

DETECTORES SEMICONDUCTORES

Enrique Nácher

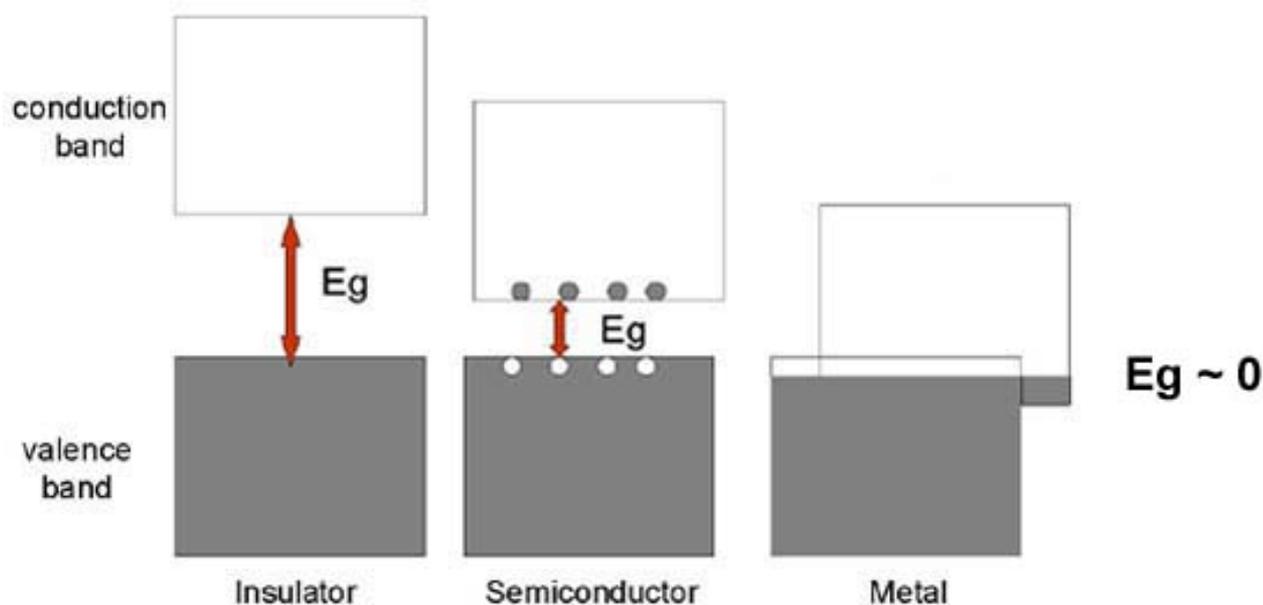


Señal eléctrica en el detector

- Cuando los e^- secundarios ya no tienen energía suficiente para ionizar otros átomos...
 - 1) Detectores gaseosos: Toda la carga liberada (e^- e iones positivos) se mueve libremente en el gas y se recolecta en ánodo y cátodo.
 - 2) Detectores semiconductores: los e^- libres producen excitaciones electrón-hueco (e^- - h^+) que se mueven libremente en el sólido y se recolectan en ánodo y cátodo.
 - 3) Detectores de centelleo: los e^- libres producen excitaciones que más tarde se desexcitan produciendo luz de centelleo que se transforma en una señal eléctrica gracias a un fotomultiplicador.

Estructura de bandas

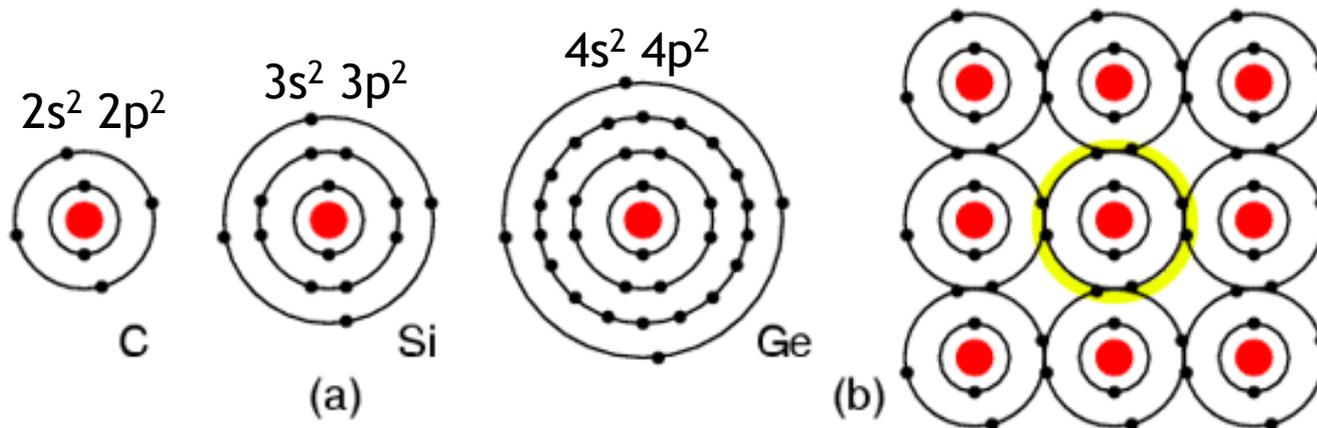
- Propiedades eléctricas de los sólidos debidas a una estructura de bandas.



- Energía del gap a 300 K: $\text{Ge} \rightarrow E_g = 0.66 \text{ eV}$
 $\text{Si} \rightarrow E_g = 1.11 \text{ eV}$

El Si y el Ge

- El C, el Si y el Ge tienen 4 electrones en su última capa: pueden completarla formando 4 enlaces covalentes.

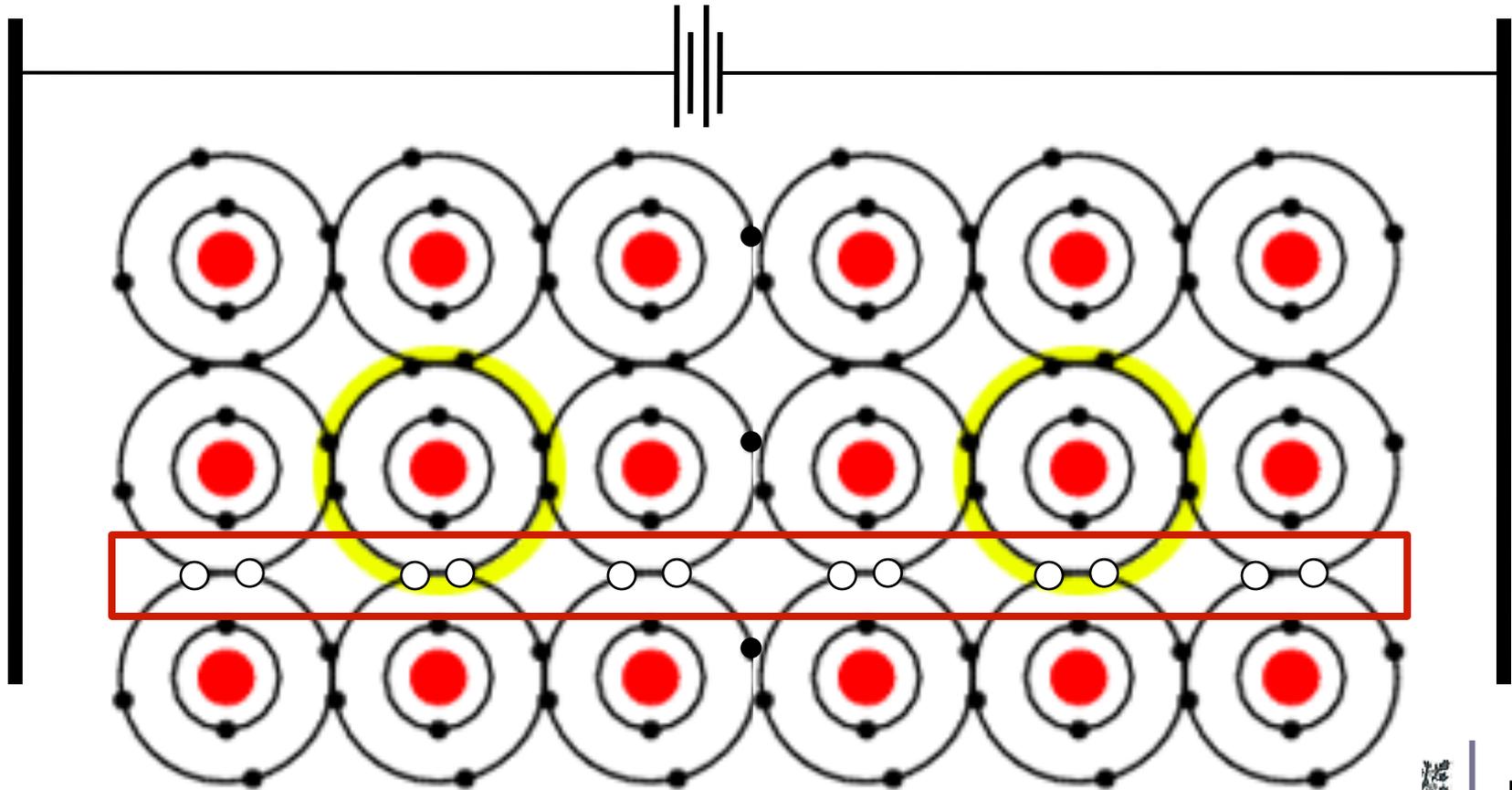


C, Si, Ge having 4 electrons in the valence shell, complete the valence shell by sharing electrons with other elements.

- Si un e^- se mueve a la capa de conducción deja un hueco y ambos se pueden 'mover'.

