

**Discover Cosmic Particles**

«Vedere» i raggi cosmici

# **INTERNATIONAL COSMIC DAY**

**November 26 | 2024**



# I raggi cosmici

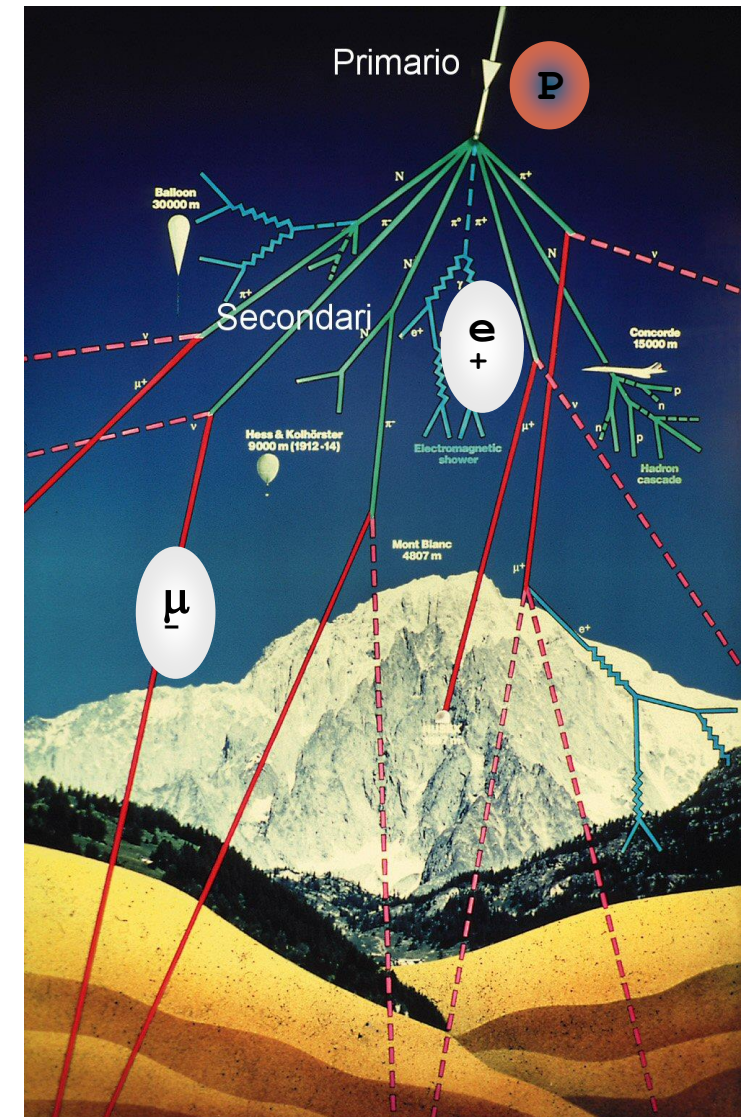
Una **pioggia invisibile** di circa 100 particelle elementari per  $\text{m}^2$  al secondo raggiunge continuamente la superficie terrestre

Paragonabile al numero di gocce d'acqua che cadono a terra durante una pioggia moderata (4-5 mm/h)

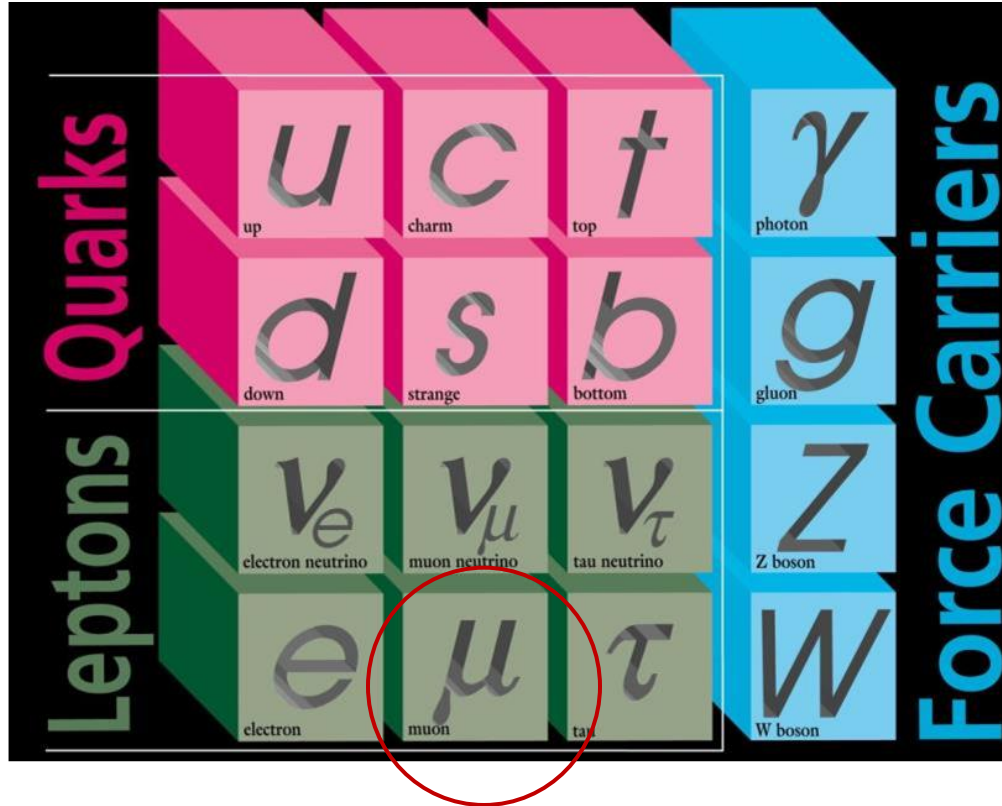
Del totale circa 1 particella al  $\text{cm}^2$  al minuto è costituito da radiazione **ionizzante**

Il raggio cosmico primario interagisce con l'atmosfera terrestre generando uno sciame di particelle che si propaga fino a terra.

Tra queste, i muoni  $\mu$  sono la componente di maggior abbondanza negli sciami generati da nuclei.



# Muoni???



4 Forze fondamentali:

- Forte
- Debole
- Elettromagnetica
- Gravitazionale

Dove sono il protone e il neutrone?

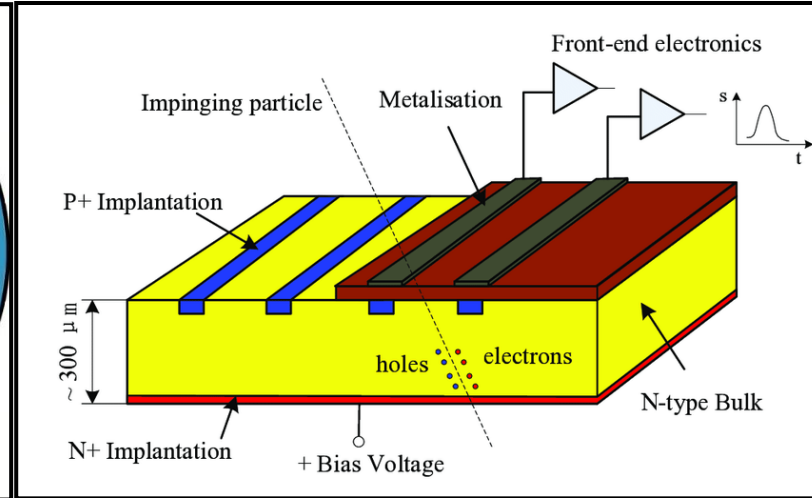
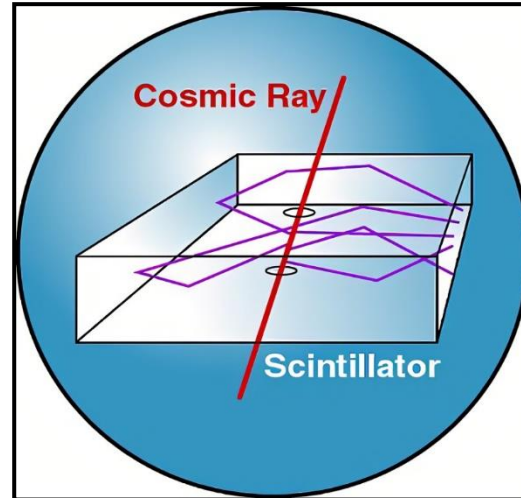
I muoni sono particelle con una vita media di  $\sim 2.2 \mu\text{s}$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$

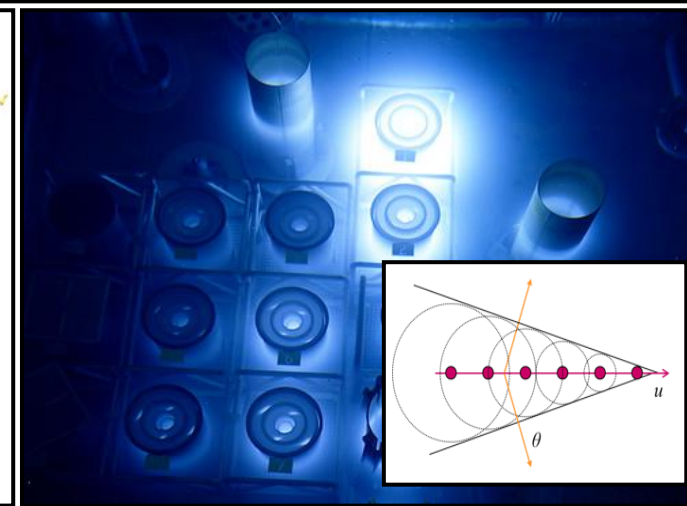
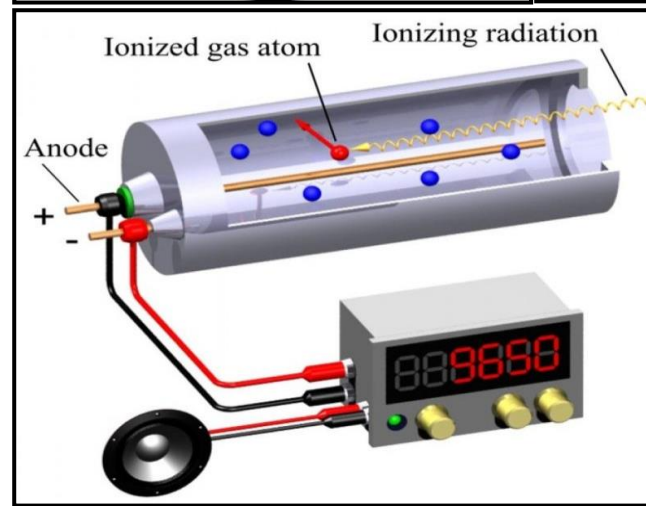
# Alcune tecniche di rivelazione

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



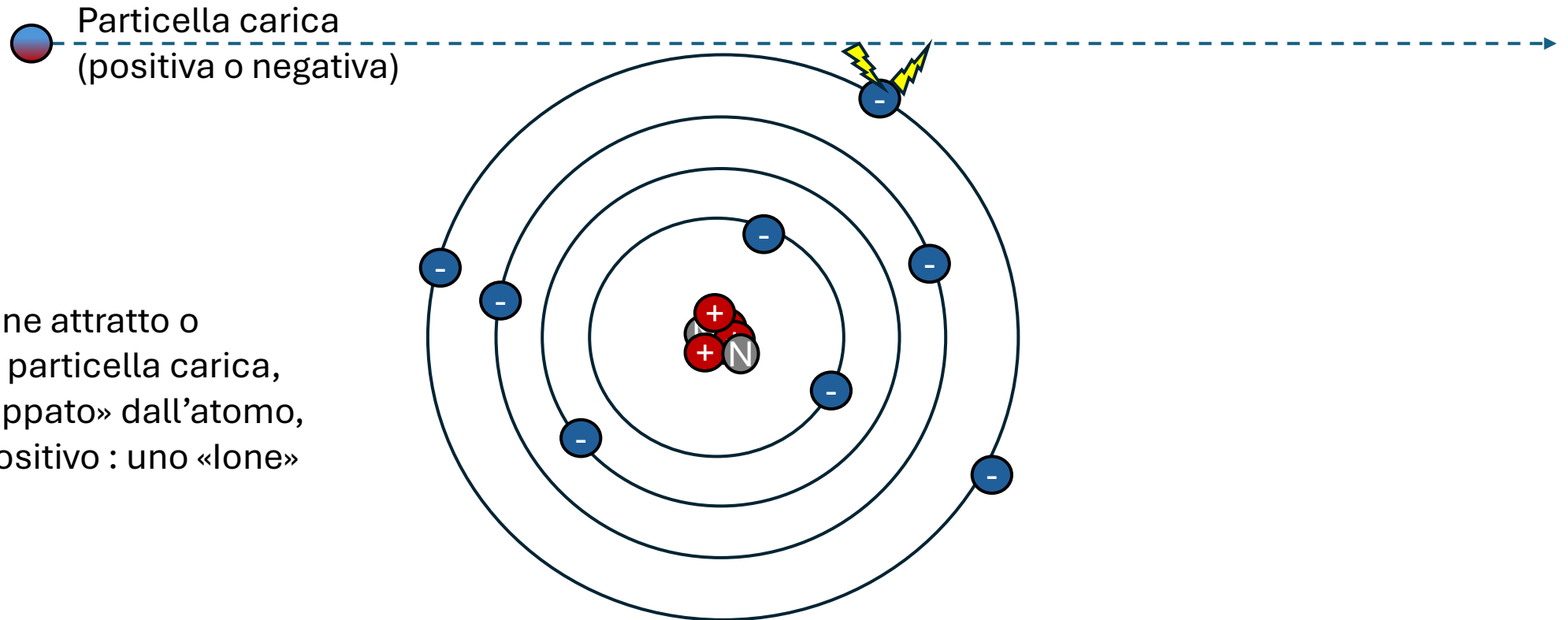
**PRODUZIONE DI COPPIE ELETTRONI-LACUNE IN MATERIALI SEMICONDUCTORI** (come il silicio con cui si realizzano i transistor)

