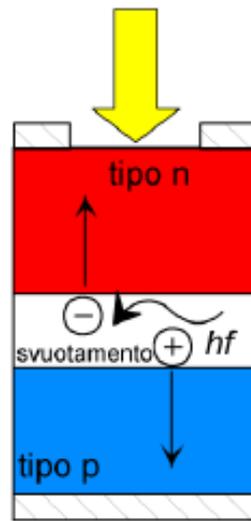


La ricerca di **nuovi**
fotorivelatori porta
 inevitabilmente ai
 dispositivi al **silicio**

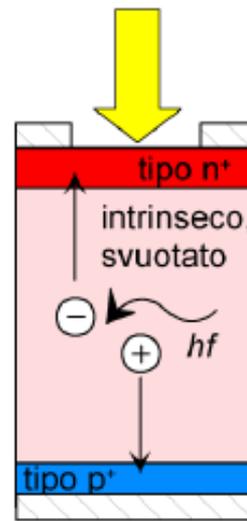
Giunzioni p-n



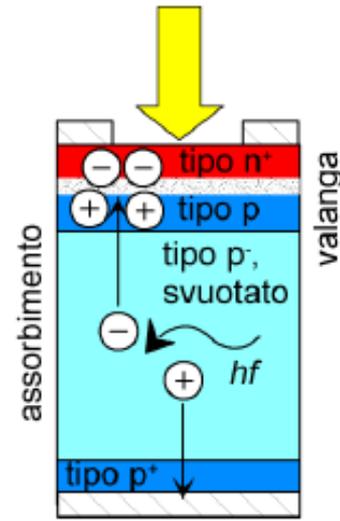
Fotoconduttore



Fotodiodo *pn*



Fotodiodo *pin*



Fotodiodo a valanga



= gas

G=1

APD
G=50-100

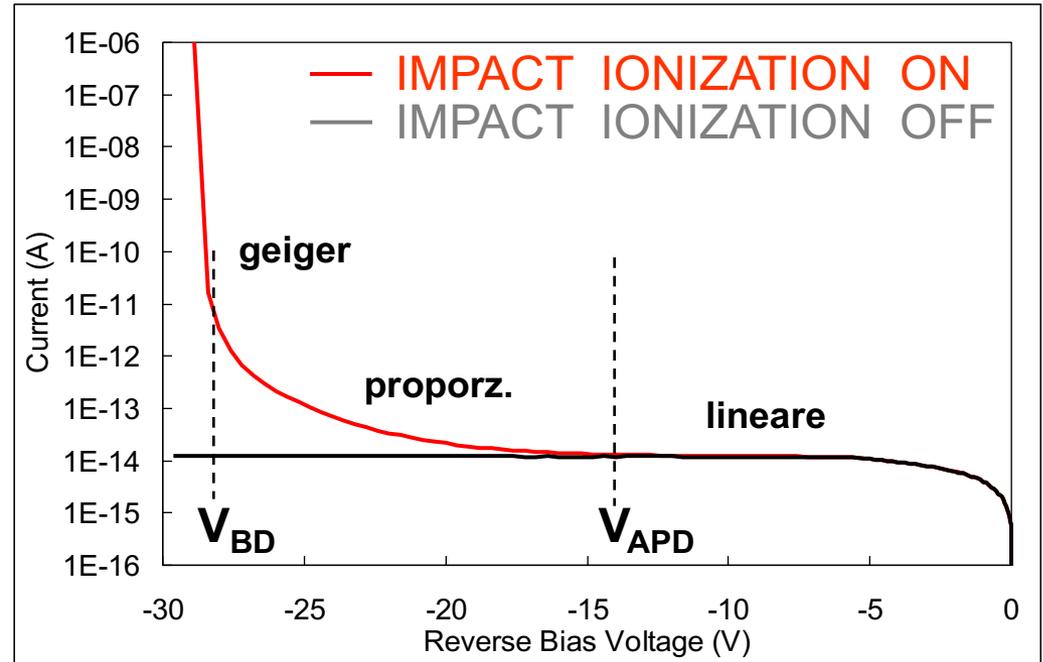
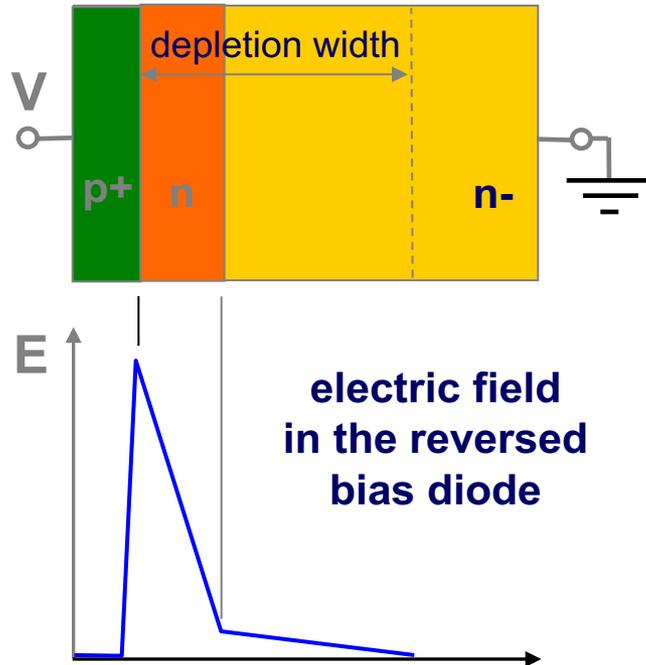
Camere a ionizzazione