El Si y el Ge

- Movimiento de electrones y huecos en el sólido:

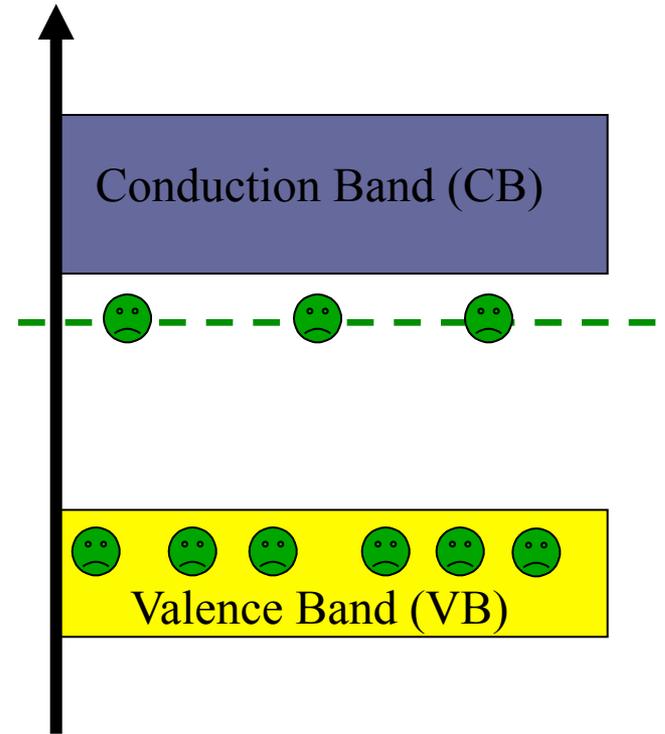
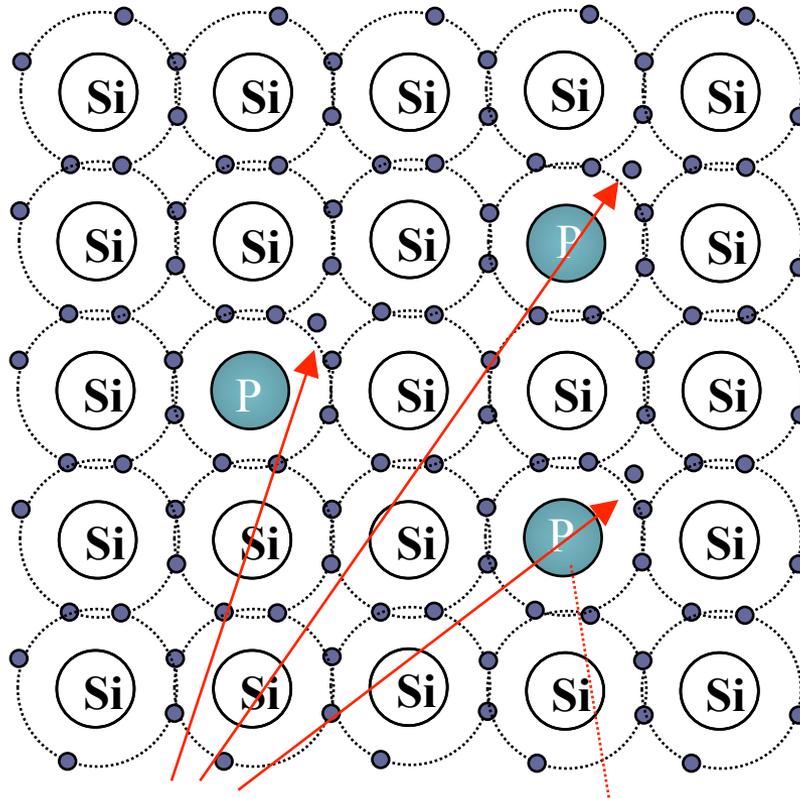


- Material puro \Rightarrow n° huecos (v) = n° de electrones (c)

Semiconductores dopados

- El material semiconductor puede ser dopado con impurezas que aporten e^- extra o huecos extra. Se habla entonces de semiconductor tipo n o tipo p.

Semiconductores dopados



Electrón en exceso (-)

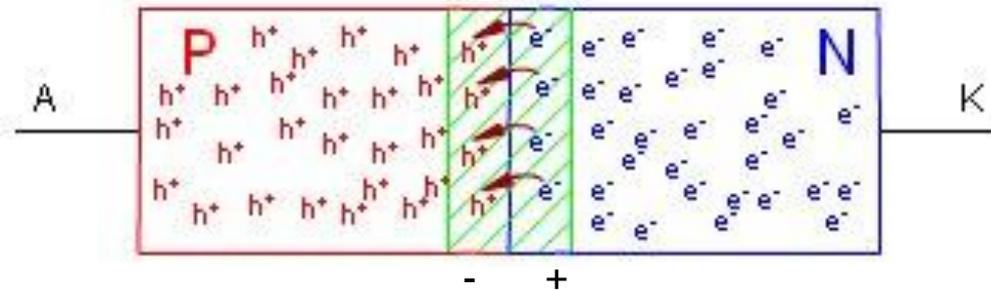
**Átomos de Fósforo
sirven de dopante
tipo n**

**Átomos 'donantes' proporcionan
electrones en exceso para formar
Silicio tipo n**

La unión pn

- El material semiconductor puede ser dopado con impurezas que aporten e^- extra o huecos extra. Se habla entonces de semiconductor tipo n o tipo p.

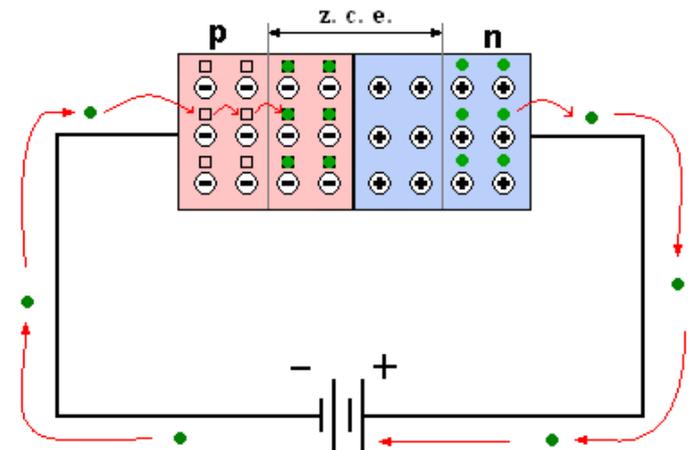
- La unión pn:



- Se difunden e^- que rellenan huecos \Rightarrow se crea un campo eléctrico que detiene esta difusión \Rightarrow se crea una región: ‘zona de agotamiento’ o ‘zona de carga espacial’ (z.c.e.) donde no hay electrones ni huecos en exceso.

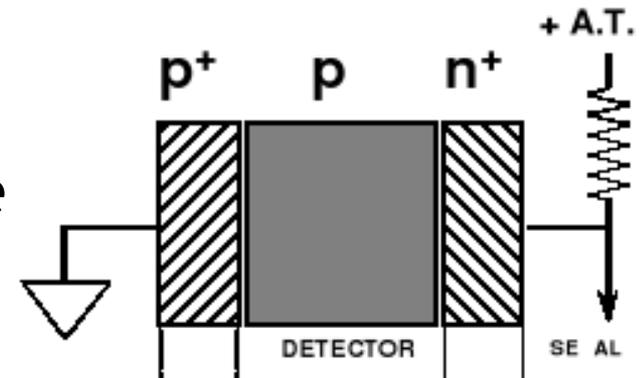
La unión pn

- La radiación incidente puede crear pares e-h en la z.c.e.: el campo eléctrico los sacará de la z.c.e. (e^- hacia n y h^+ hacia p).
- Podemos ayudar a recolectar esta carga y formar una señal polarizando la unión pn aplicando el polo - a la zona p y el + a la zona n: polarización inversa.
- La z.c.e. aumenta hasta que el campo en ella es igual al de la batería



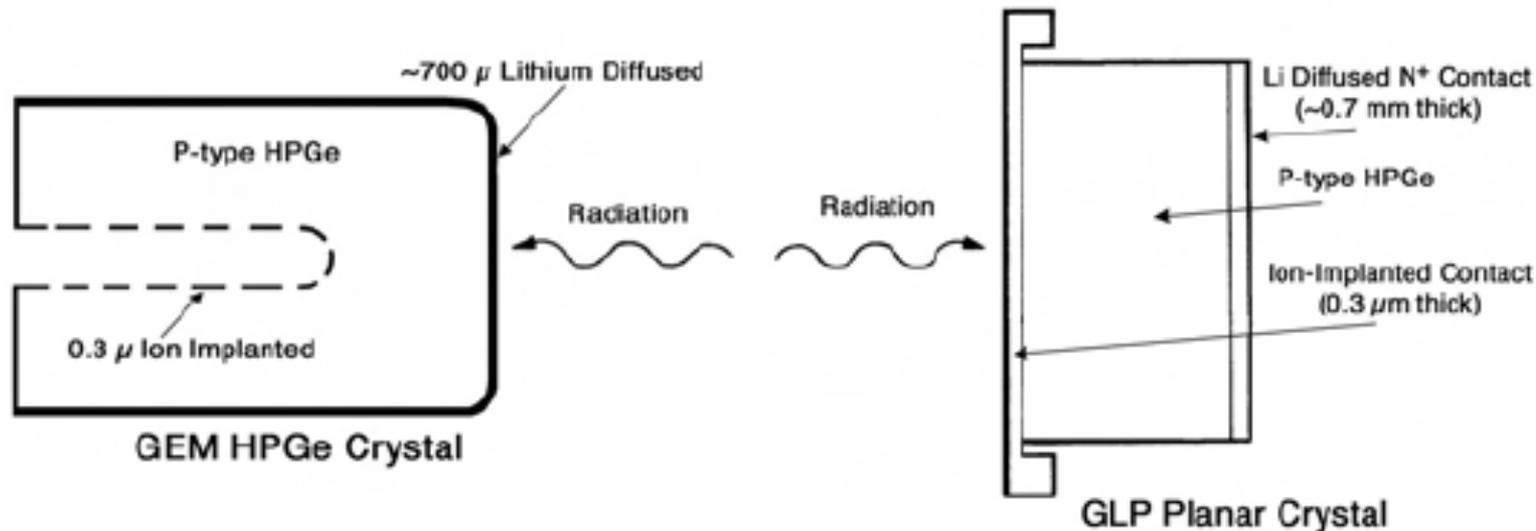
La unión pn en detectores reales

- En los detectores la unión pn se realiza en el contacto eléctrico, no se usan 2 trozos de Si o de Ge uno p y otro n. La z.c.e. se extiende hacia el volumen del cristal semiconductor de Si o Ge que es de base p o n.
- Los contactos se hacen a través de una zona fuertemente dopada p^+ o n^+ que se conecta luego con el metal, no son contactos óhmicos directos
- A T ambiente se producen pares e-h en Ge debido a lo pequeño que es el gap \rightarrow corriente de fuga. Para evitarla deben operar a T de LN_2 (77 K).



