

IEM



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

CSIC

Máster Interuniversitario de Física Nuclear 2025

DETECTORES α , β , γ

Luis Acosta

IEM-CSIC, Spain

DETECTOR (Concepto)

- El término **detector** hace referencia a aquel dispositivo capaz de percibir cierto fenómeno físico, tal como la presencia de humo proveniente de un incendio, la existencia de un gas en el aire y la presencia de un intruso en una vivienda.
- En el ámbito del *control de procesos*, se llama detector a un sensor que solamente es capaz de distinguir entre dos posibles valores o estados del sistema que se mide, por lo cual también recibe el nombre de *sensor binario* o *sensor todo/nada*.

Algunas variables (a medir e identificar)

- Poder de frenado (espesor del material atravesado)
- Masa
- Carga
- Momento
- Velocidad
- Periodo de desintegración
- Energía
- Tiempo
- Etc...

¿Cómo detectamos partículas y/o fotones?

- Necesitamos percibir su existencia, no apreciable con la vista ni siquiera en el visible (la luz no ilumina los átomos).
- La forma más simple es hacer interaccionar un fotón, o un electrón o un ion con algún material, y buscar alguna variable medible de su interacción.
- Entonces, un detector de radiación ionizante parte siempre de un determinado material, capaz de interaccionar con dicha radiación y producir una reacción medible (luz, carga, calor, reacción nuclear, reacción química)... cualquier cosa que pueda parametrizar con un tercer elemento.

Tipos de radiación ionizante

- **Radiación alfa (o partículas alfa).**

- La radiación alfa es una partícula que consiste de dos protones y dos neutrones y que se moviliza muy rápido y por lo tanto posee una gran cantidad de energía cinética o energía motora.

- Los dos protones y neutrones hacen a la partícula alfa idéntica a un átomo de helio, pero sin los electrones.

- Aunque es demasiado pequeña para poder verse con el más poderoso de los microscopios, es grande comparada a una partícula beta.

- Los protones le confieren una fuerte carga positiva que atrae fuertemente a los electrones de otros átomos de los que pasa cerca. Cuando la partícula alfa pasa cerca de un átomo, excita a sus electrones y puede remover un electrón de este átomo, lo que constituye el proceso de ionización.

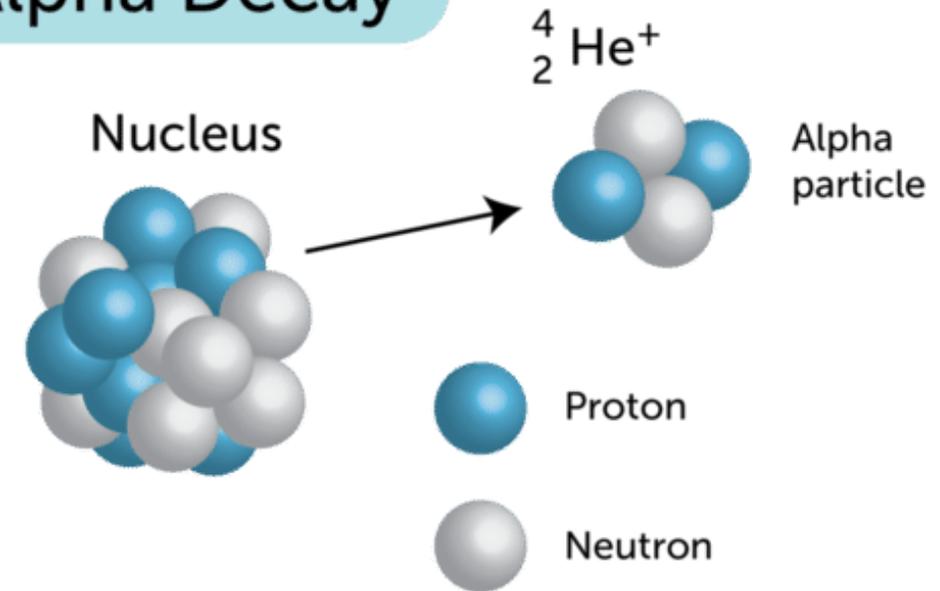
- Este proceso ocurre cada vez que una partícula alfa remueve un electrón de un átomo que se encuentra en su camino. Con cada ionización, la partícula alfa pierde cierta energía y velocidad.

- Finalmente remueve dos electrones de otro átomo al final de su destino y se transforma en un átomo de helio. El helio no tiene ningún efecto en el cuerpo.

- Debido a la enorme masa y carga eléctrica, las partículas alfa ionizan fuertemente al tejido. Si la partícula alfa proviene de un material radiactivo fuera del cuerpo, perderá toda su energía antes de atravesar la capa más externa de la piel. Esto significa que usted puede exponerse a radiación alfa solamente si incorpora radiación alfa en el cuerpo (por ejemplo, si la respira o la ingiere en los alimentos o el agua).