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



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

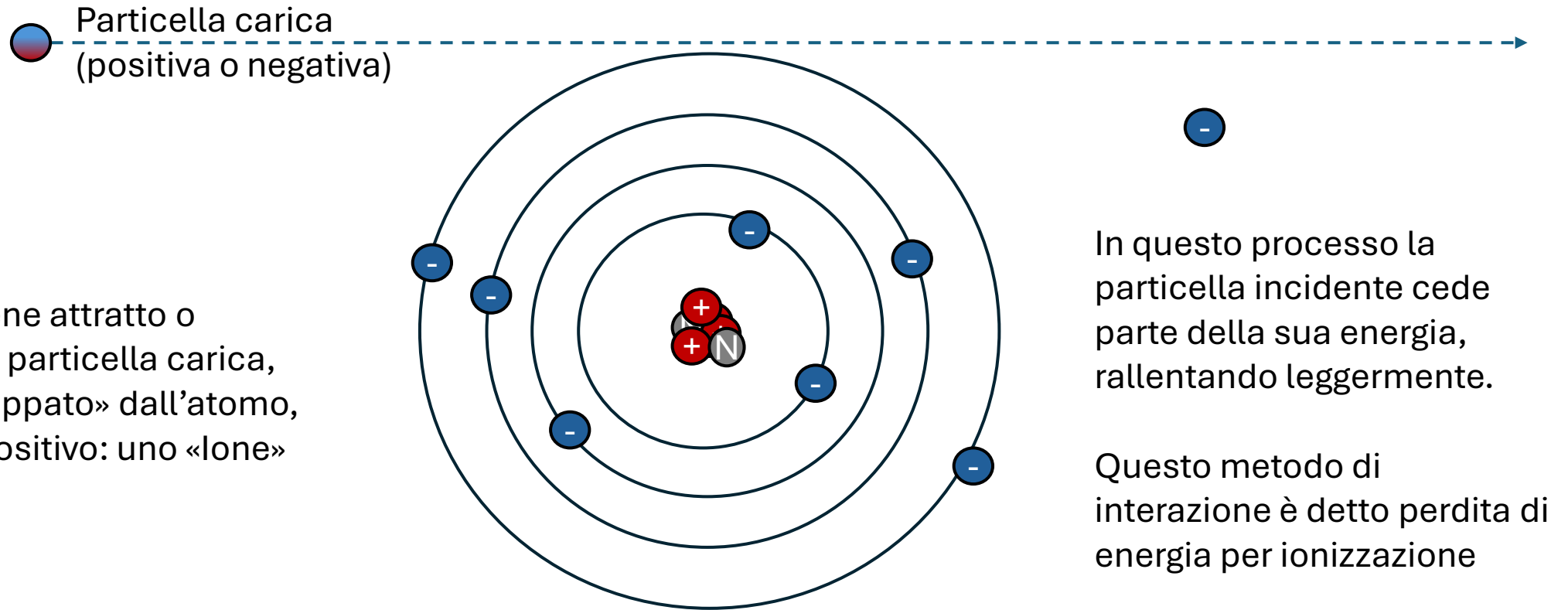
# Ionizzazione



L'elettrone viene attratto o respinto dalla particella carica, venendo «strappato» dall'atomo, che diventa positivo : uno «lone»

Il nucleo, contenente protoni e neutroni, è estremamente compatto, molto più che in figura. La probabilità che la particella interagisca con esso è molto bassa

# Ionizzazione

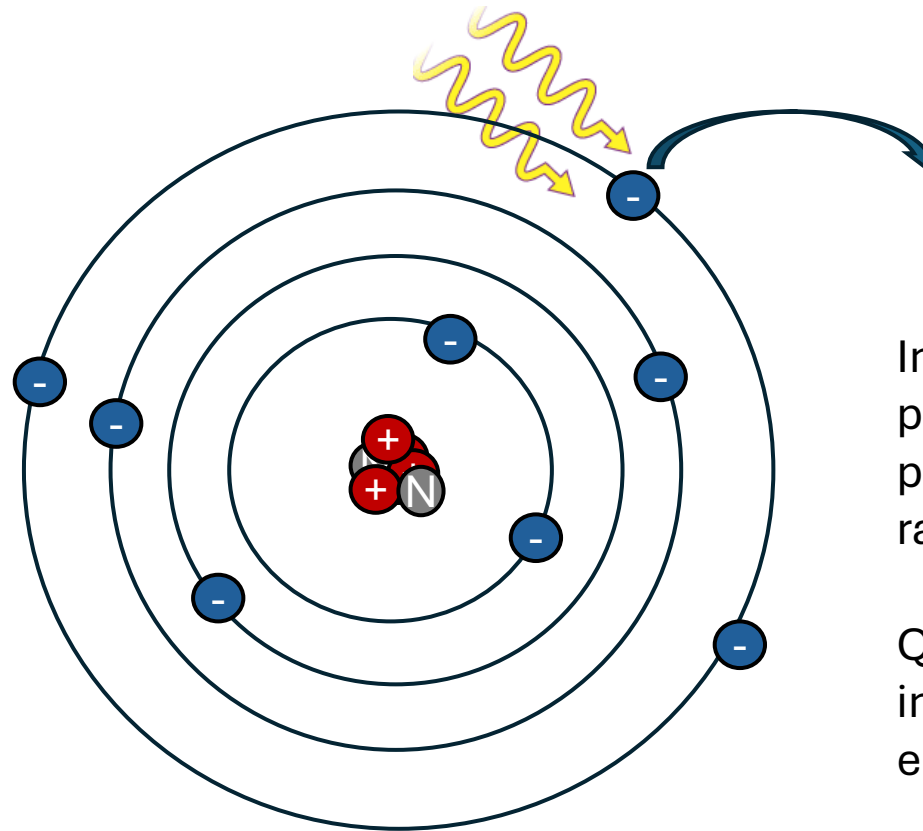


Il nucleo, contenente protoni e neutroni, è estremamente compatto, molto più che in figura. La probabilità che la particella interagisca con esso è molto bassa

# Ionizzazione

---

Anche la luce può ionizzare!



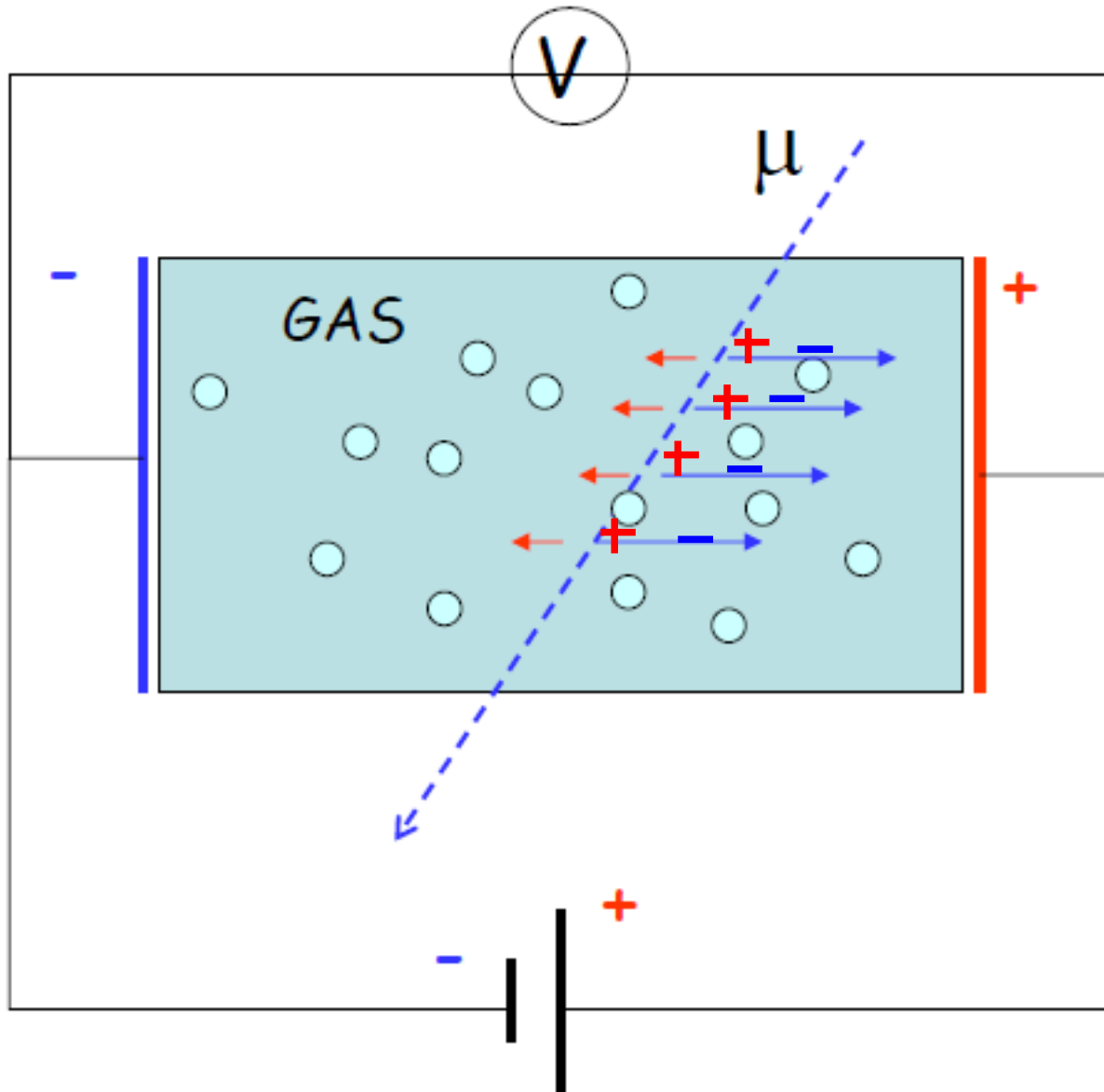
L'elettrone viene attratto o respinto dalla particella carica, venendo «strappato» dall'atomo, che diventa positivo: uno «lone»

In questo processo la particella incidente cede parte della sua energia, rallentando leggermente.

Questo metodo di interazione è detto perdita di energia per ionizzazione

Il nucleo, contenente protoni e neutroni, è estremamente compatto, molto più che in figura. La probabilità che la particella interagisca con esso è molto bassa

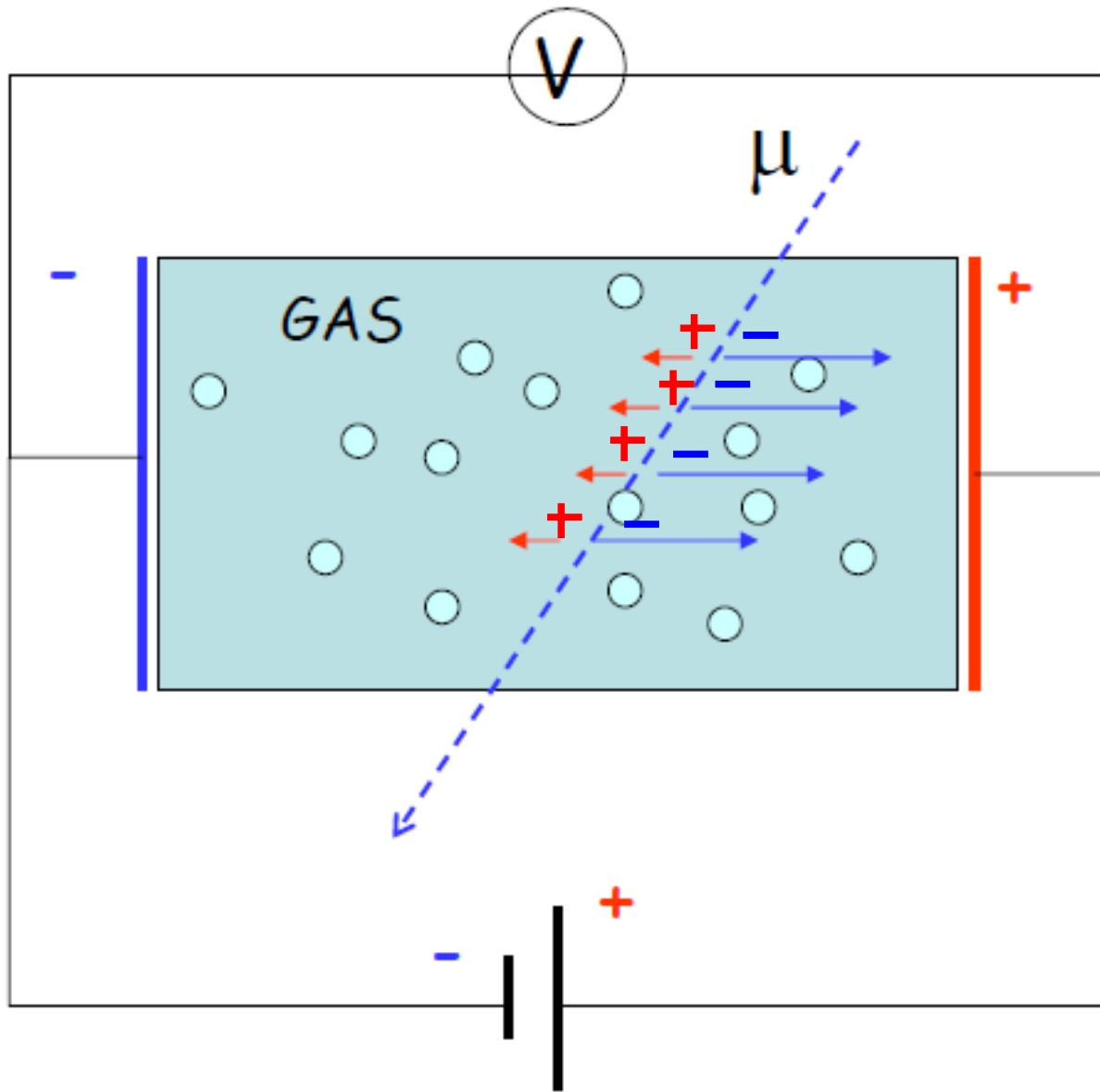
# Gas detector



1. Una particella carica che attraversa un gas perde una parte della sua energia **ionizzandolo** (un elettrone dell'atomo viene 'estratto').