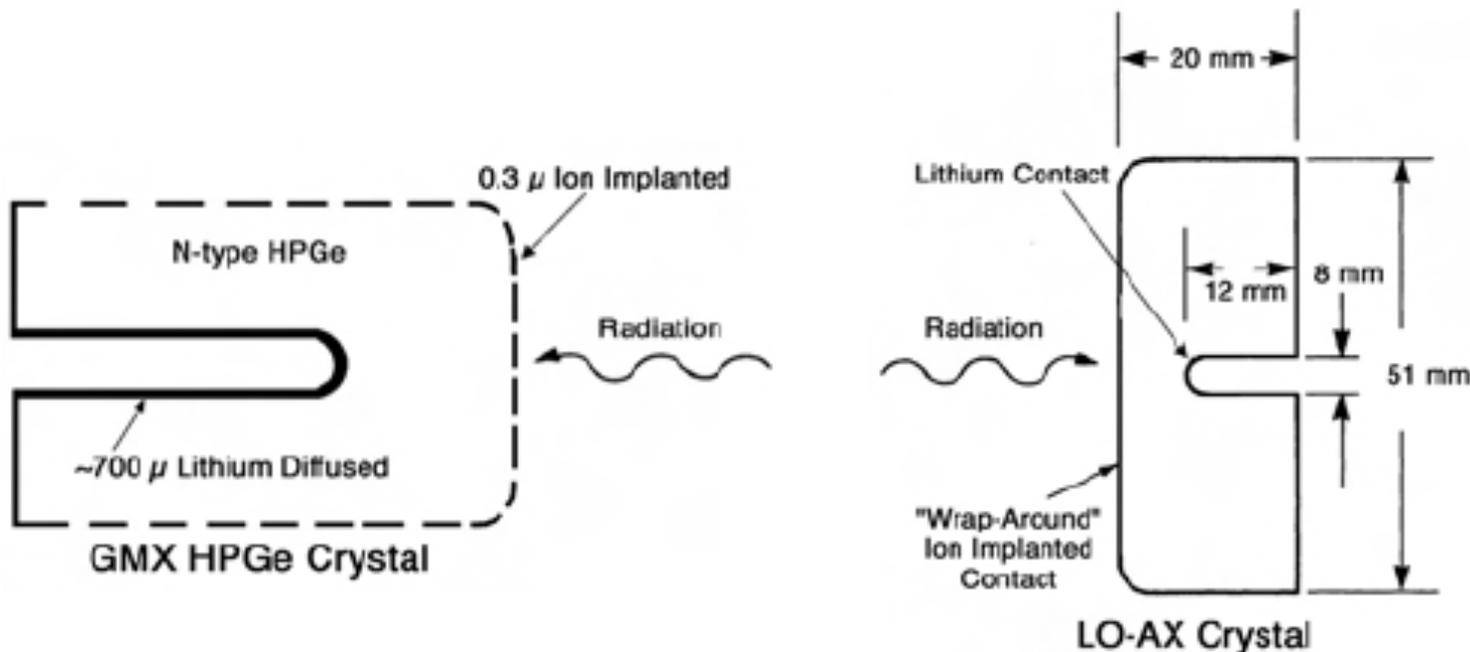
Detectores de Germanio (HPGe)

- El cristal semiconductor será Ge de alta pureza de sustrato tipo p o tipo n.
- Perfectos para detectar radiación γ : Alto Z ($Z_{\text{Ge}}=32$, $Z_{\text{Si}}=14$)
- Se utilizan geometrías tanto planares como coaxiales, y contactos de difusión de Li (n^+) o de implantación de iones (p^+).



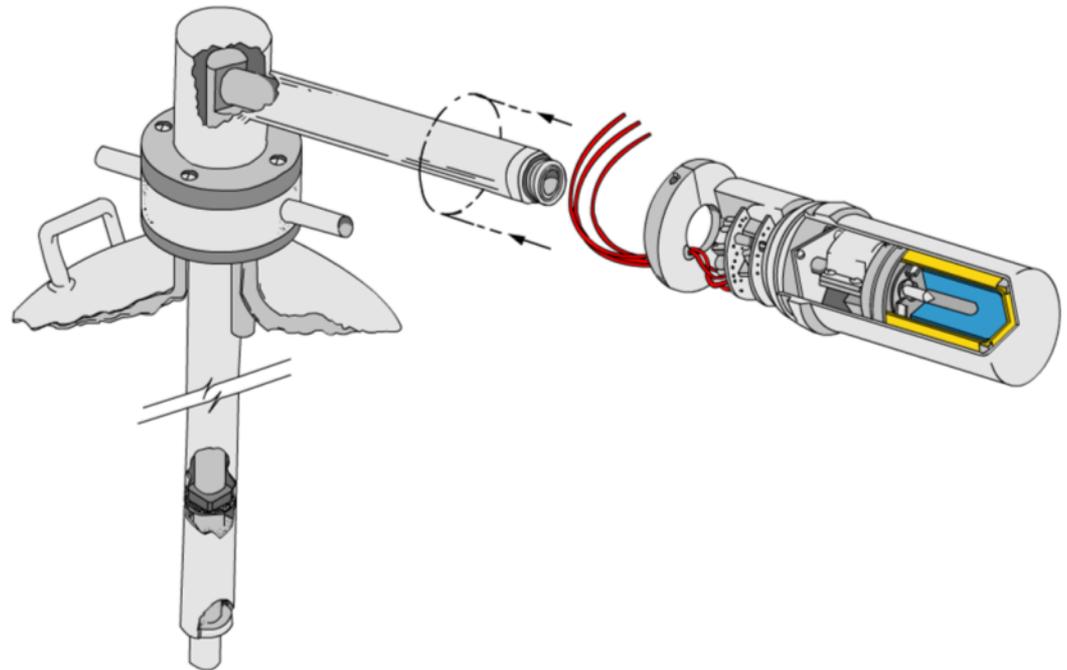
Detectores de Germanio (HPGe)

- Para detectar rayos-x o γ de baja energía interesa una ventana de entrada muy fina: el contacto iónico (p^+) debe estar delante. Para que la z.c.e. se extienda desde ahí hacia el cristal de Ge, este debe ser tipo n.



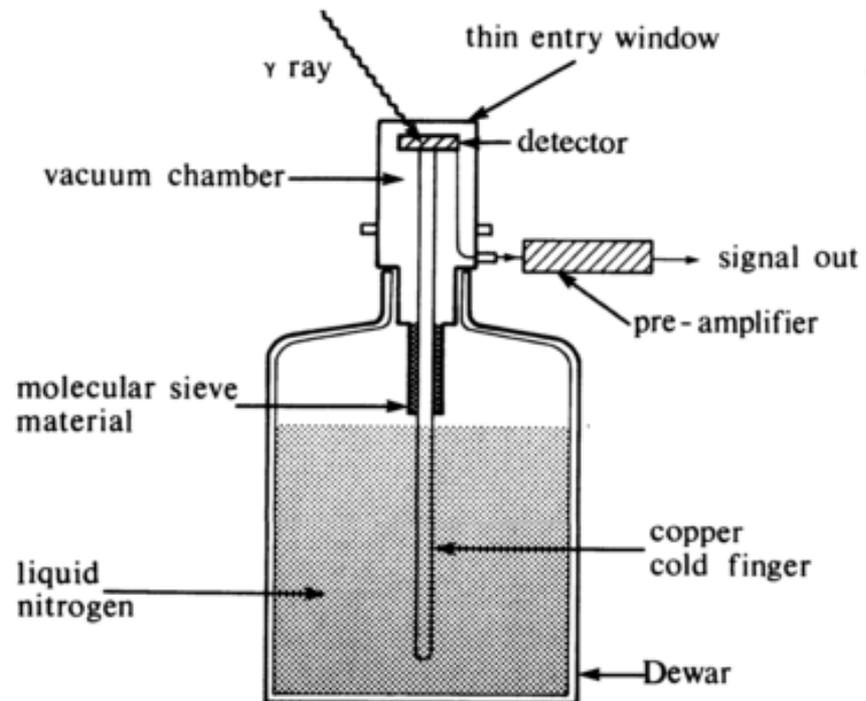
Detectores de Germanio (HPGe)

- Refrigeración a través de un criostato.



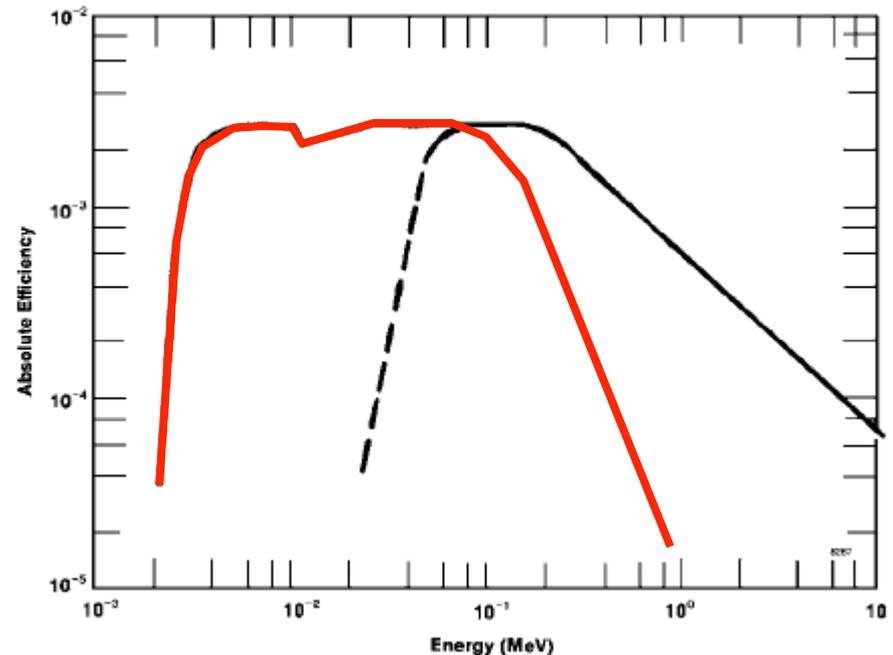
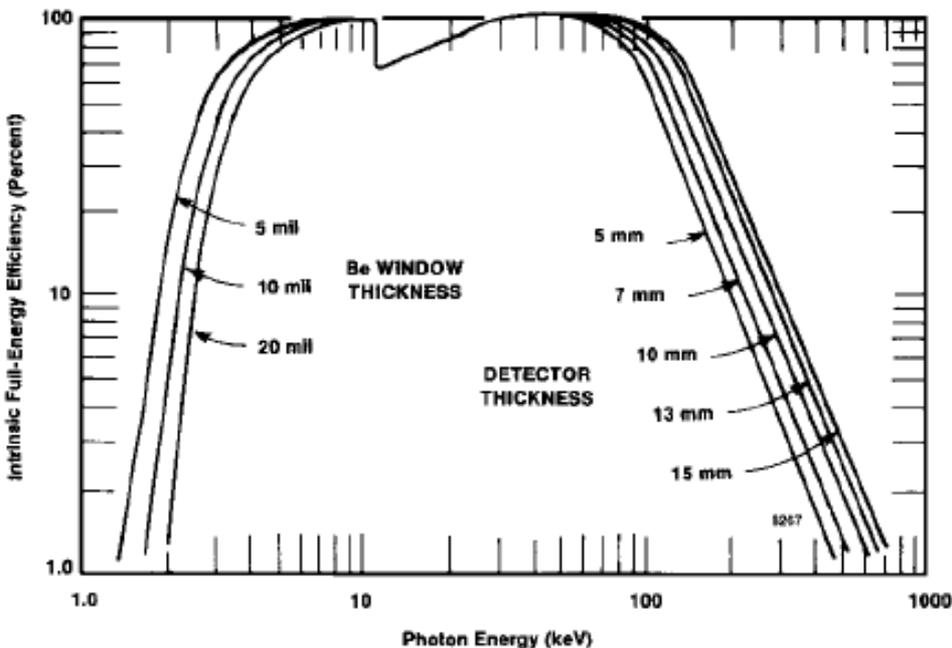
Detectores de Germanio (HPGe)

- Refrigeración a través de un criostato.