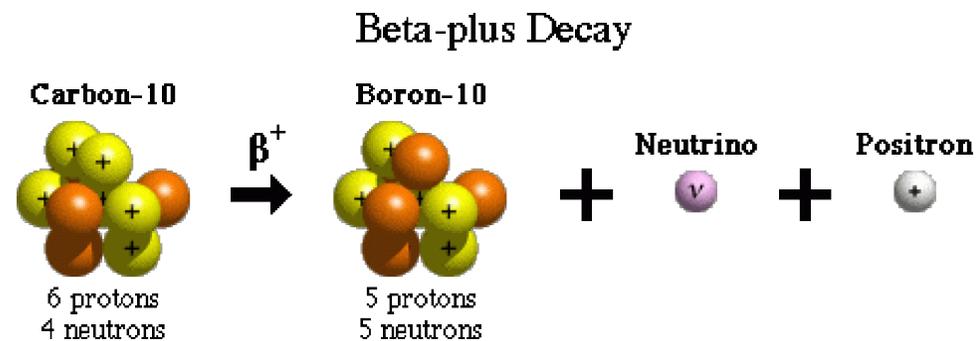
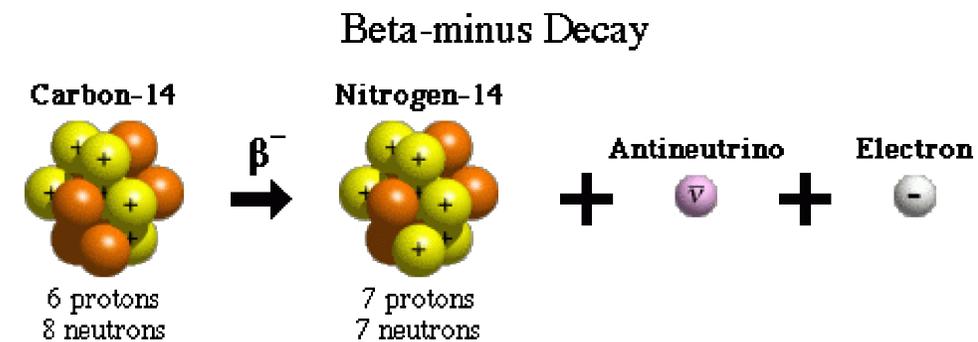
- Una vez dentro de su cuerpo, este material radiactivo puede mezclarse con el contenido del estómago y los intestinos, pasar a la corriente sanguínea, incorporarse a una molécula, y finalmente depositarse en tejido como por ejemplo los huesos. Las partículas alfa generadas por este material radiactivo pueden dañar a este tejido.