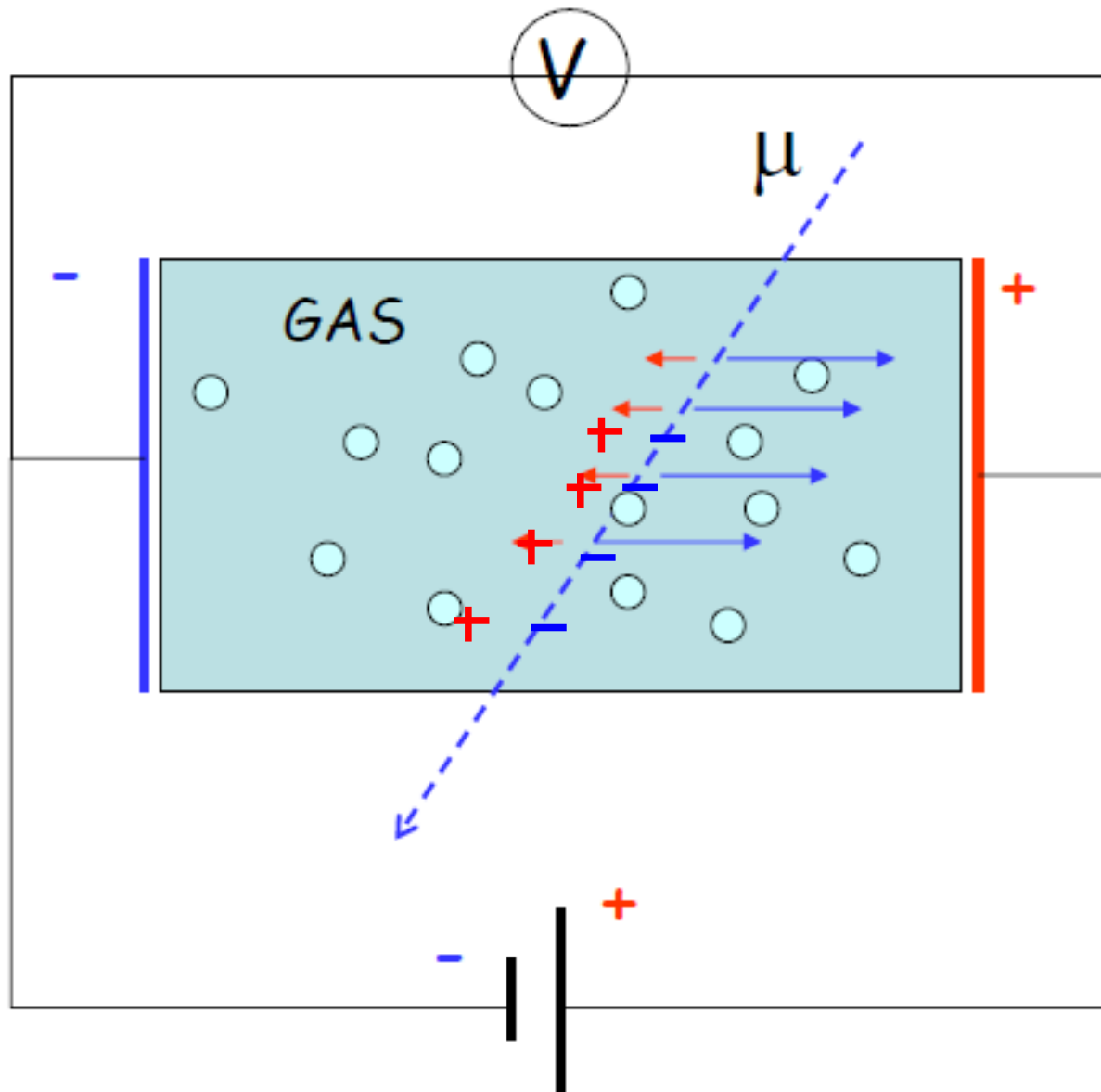
La traiettoria della particella rimane pressoché invariata





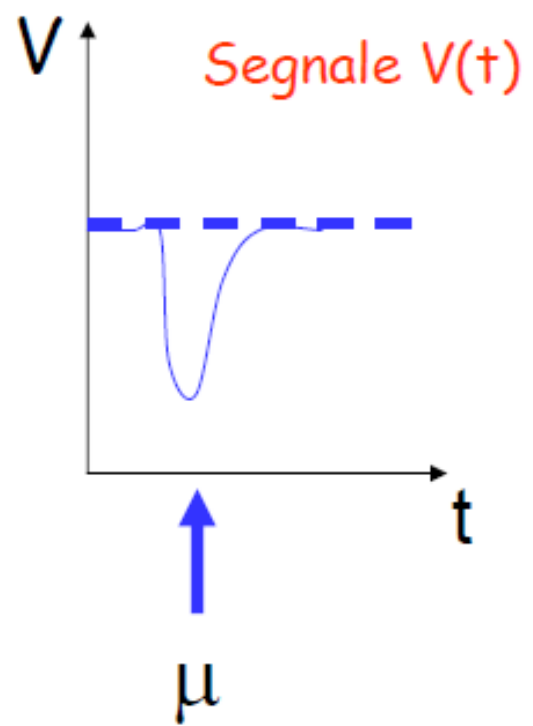
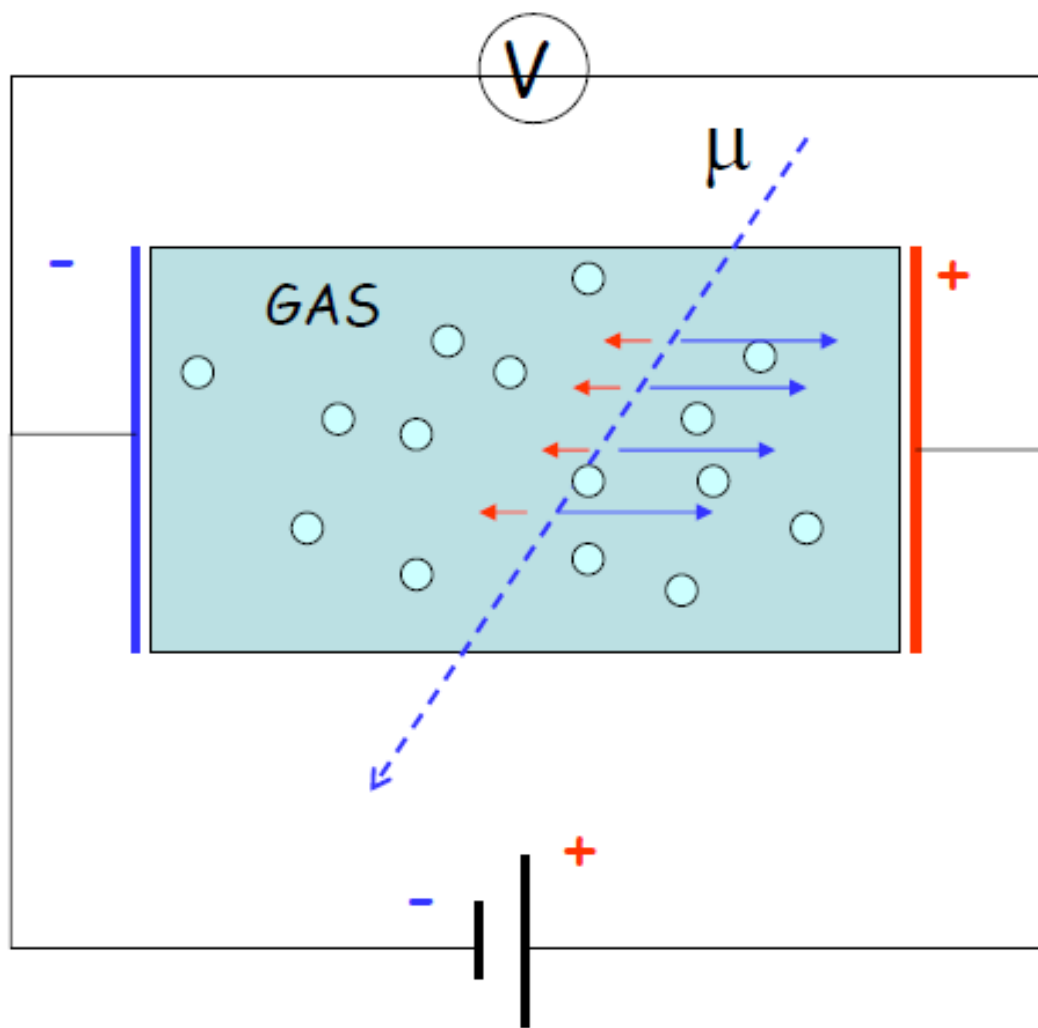
2. Gli elettroni e gli ioni generati vengono accelerati verso i due elettrodi dal campo elettrico

3. Se la tensione applicata è sufficientemente grande elettroni e ioni possono raggiungere velocità (energie) tali da creare a loro volta ionizzazione, detta secondaria.



**4. il processo si ripete formando una vera e propria valanga!**

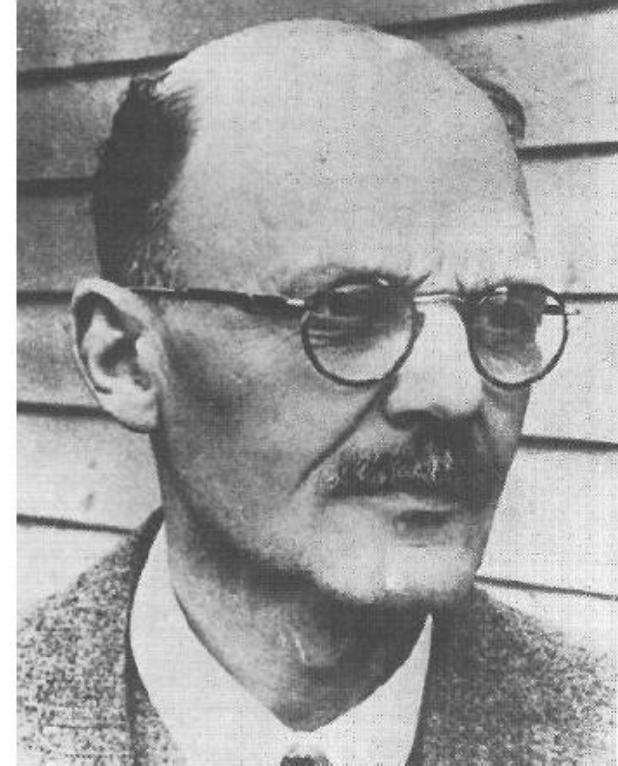
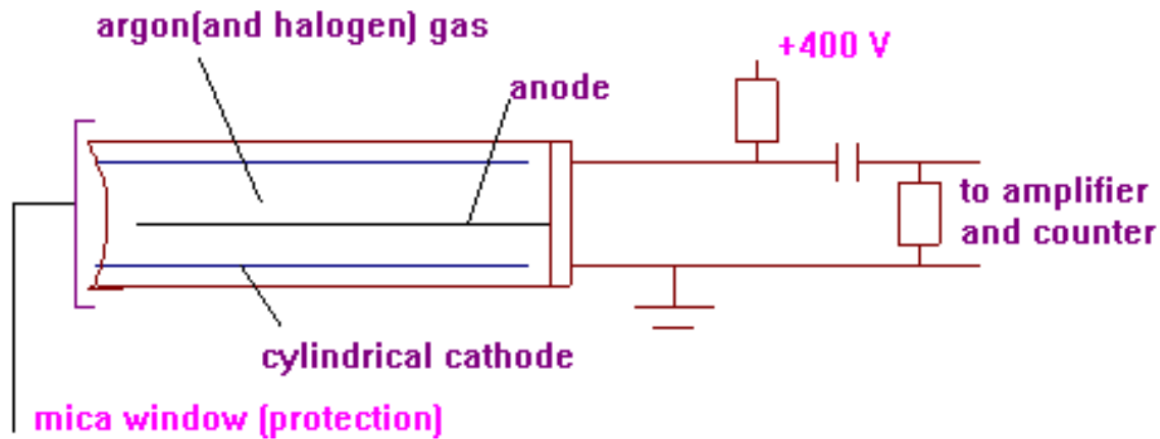
La tensione deve essere tale da permettere ai solo elettroni (più 'leggeri') di creare ionizzazione secondaria, altrimenti diventa in ping-pong senza fine...o più tecnicamente una **scarica**.