Eficiencia de los HPGe

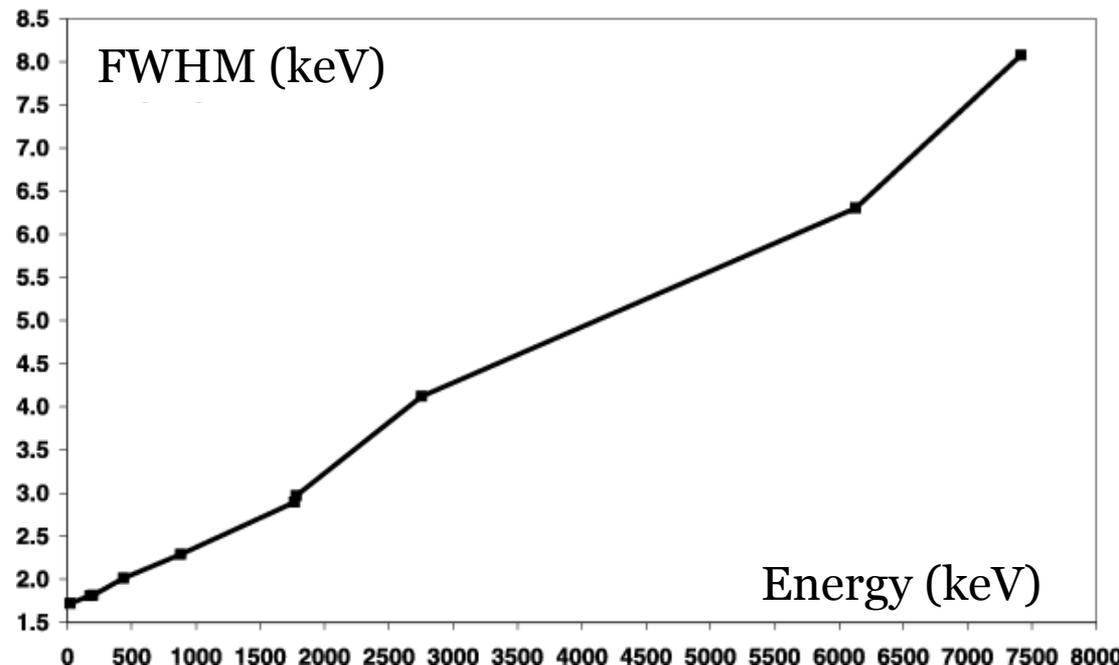
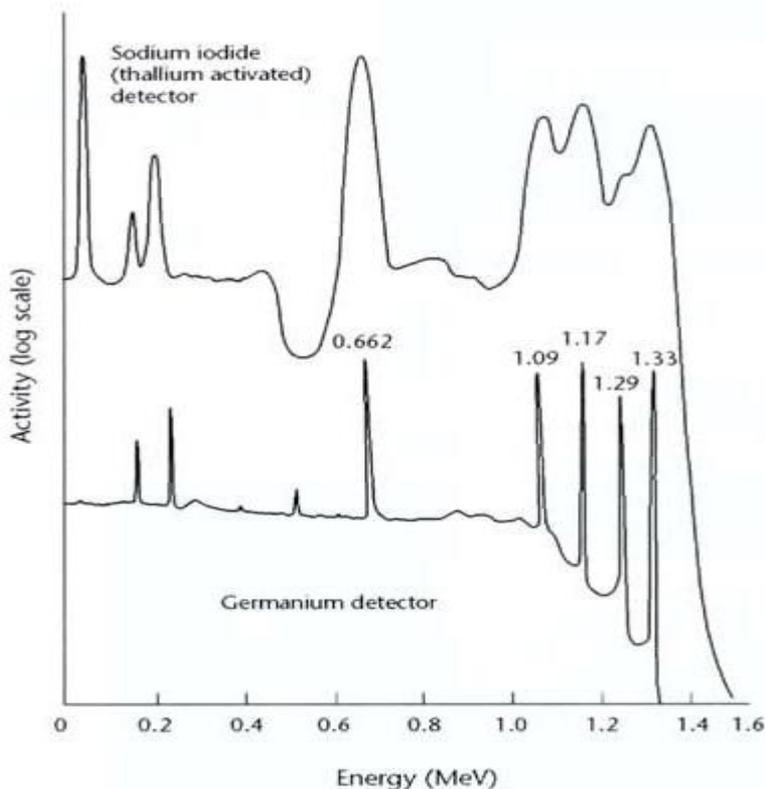
- Eficiencia.



- La ef.intrínseca para radiación γ de un detector de Ge es mucho menor que la de cualquier centelleador inorgánico.

Resolución energética de los HPGe

- Resolución energética: del orden del 0.15% a 1.33 MeV, a comparar con NaI (8% a 1.33 MeV). Además la proporción de fótico a Compton también es mucho mayor en Ge.



Resolución energética de los HPGe

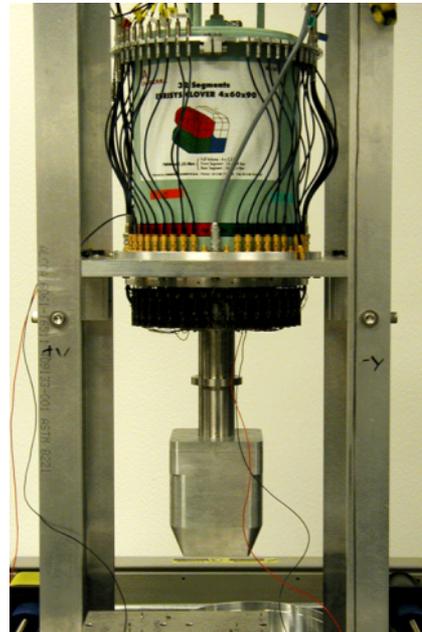
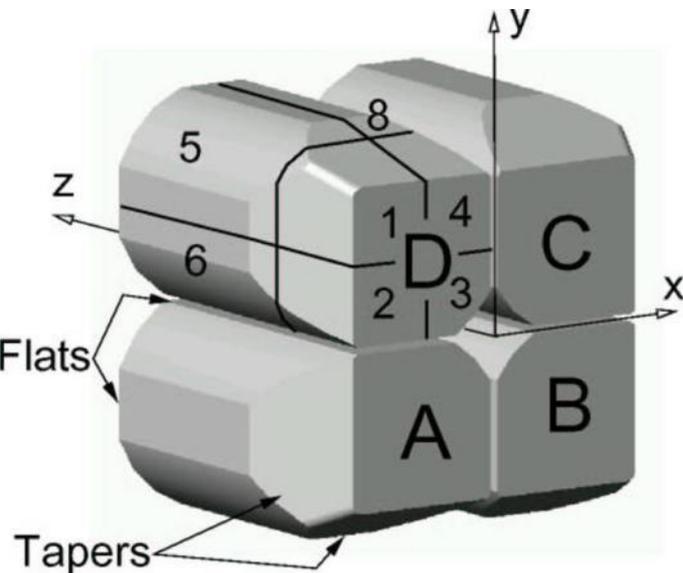
- El factor de Fano para detectores de Si y Ge es del orden de 0.12, y la energía necesaria para crear un par e-h a 77 K es 2.96 eV. ¿Cuál debe ser la resolución para γ 's de 1.33 MeV?

$$R = \frac{\Delta E}{E} = 2.35 \sqrt{\frac{F\omega}{E}} = 2.35 \sqrt{\frac{0.12 \cdot 2.96}{1.33 \cdot 10^6}} =$$
$$= 0.12\%$$

- Además de la resolución del detector en sí hay que tener en cuenta los efectos de la electrónica asociada y sistema de adquisición de datos.

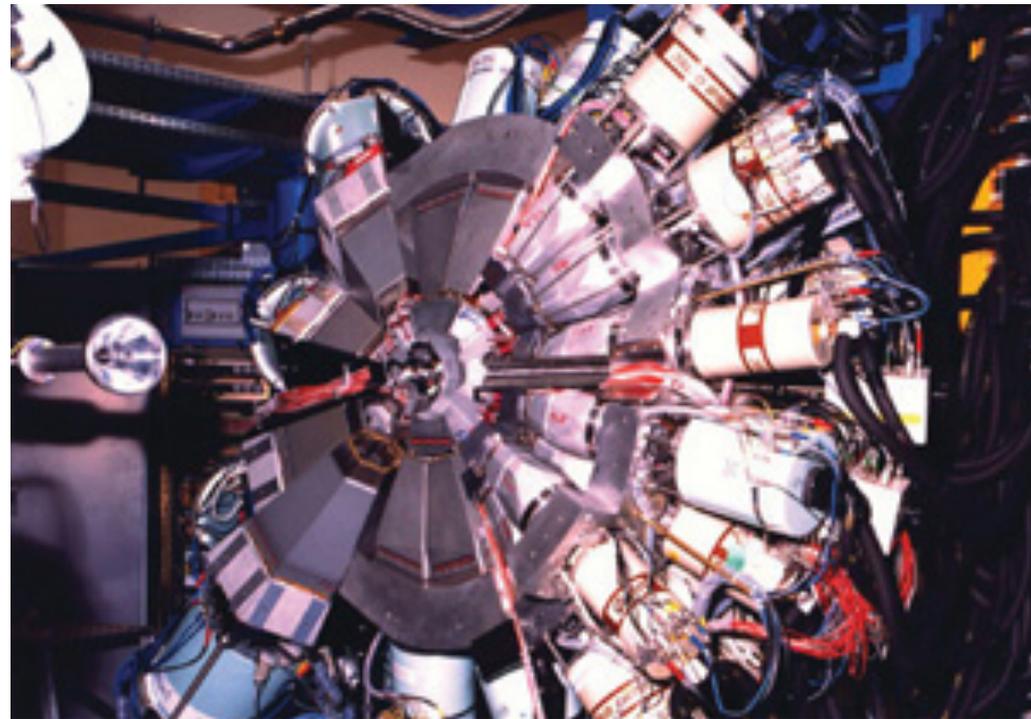
HPGe segmentados y compuestos

- Para mejorar la relación fotopico a compton y corregir mejor el '*doppler-shift*' es necesario seguir con precisión la trayectoria del γ : '*tracking*' \rightarrow detectores de Ge segmentados
- Además se construyen '*arrays*' de detectores para aumentar la eficiencia.