camere proporzionali

tubi a streamer/RPC

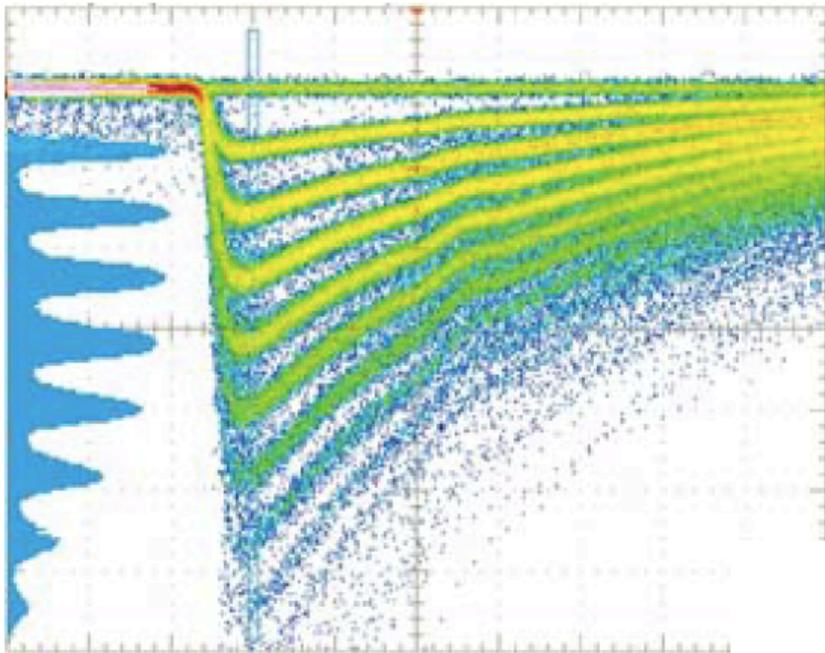
Regime Geiger Limitato in Si

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.

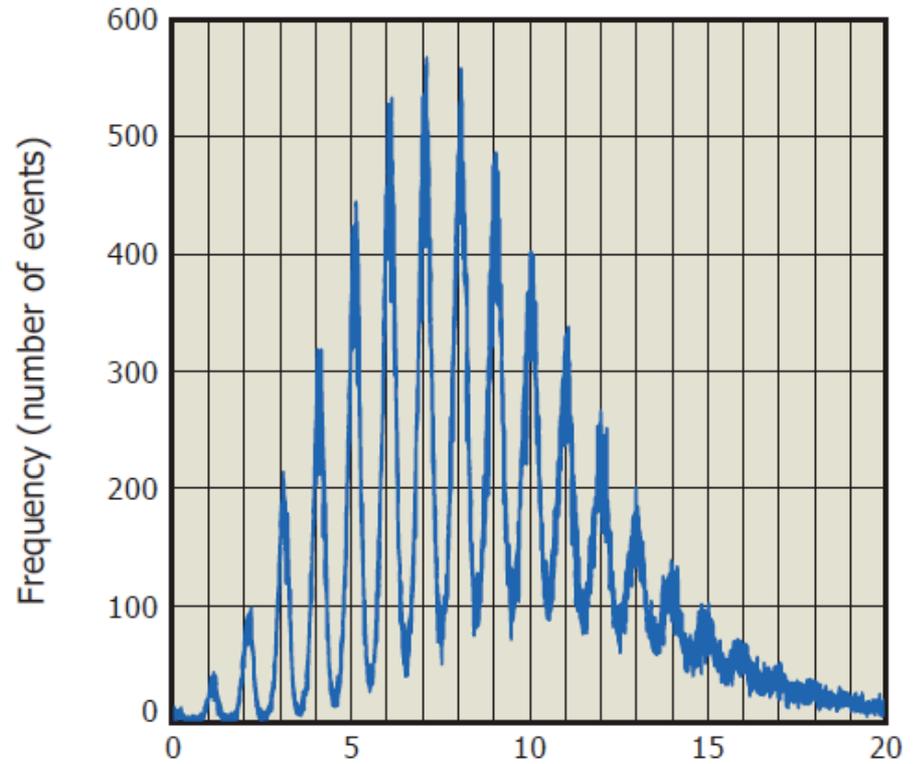


Number of photons

Time

Segnale in carica

Segnale Oscilloscopio



Frequency (number of events)

Number of photons