# Il primo rivelatore a gas

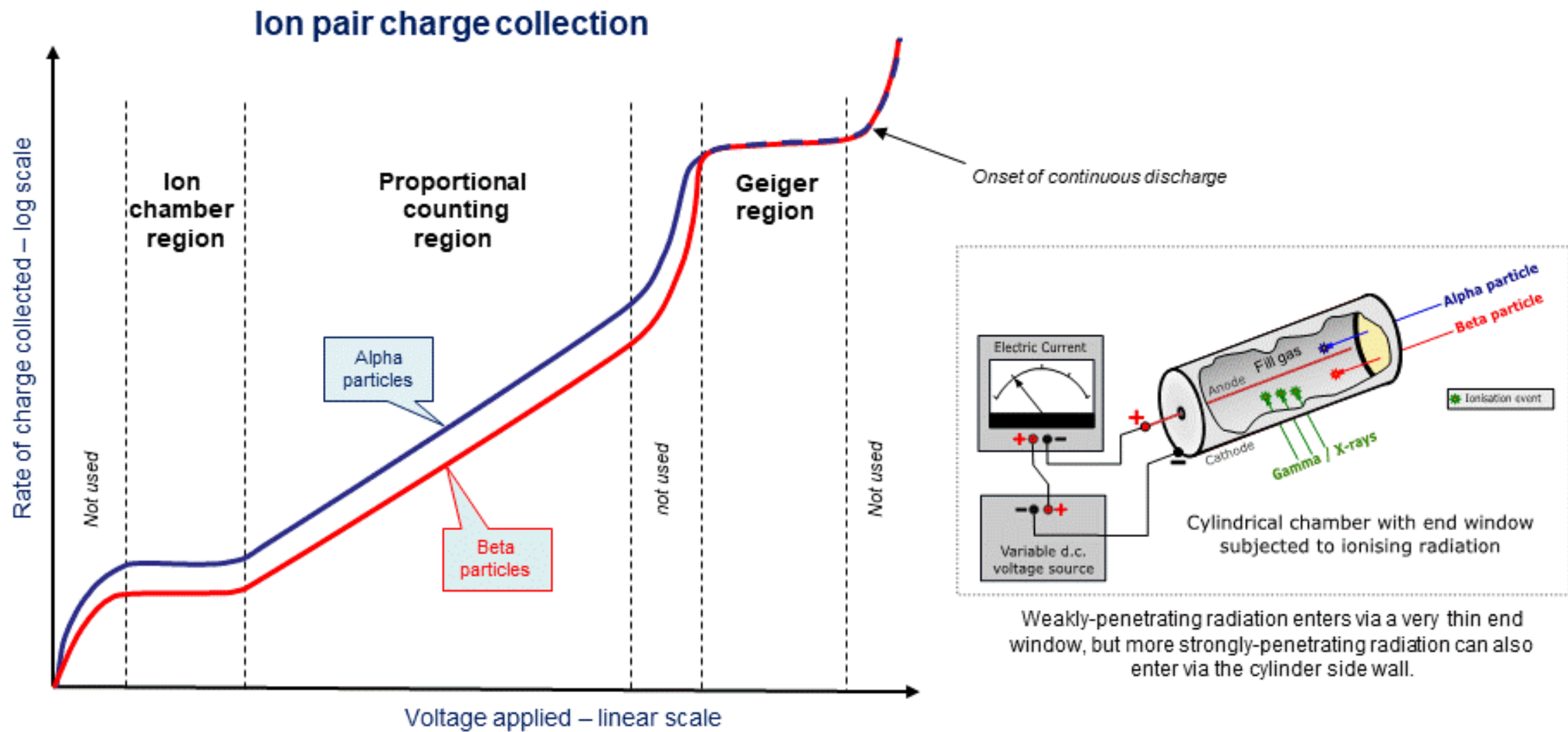
Un grosso passo avanti nella rivelazione di particelle cariche venne fatto nel 1928,  
Con lo sviluppo di un particolare tipo di rivelatore, il **contatore Geiger-Muller**, ad opera di Hans Geiger and Walther Muller.

Era possibile contare le particelle ed individuare il momento «esatto» del loro passaggio!!

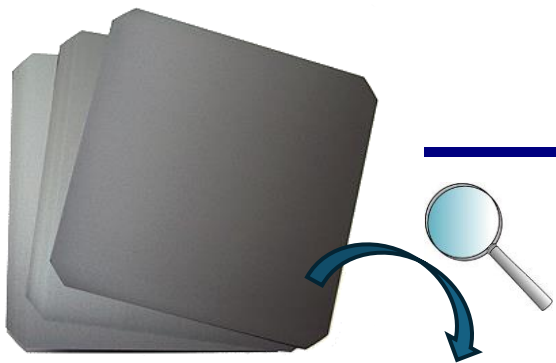


Hans Geiger

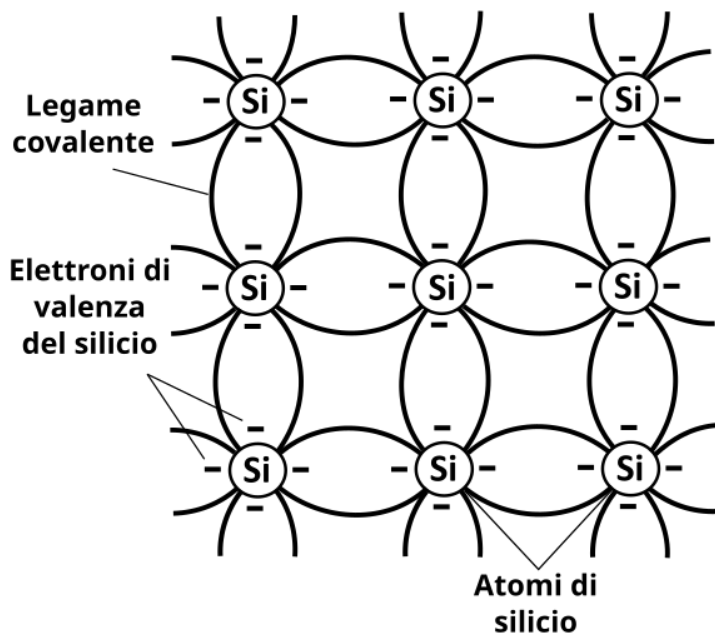
# Il primo rivelatore a gas



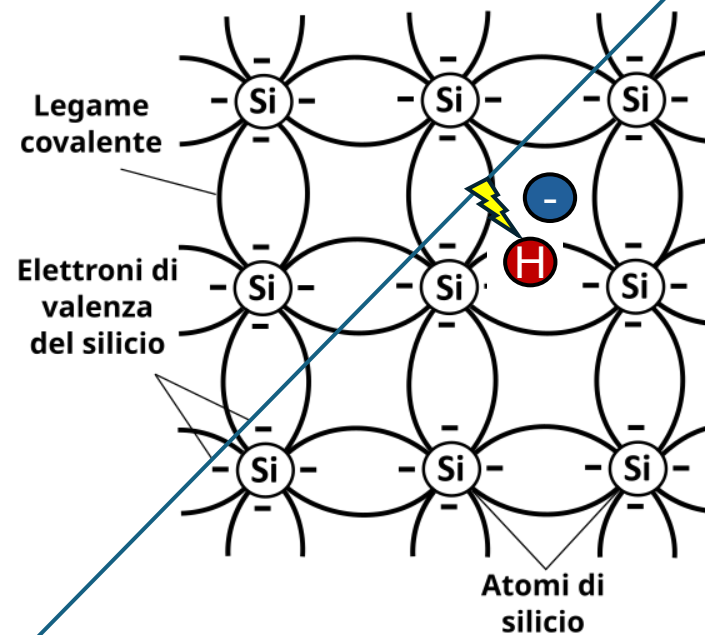
# Detector a stato solido: il silicio



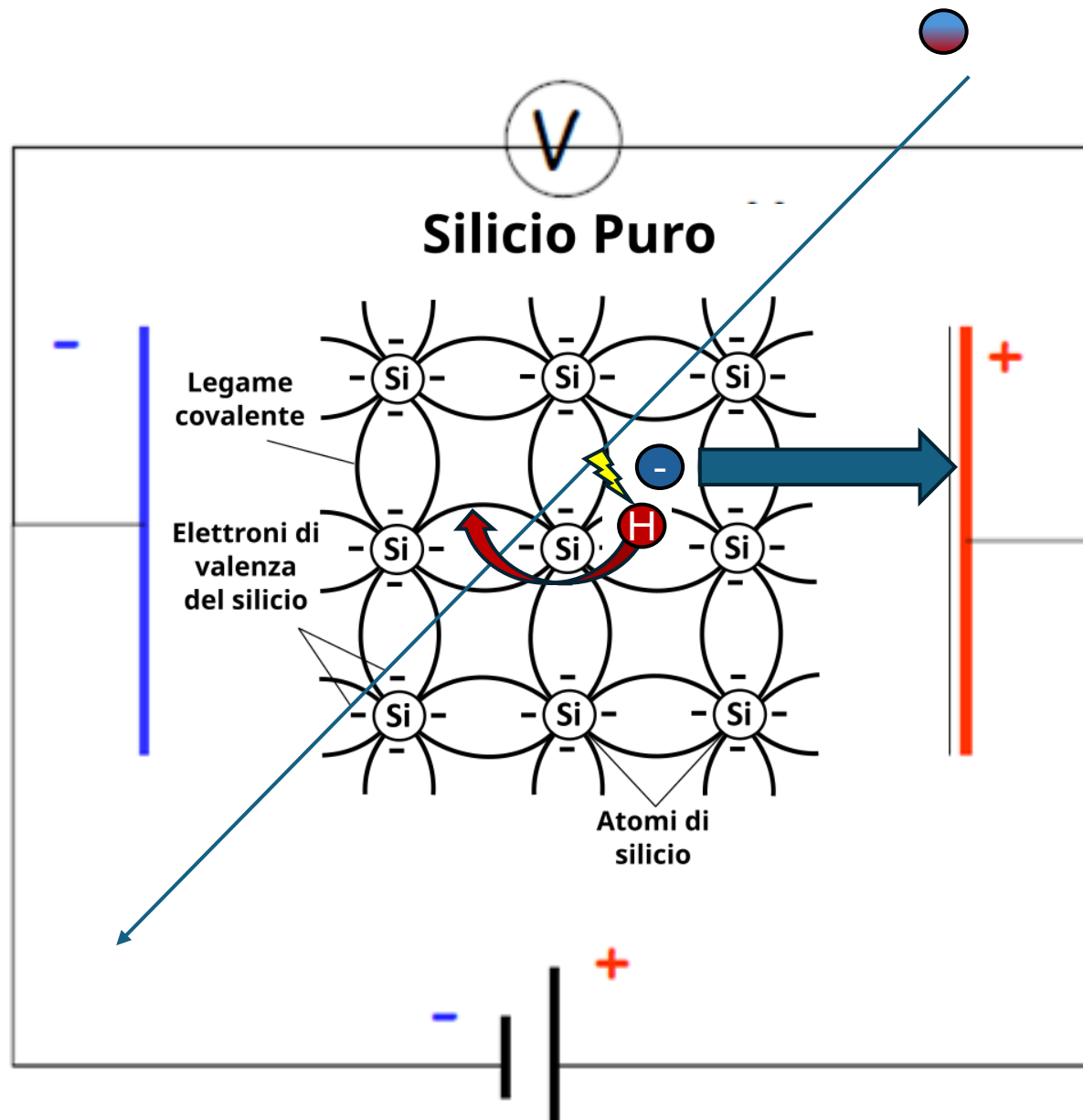
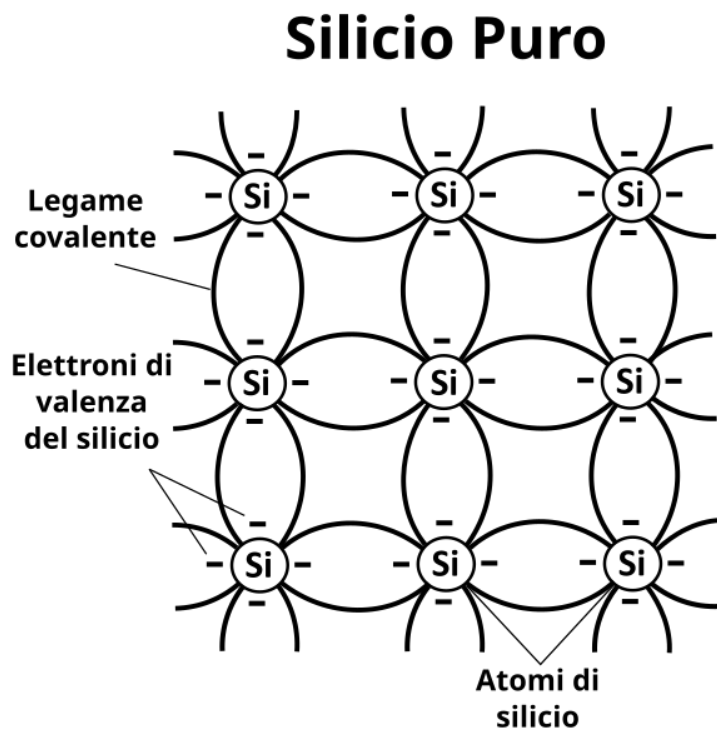
**Silicio Puro**