HPGe segmentados y compuestos

Exogam

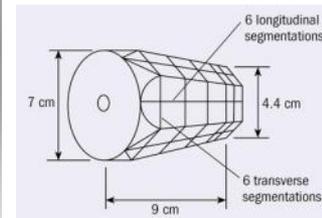
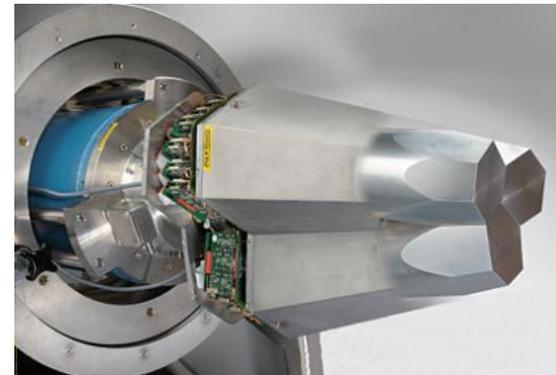
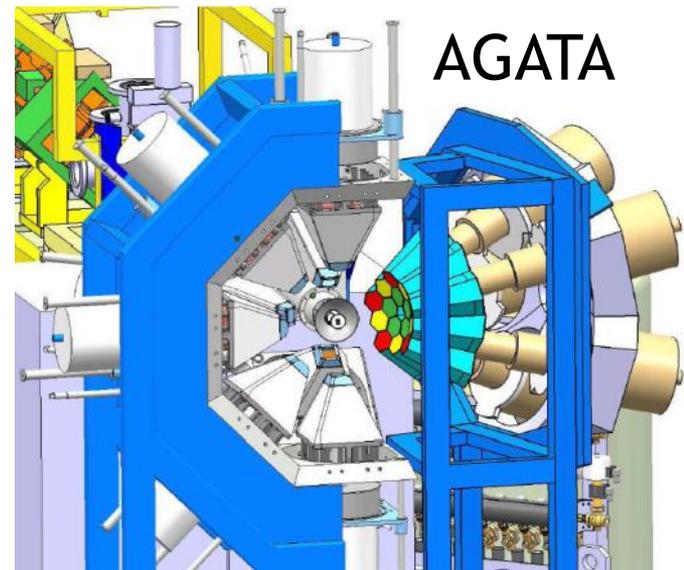


Euroball

HPGe segmentados y compuestos



Miniball

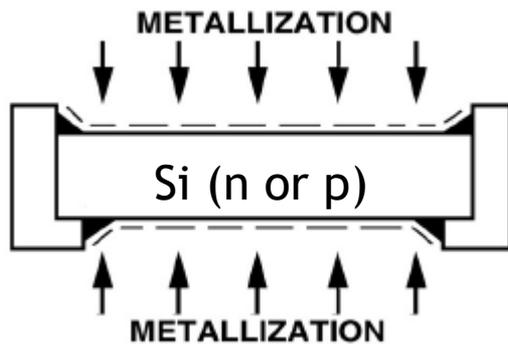


Detectores de Silicio

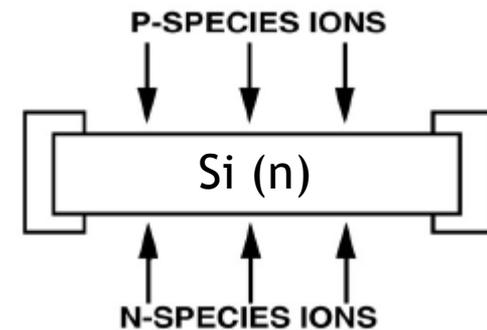
- El cristal semiconductor será Si, mucho más ligero que el Ge y con menor $Z \Rightarrow$ menor eficiencia de fotopico para rayos γ , pero mayor energía crítica para e^- y e^+ .
- Perfectos para detectar partículas cargadas con gran eficiencia y resolución.
- Mismos principios físicos de detección que los detectores de Ge, pero adecuados para partículas cargadas (y rayos X).
- Geometrías muy diferentes a los Ge: mucho más finos, se distinguen entre detectores continuos (planares) y detectores de bandas (strips)
- Al ser tan finos (5-1500 μm) cobra importancia el grosor del contacto \rightarrow 'dead layer' (0.1 μm)

Detectores de Silicio contínuos

- Oblea contínua de Si con contactos contínuos cubriendo toda la superficie a ambos lados. Los contactos son por implantación de iones o difusión y se disponen en geometría planar.



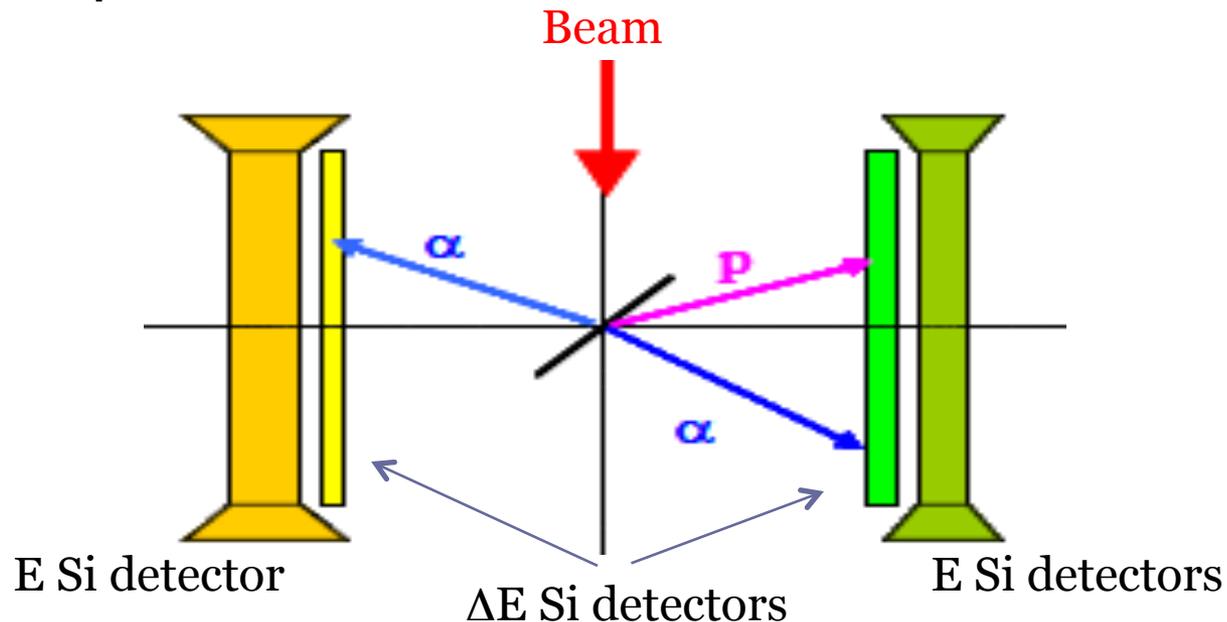
Detector de Si de barrera de superficie
Contactos por difusión de Au y Al



Detector de Si de iones implantados
Necesario proceso de
'annealing' (templado)

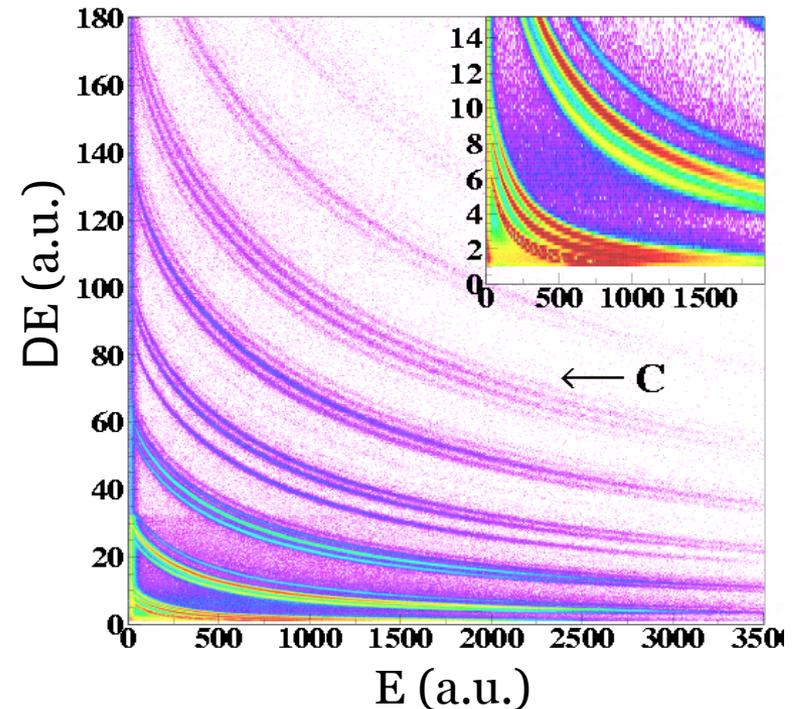
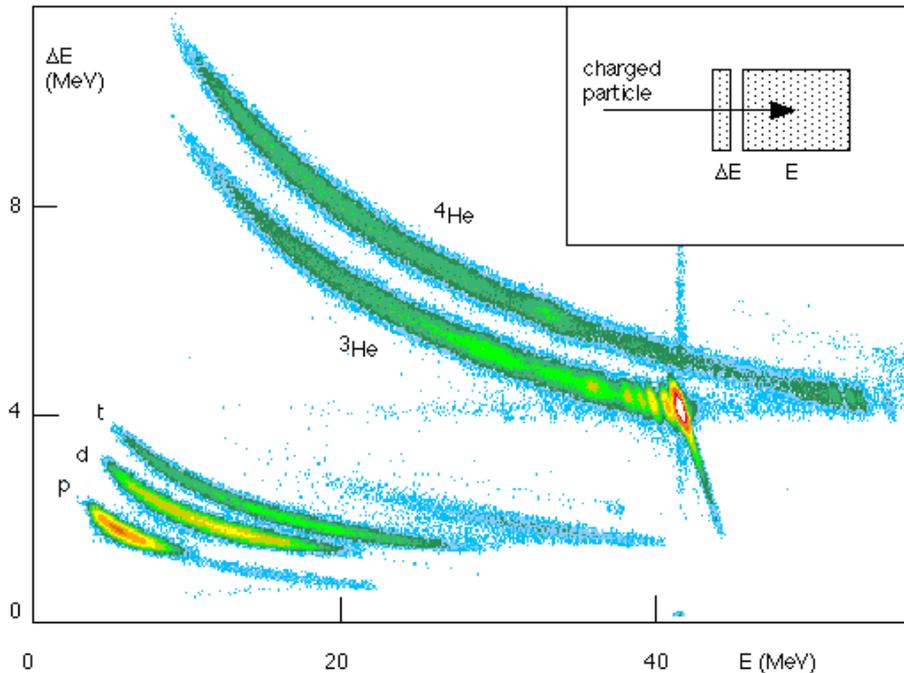
Telescopio de Silicio

- Configuración en telescopio: ΔE -E. Un detector fino (5-50 μm) que no detiene las partículas mide el ΔE , y otro más grueso (200-1500 μm) detrás las detiene por completo. Sumando la energía depositada en ambos se tiene E.



Identificación de partículas

- Fórmula de Bethe-Bloch \Rightarrow podemos identificar partículas por su relación $E-\Delta E$ en un telescopio de Si.

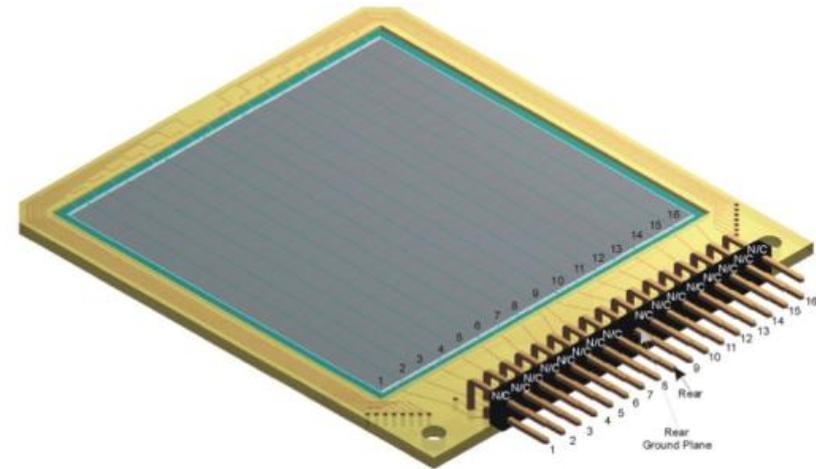
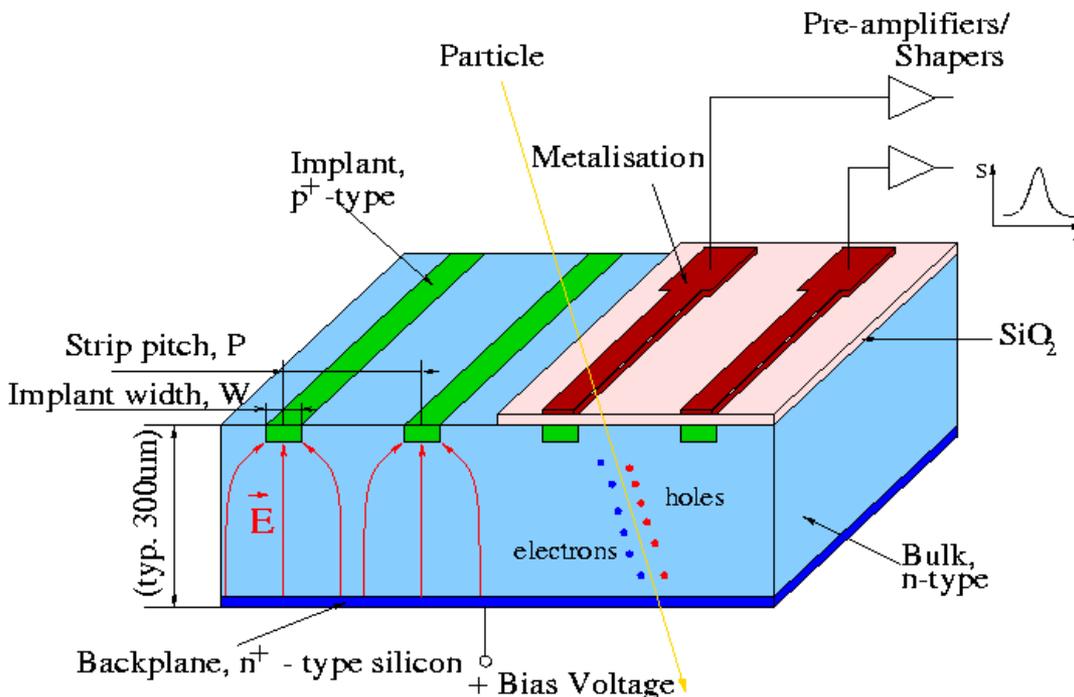


${}^3\text{He}(45 \text{ MeV}) + {}^{163}\text{Dy}$

Si telescope: 140 mm + 3 mm

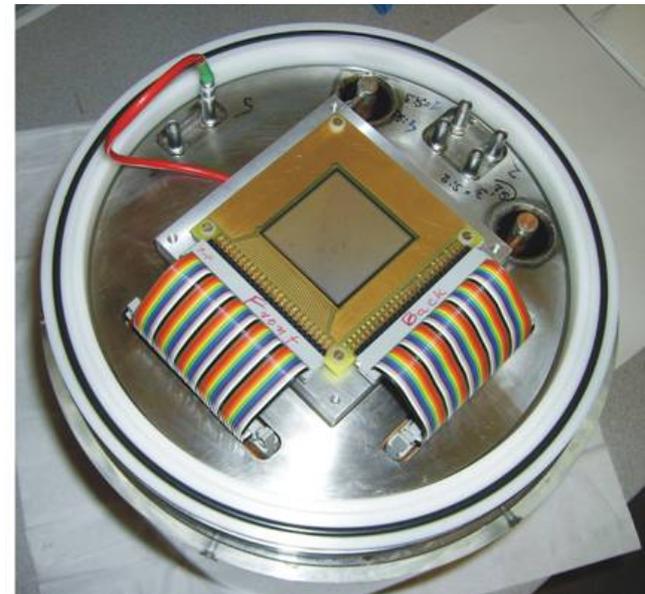
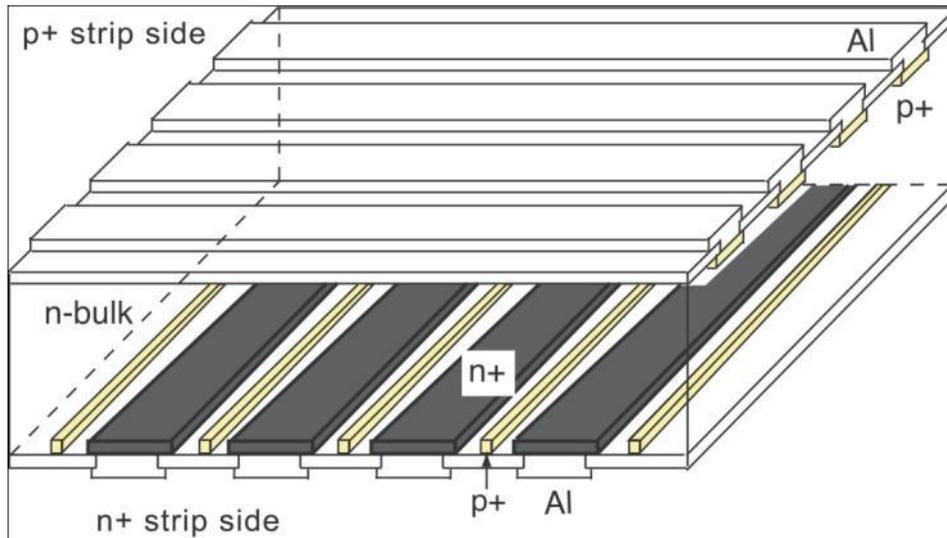
Detectores Silicio de bandas

- Se utiliza una oblea continua de Si, pero los contactos se hacen en forma de banda (strips). Si tienen bandas a un único lado se llaman SSSD (Single-Sided Si Strip Detector). Detectan la posición del impacto en 1D con precisión milimétrica.



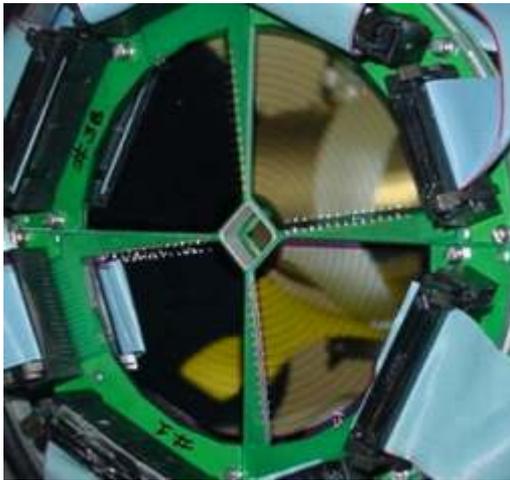
Detectores Silicio de bandas

- Si tienen bandas a ambos lados se llaman DSSD (Double-Sided Silicon Strip Detector). Detectan la posición del impacto en 2D con precisión milimétrica.