**Silicio Puro**



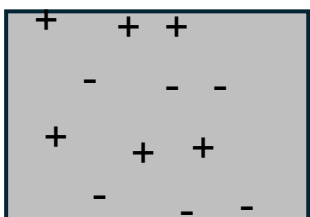
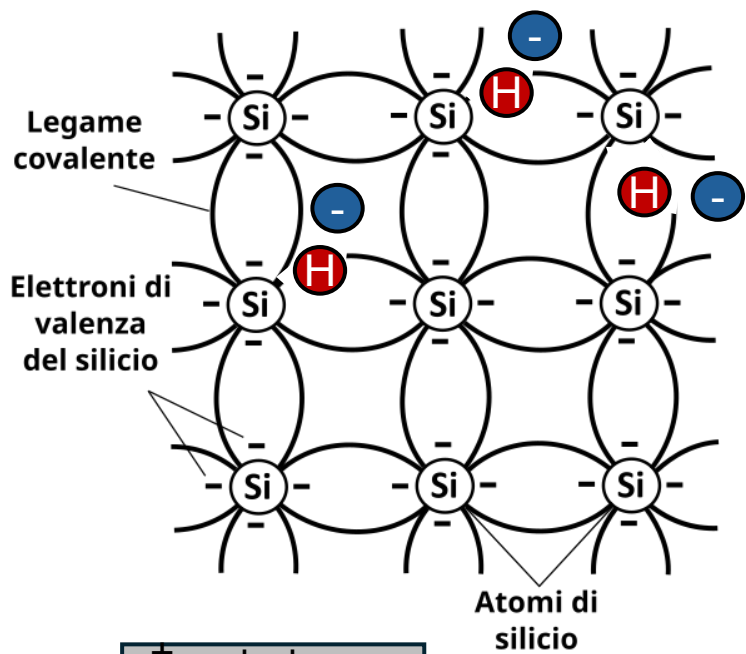
# Detector a stato solido: il silicio



# Le cariche «termiche»

---

## Silicio Puro



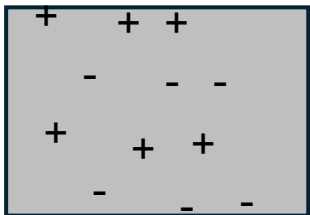
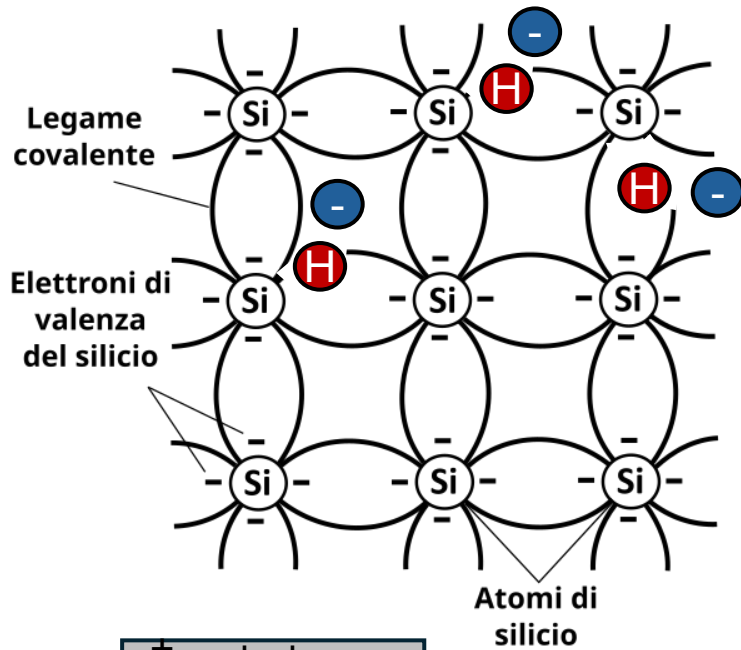


# Semiconduttori estrinseci

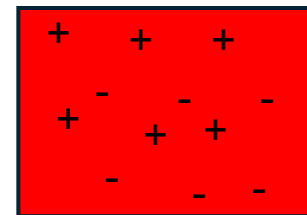
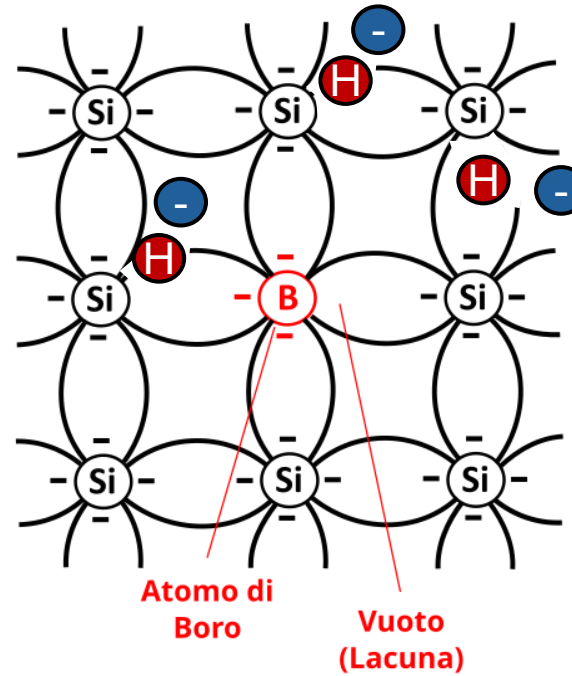
Intrinseco (Non drogato)

Estrinseco (Drogato)

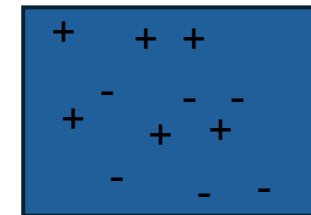
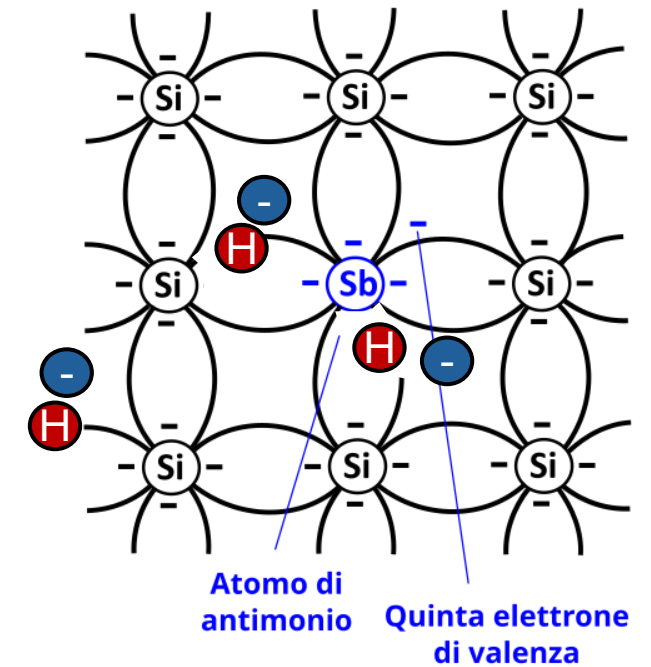
### Silicio Puro



### Tipo P



### Tipo N

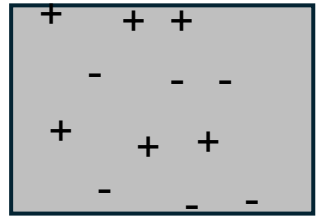
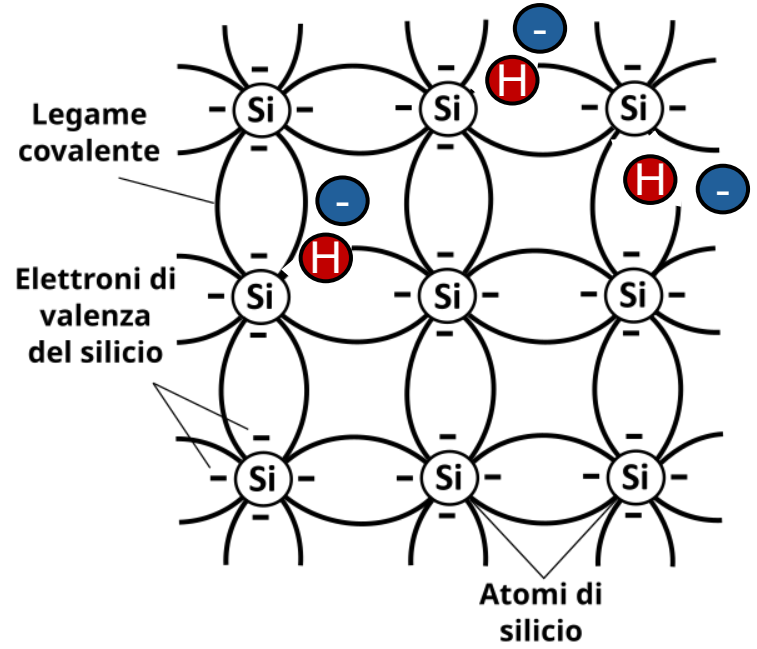


# La giunzione

Intrinseco (Non drogato)

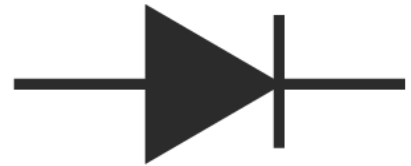
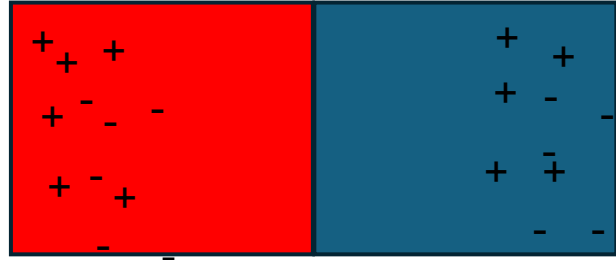
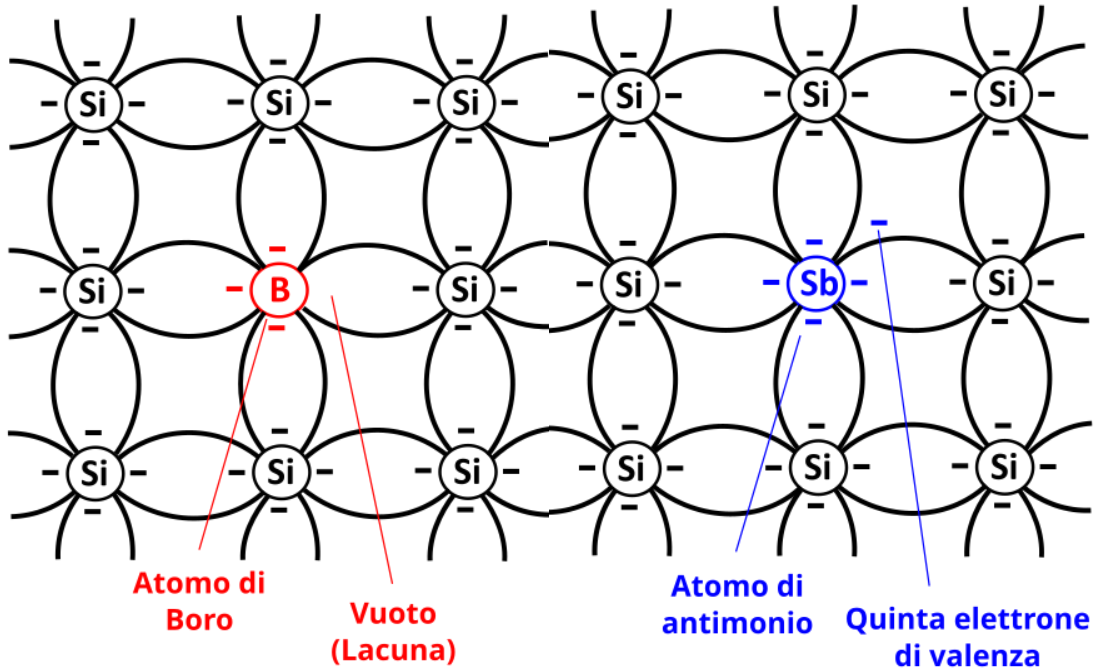
Estrinseco (Drogato)