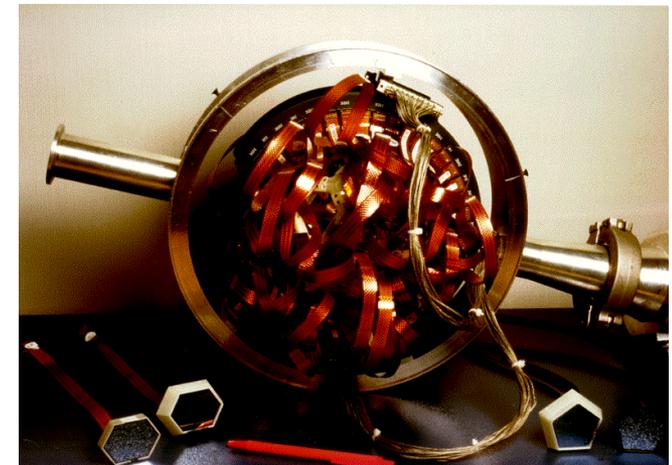
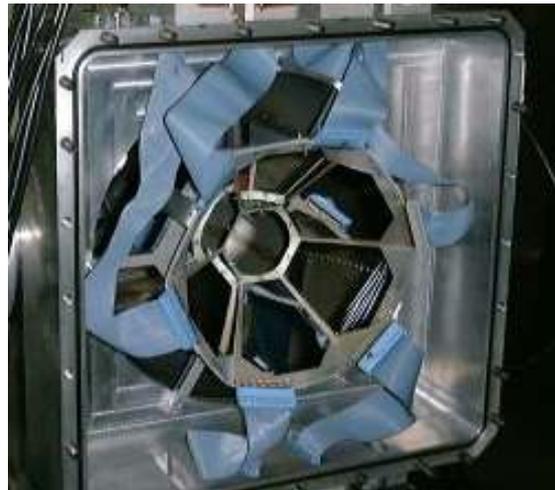
Arrays de detectores de Silicio

- Arrays con diferentes configuraciones se adaptan a distintos experimentos



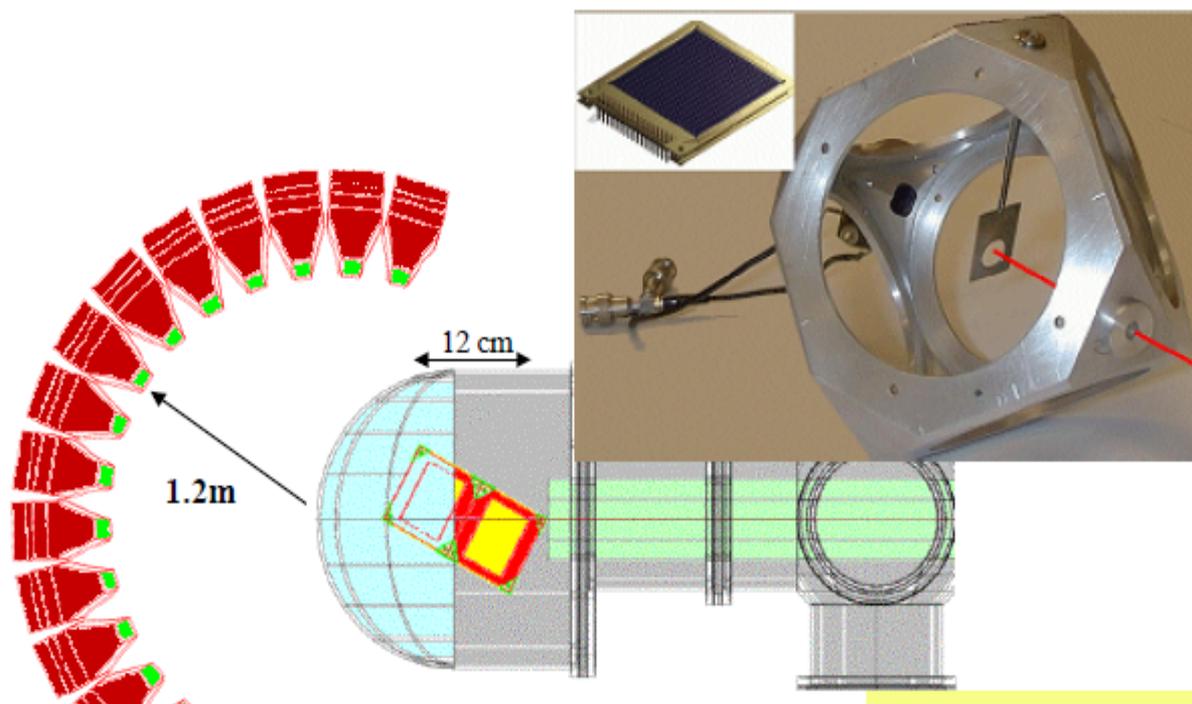
CD

EndCup



Bola

Setup con Det. De Si en el CERN



Charge particle detection

- ISOCO – cube
- Particle detection efficiency 50 %
 - Double coincidence 25 %
 - Triple coincidence 12 %
- Electron detection efficiency 25 %

■ 5 DSSSD (Si)

- 2x 60 μm (deadlayer 100nm)
- 60, 2x 300 μm (deadlayer 700 nm)
- 5x5 cm^2
- 256 pixels a 3x3 mm^2
- 32 readouts

3 E-detector (Si)

- 5x5 cm^2
- 1000, 1500 μm thick

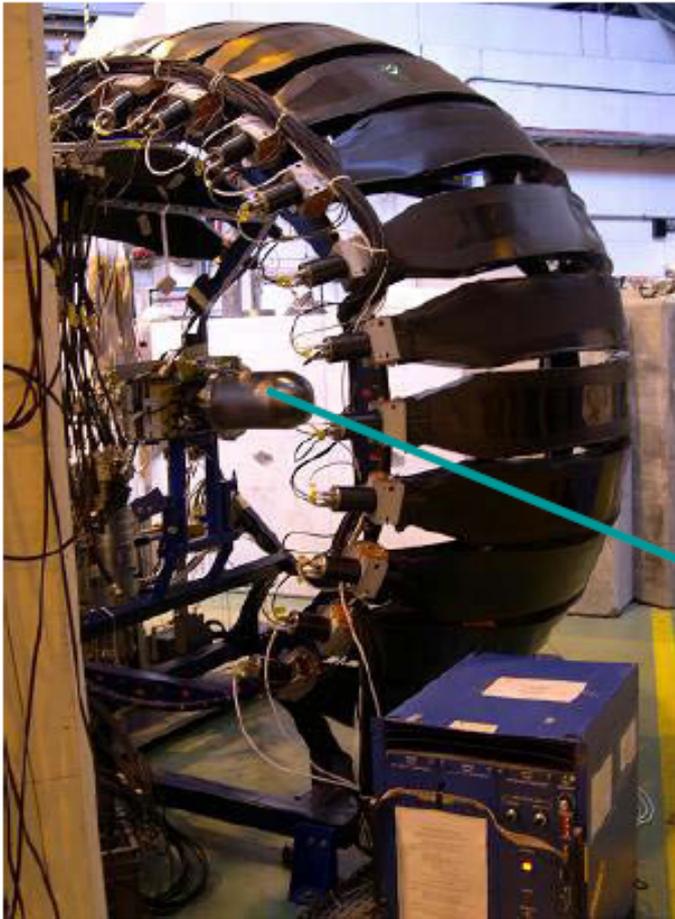
1 Monolithic (Si)

- Array of 25 detectors
- 3x3 mm^2
- ΔE : 1 μm
- E: 300 μm

Setup con Det. De Si en el CERN

ISOLDE experimental hall, beam line LA1, ending with a bell shaped vacuum chamber.

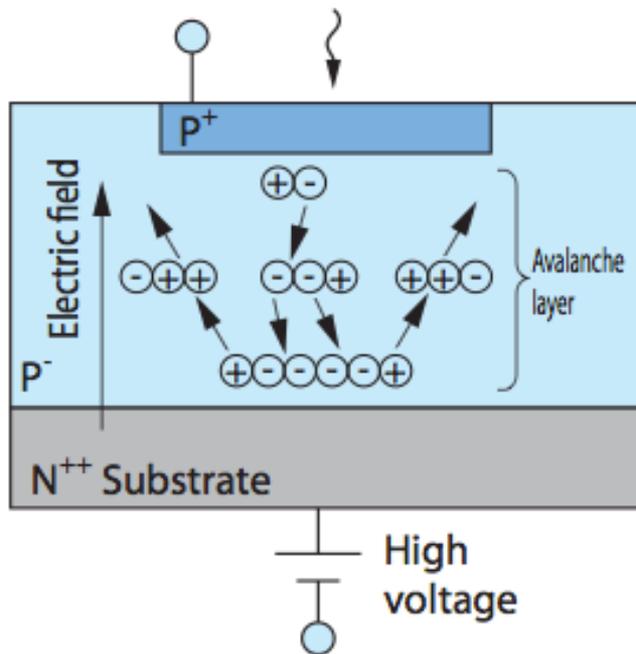
The black paddles in the frame surrounding the vacuum chamber are parts of the TONNERRE n-ToF detector applied here to detect delayed neutrons in coincidence with charged particles.



APD's y SiPM's

- APD: Fotodiodo de Avalancha

- 1er electrón producido por efecto fotoeléctrico en el contacto p⁺
- Se acelera y crea pares e-h que a su vez se aceleran en un campo eléctrico muy grande debido a la corta distancia entre los electrodos y producen nuevos pares e-h...: se produce una avalancha



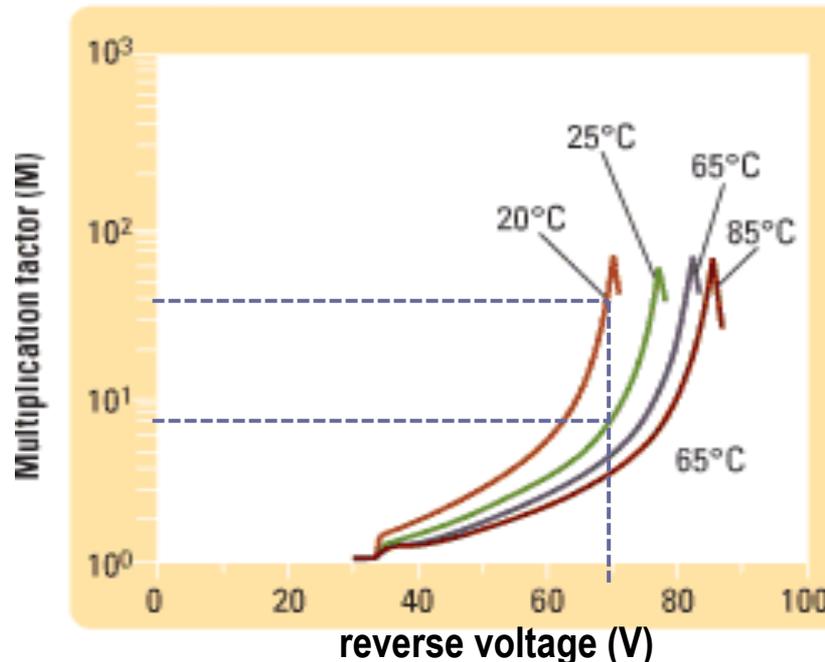
- Área activa: 10x10 mm²
- Eff. Cuántica: 85%
- Ganancia:
100 a 200V (m. proporcional)
10⁵-10⁶ a 1500V (m. Geiger)