## Silicio Puro

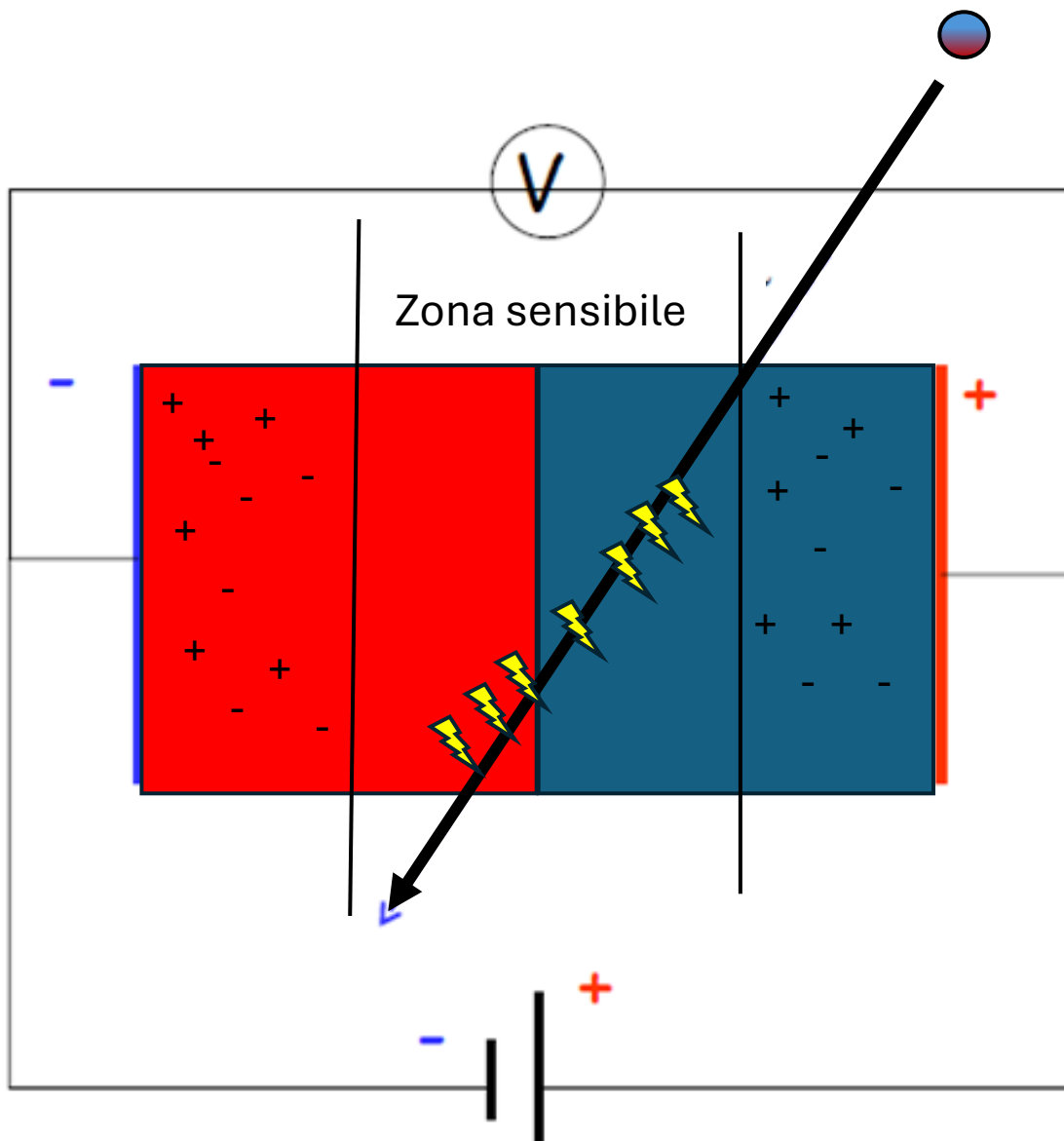


## Tipo P

## Tipo N



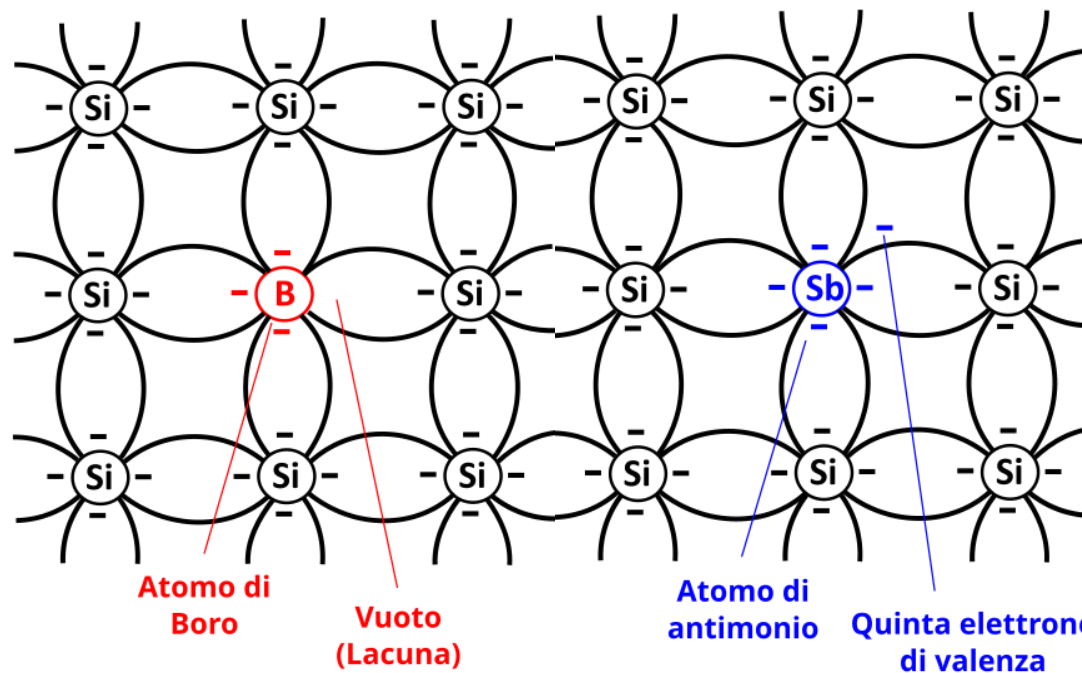
# Il rivelatore a stato solido



Come per i rivelatori a gas posso moltiplicare la carica dentro al silicio, se il campo elettrico è sufficientemente alto

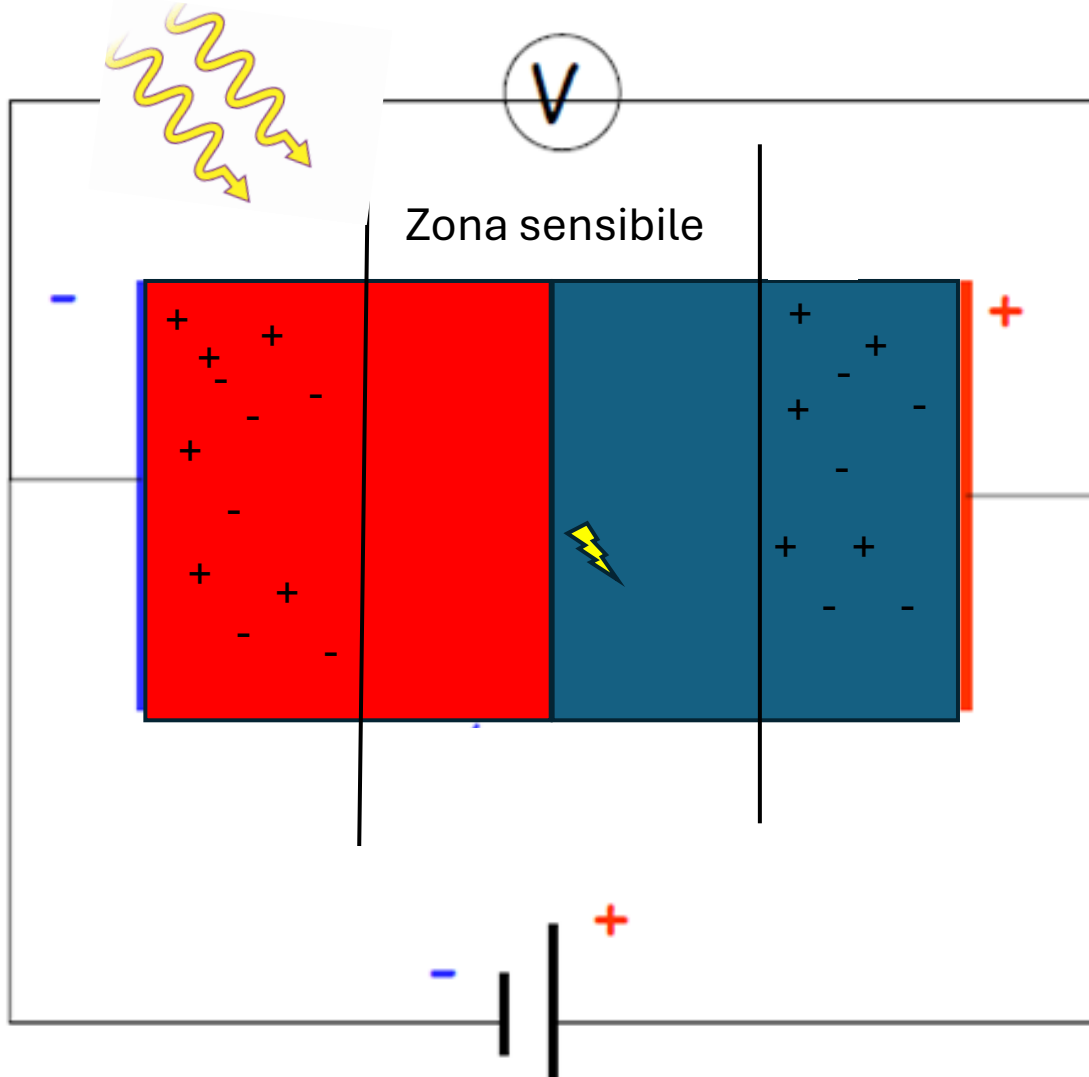
## Tipo P

## Tipo N

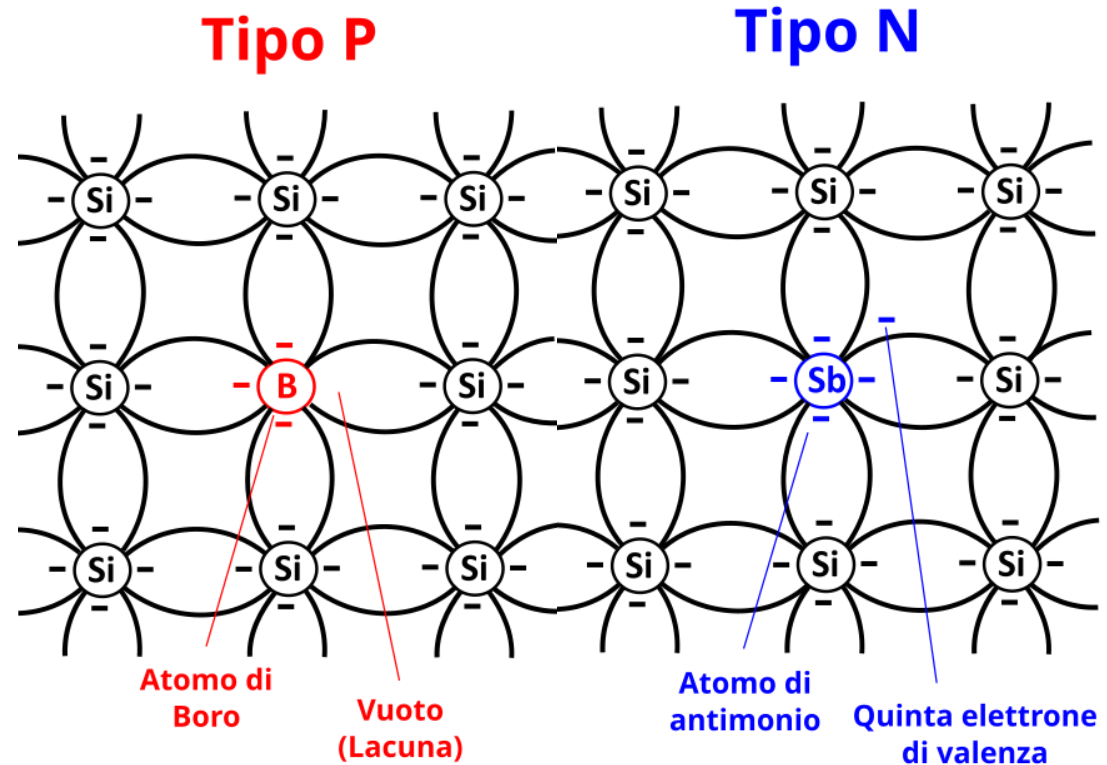


Singola particella carica = molta ionizzazione

# Il fotorivelatore

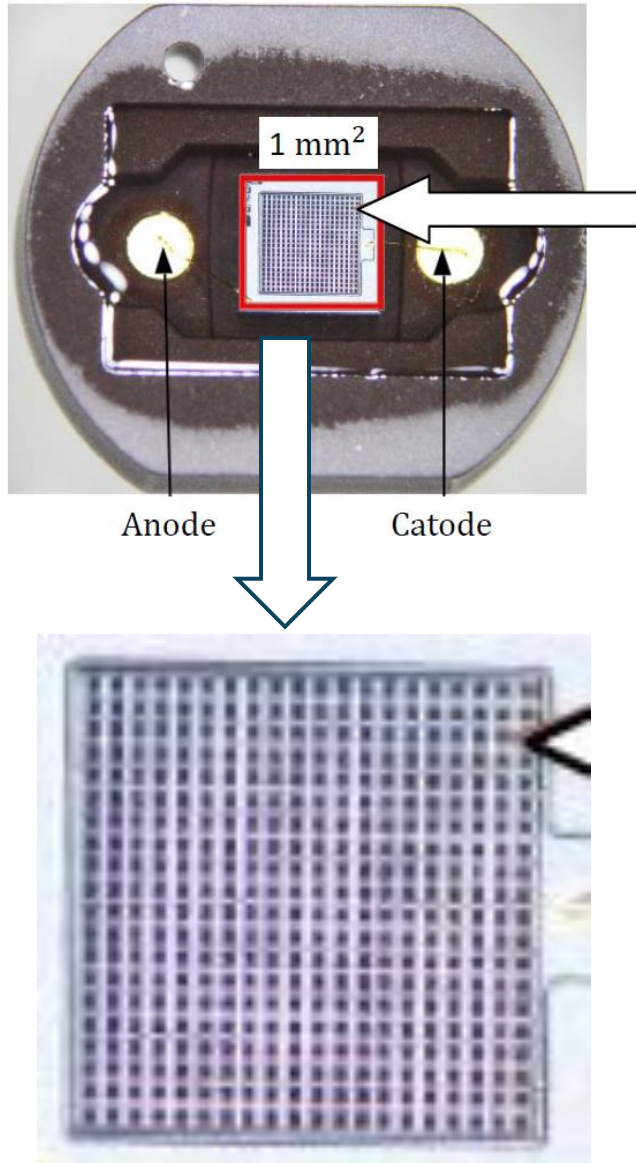


Come per i rivelatori a gas posso moltiplicare la carica dentro al silicio, se il campo elettrico è sufficientemente alto