APD's y SiPM's

- APD: Fotodiodo de Avalancha

- 1er electrón producido por efecto fotoeléctrico en el contacto p⁺
- Se acelera y crea pares e-h que a su vez se aceleran en un campo eléctrico muy grande debido a la corta distancia entre los electrodos y producen nuevos pares e-h...: se produce una avalancha

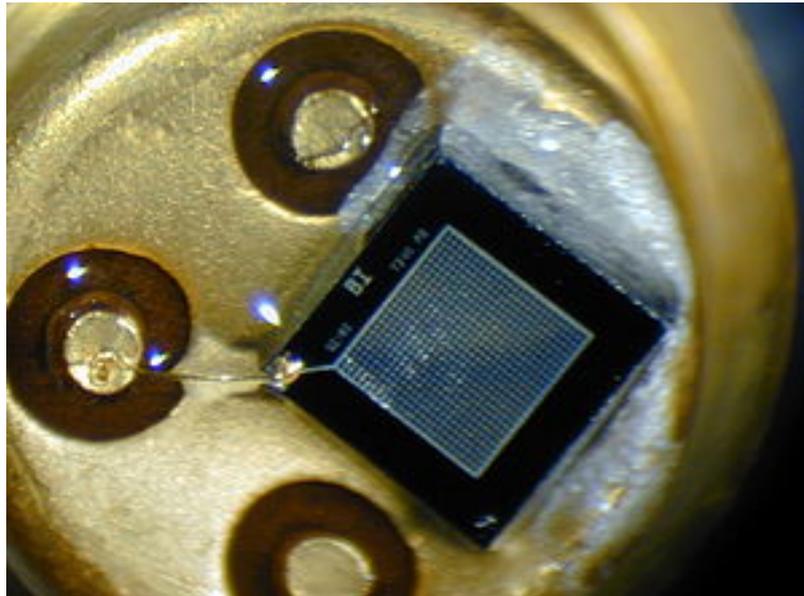
Multiplication factor vs. reverse voltage



- En modo proporcional la ganancia depende fuertemente de la temperatura

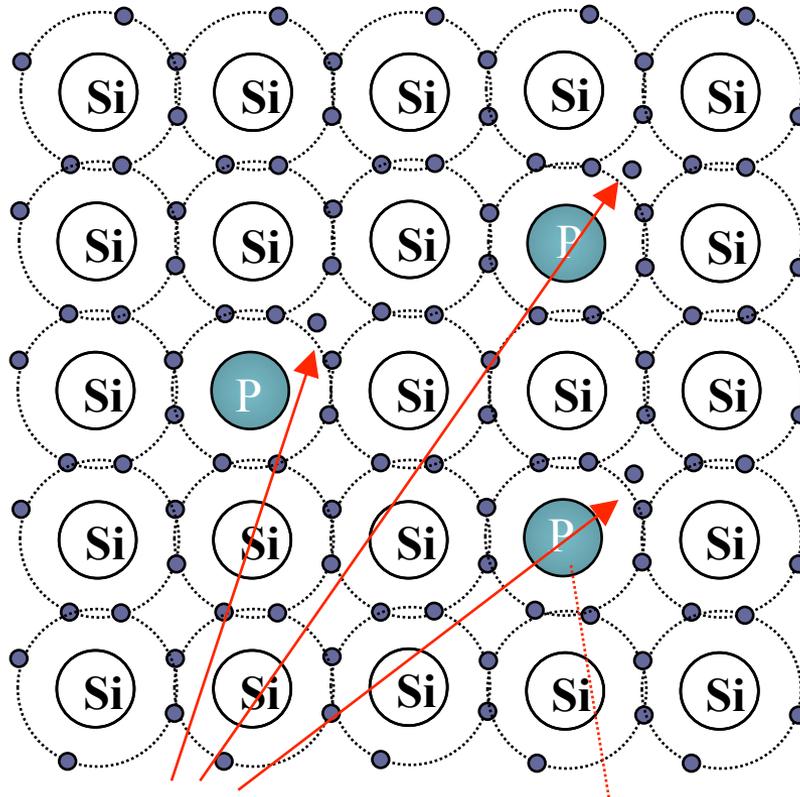
APD's y SiPM's

- Fotomultiplicadores de Silicio (SiPM, MPPC, SPAD...)
 - Matriz de APD's funcionando en modo Geiger
 - Sirve para contar fotones individuales (cada APD dispara a la llegada de un fotón).



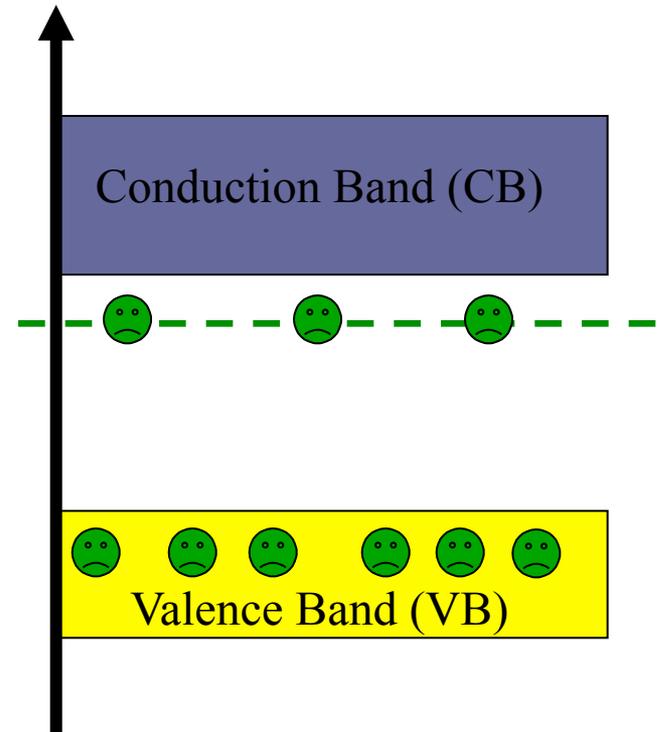
- APD's de 20 a 100 μm
(matrices de 1000 APD's
por mm^2)

n^+ silicon - donor states



Excess electron (-)

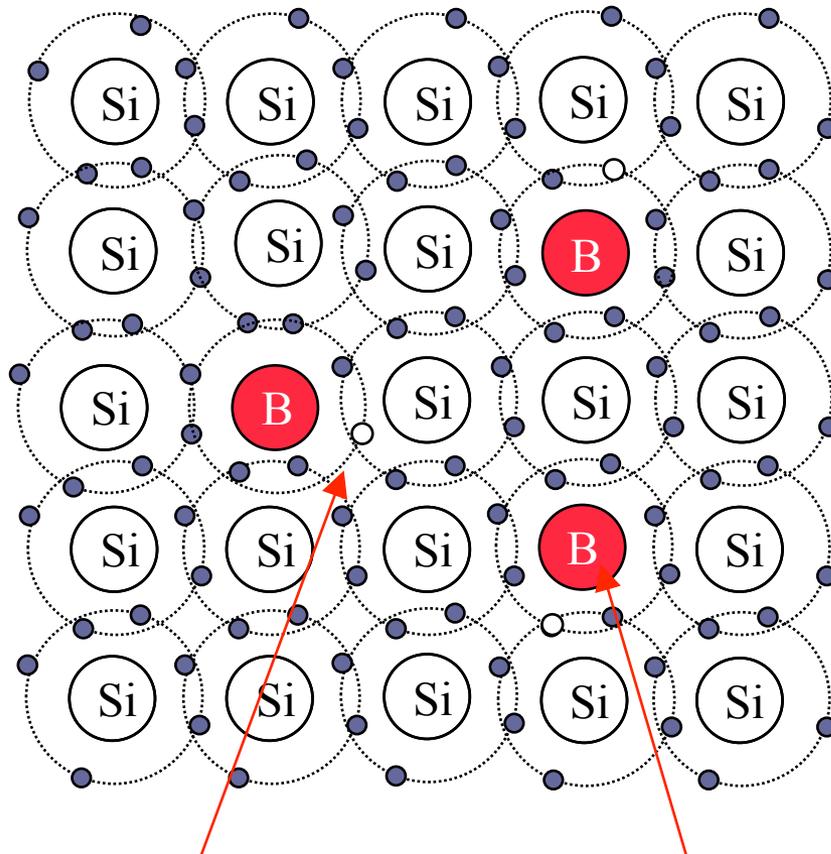
Phosphorus atom serves as n-type dopant



Donor states are formed just below the conduction band

Donor atoms provide excess electrons to form n-type silicon.

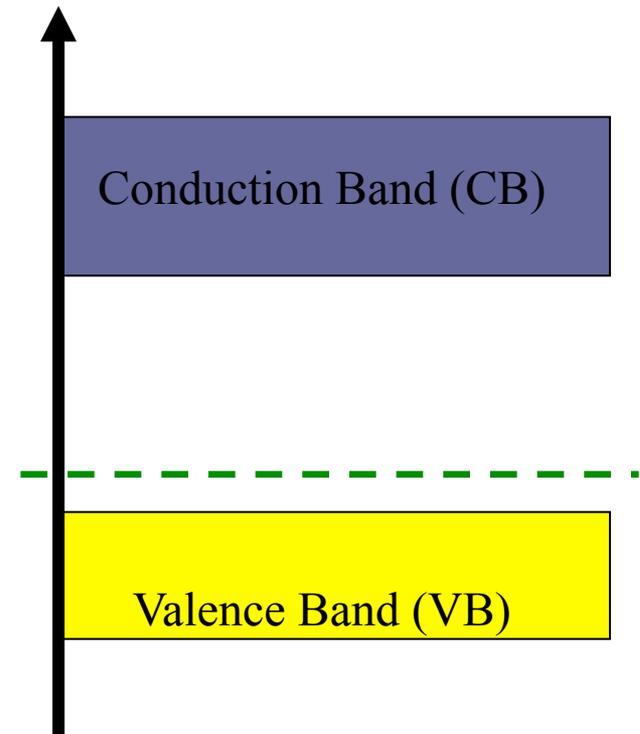
p⁺ silicon - acceptor states



+ Hole

Boron atom serves as p-type dopant

Acceptor atoms provide a deficiency of electrons to form p-type silicon.



Acceptor states are formed just above the valence band