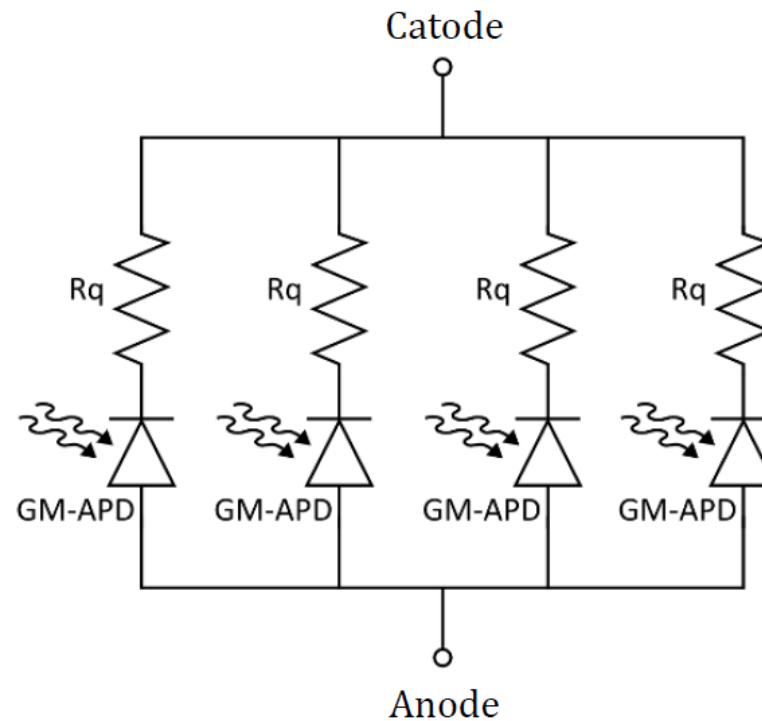


Luce visibile a bassissima intensità= scarsa ionizzazione, segnale molto piccolo

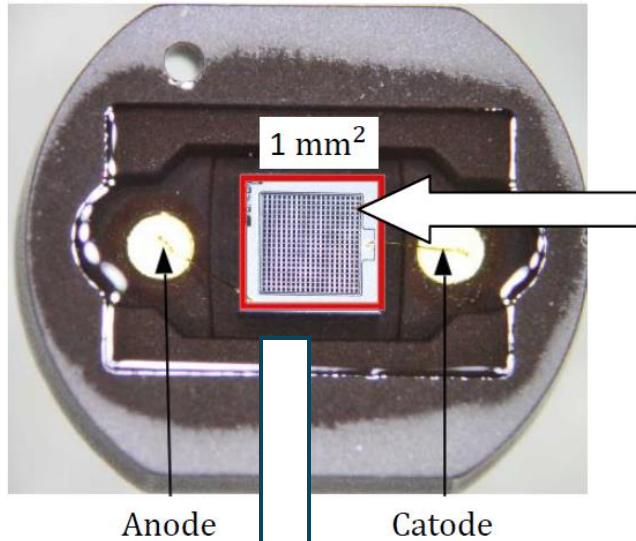
# Il Fotomoltiplicatore al silicio



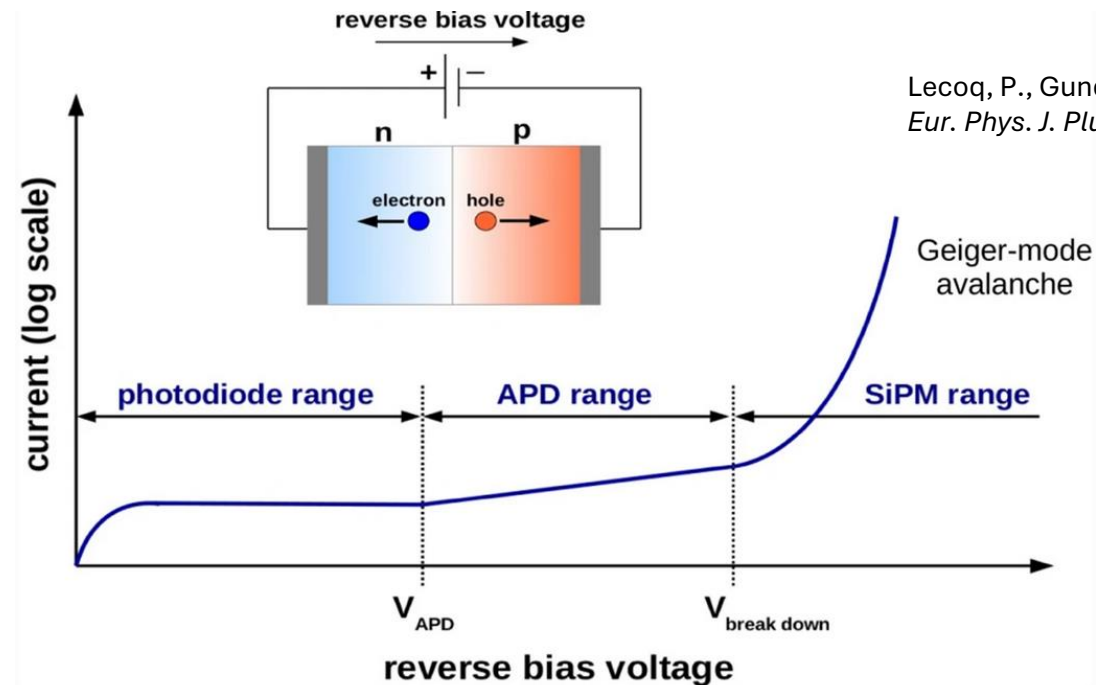
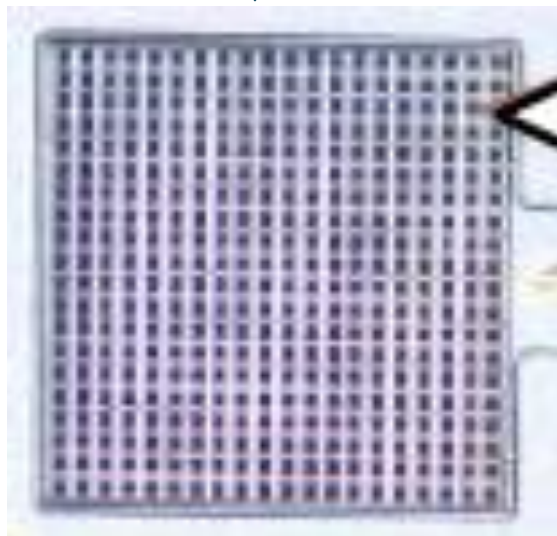
- I **SiPM** costituiscono la più moderna tipologia di fotorivelatori a stato solido
- Sono costituiti da una matrice di fotodiodi denominati SPAD (single photon avalanche diode)



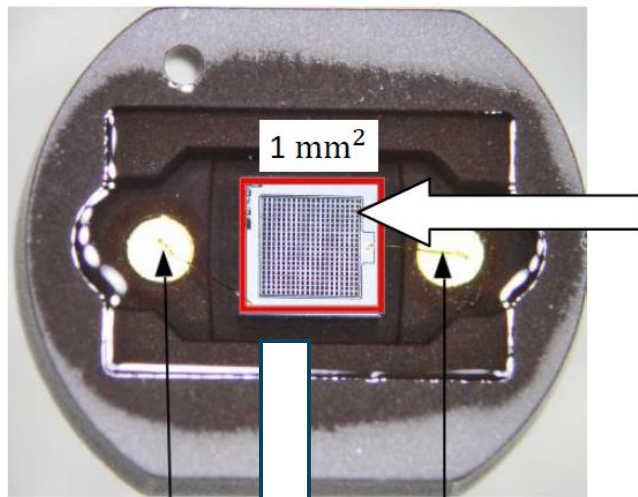
# Il Fotomoltiplicatore al silicio



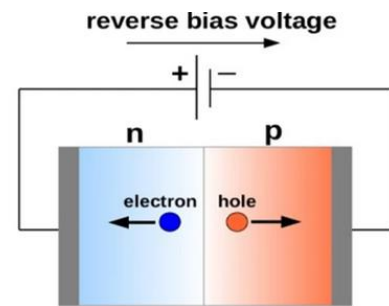
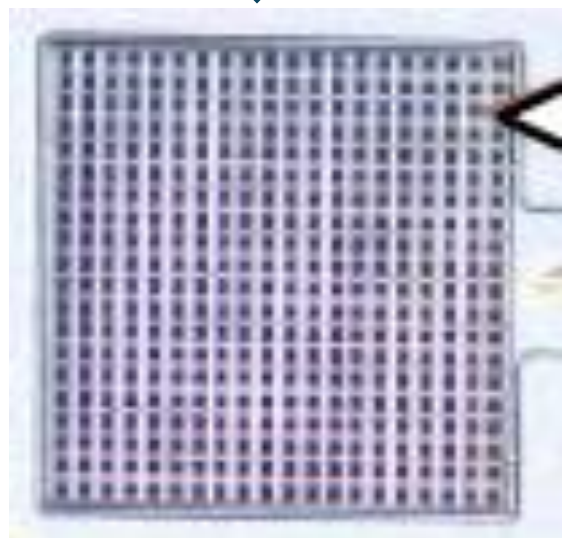
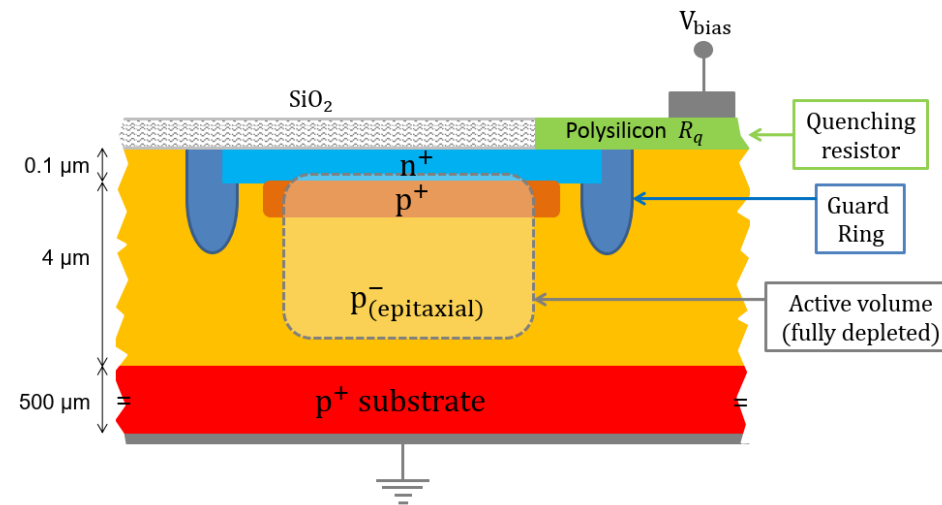
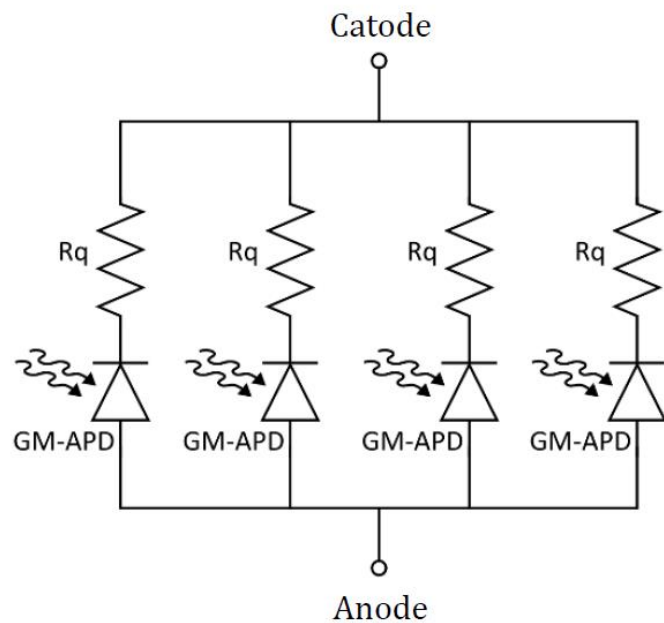
- In un SiPM i fotodiodi operano in modalità Geiger: l'energia rilasciata da un fotone incidente genera una coppia elettrone/lacuna che a sua volta innesca una valanga. Un fotodiodo in cui l'arrivo di un fotone ha innescato la valanga in regime Geiger, non ha possibilità di apprezzare l'arrivo di un secondo fotone
- I SiPM presentano un rumore non trascurabile, denominato "**dark current**". Il fenomeno della dark current è spiegato dalla generazione spontanea, per effetto termico, di coppie elettrone-lacuna nella regione svuotata



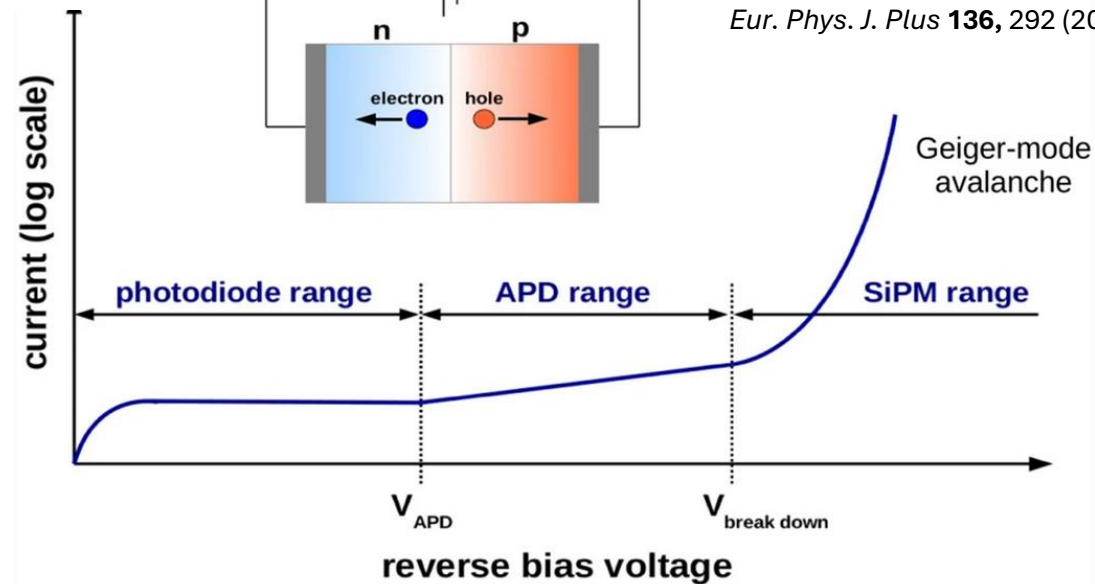
# Il Fotomoltiplicatore al silicio



Anode      Catode



Lecoq, P., Gundacker, S.  
*Eur. Phys. J. Plus* **136**, 292 (2021).



# Scintillatori

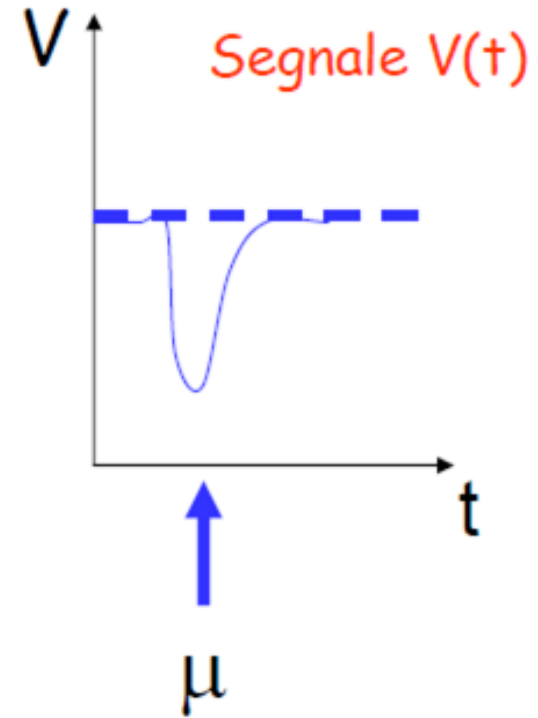
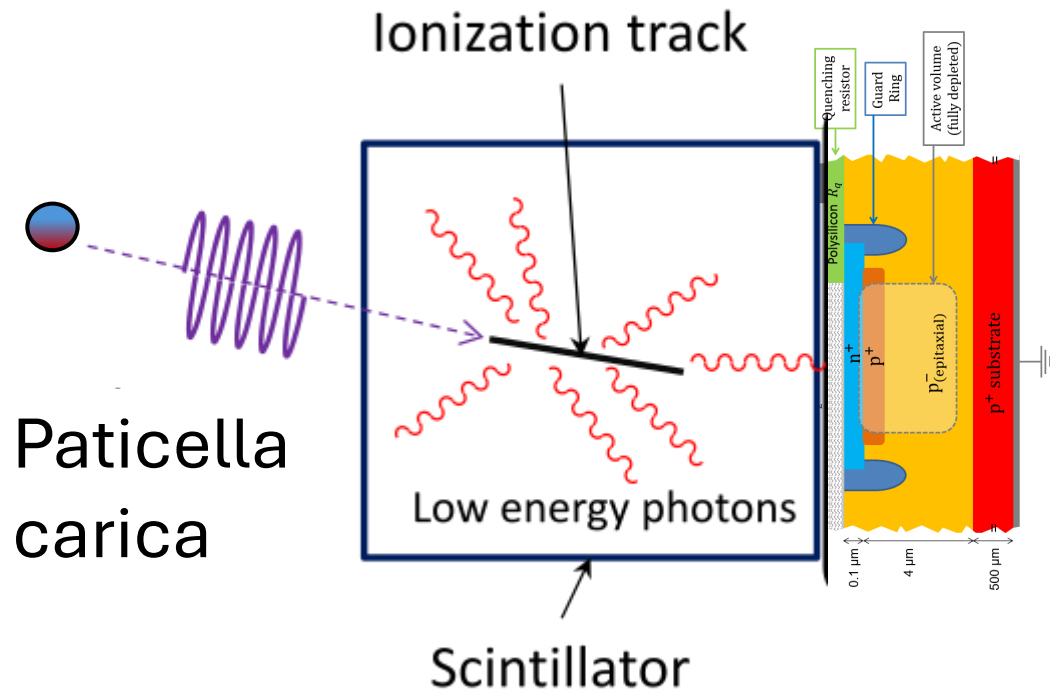
---

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





# Scintillatori + SiPM



# Scintillatori

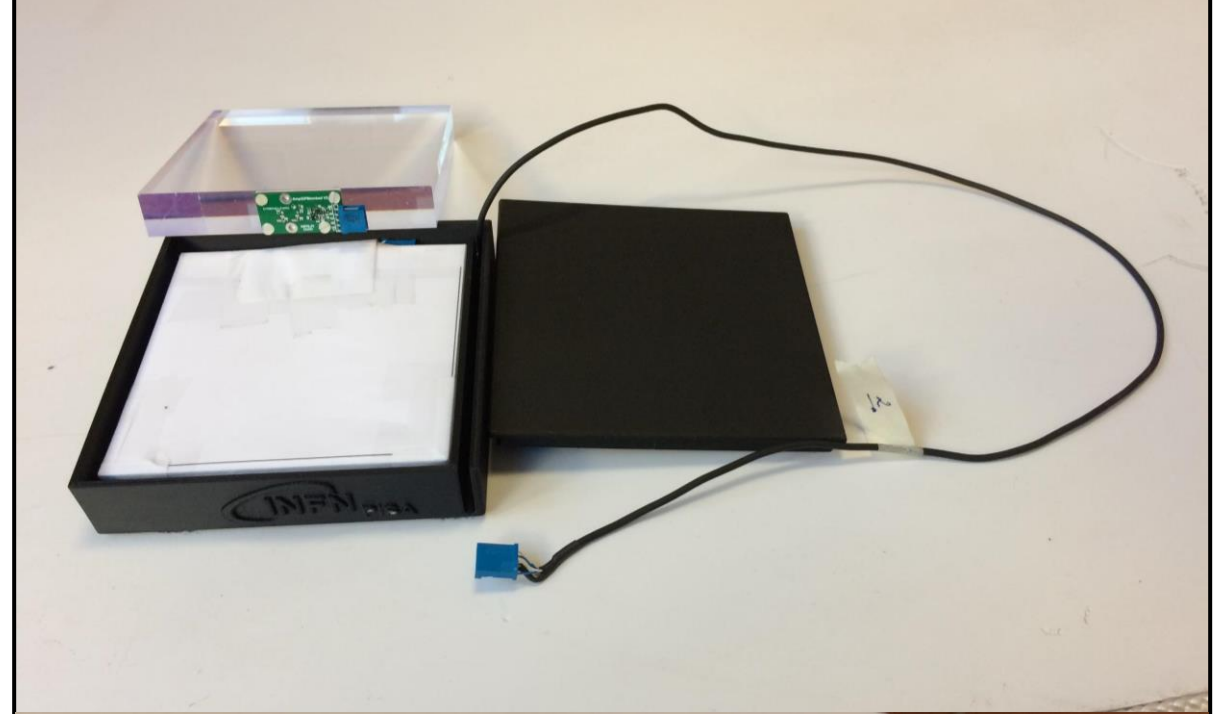
---

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



# Una “mattonella” per il COSMOCUBE

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



# Il trigger

---

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

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

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

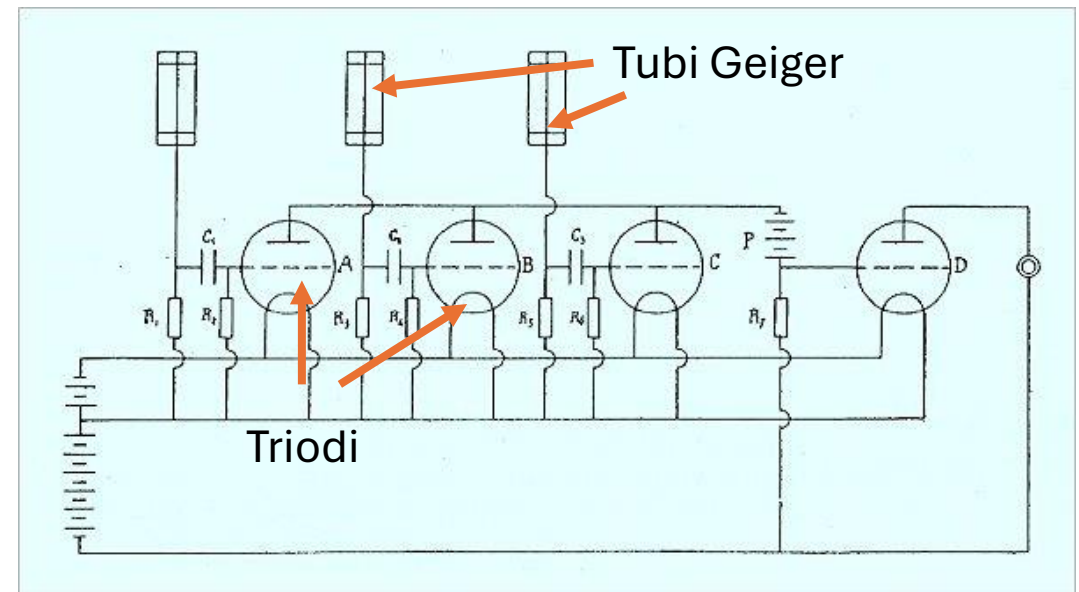
\* Utilizzando un circuito di coincidenza Walther Bothe (premio Nobel) e Werner Kolhörster nel 1929 mostrarono l'esistenza di particelle cariche penetranti nei raggi cosmici

**Spoiler alert: i CosmoCube sono costituiti da due mattonelle**



# Il trigger

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



Article Full-text available

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

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

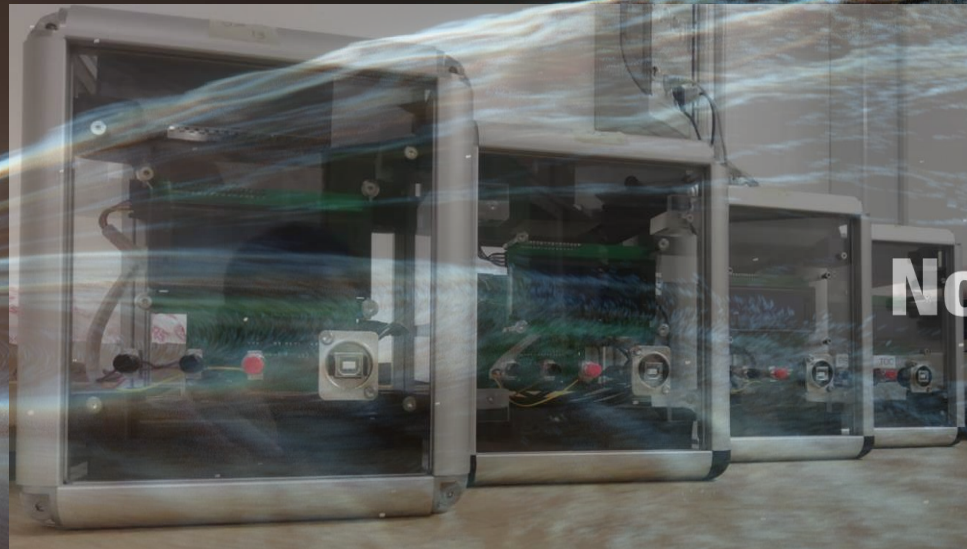
DOI: [10.1119/1.3619808](https://doi.org/10.1119/1.3619808)

Source · [arXiv](https://arxiv.org/)

**Discover Cosmic Particles**

«Vedere» i raggi cosmici

# INTERNATIONAL COSMIC DAY



**November 26 | 2024**