Alpha Decay



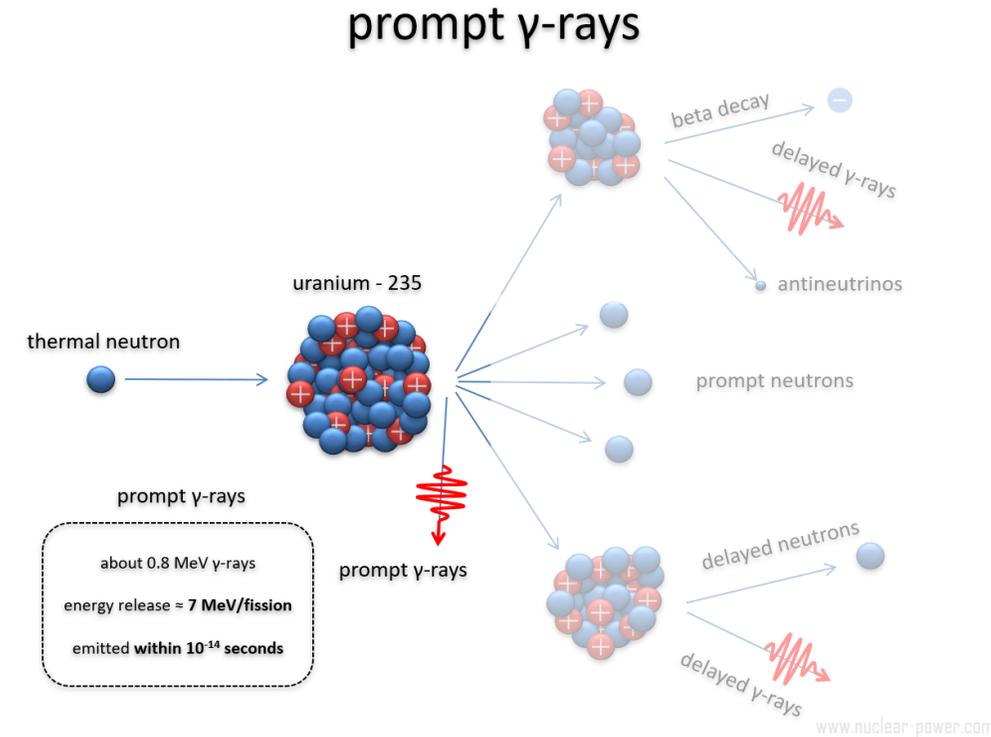
Tipos de radiación ionizante

- Radiación beta (o partículas beta).
- Las partículas beta son electrones de alta energía que algunos materiales radiactivos emiten cuando se transforman.
- Las partículas beta se forman de una de dos maneras, dependiendo del material radiactivo que las genera. Como resultado, tendrán ya sea una carga positiva o una carga negativa.
- La mayoría de las partículas beta están cargadas negativamente. Son mucho más livianas y penetrantes que las partículas alfa. Su poder de penetración depende de su energía.
- La mayoría tiene suficiente energía como para atravesar la capa externa de la piel e irradiar el tejido que está debajo.
- Usted también puede estar expuesto a la radiación beta desde el interior del cuerpo si el radionucleido que emite la radiación pasa al interior del cuerpo.
- Una partícula beta pierde su energía cuando excita e ioniza a los átomos que encuentra en su camino. Cuando ha usado toda su energía cinética, una partícula beta (negatrón) se transforma en un electrón común y no tiene ningún efecto en el cuerpo.
- Una partícula beta positiva (positrón) choca con un electrón con carga negativa de la cercanía y este par, electrón/positrón, se convierte en un par de rayos gama llamados radiación de aniquilamiento, que puede interactuar con otras moléculas en el cuerpo.



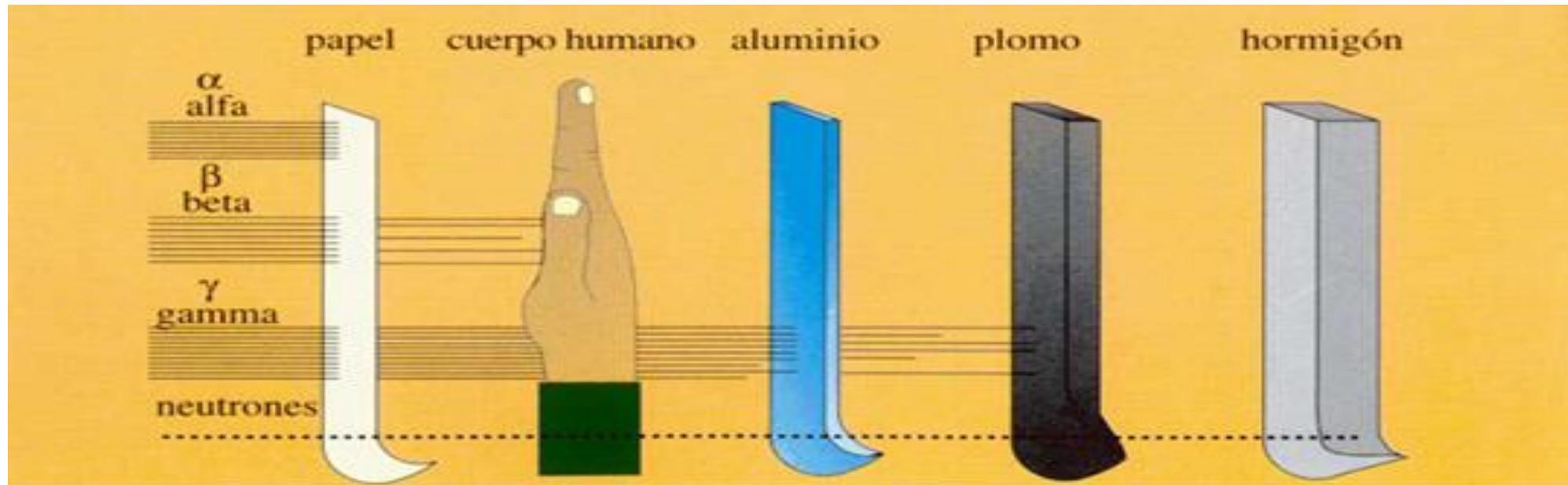
Tipos de radiación ionizante

- **Radiación gama (o rayos gama).**
- A diferencia de la radiación alfa y beta, la radiación gama no es una partícula, sino que es un rayo.
- Es el tipo de luz que usted no puede ver, como las ondas de radio, luz infrarroja, luz ultravioleta y los rayos X.
- Cuando un átomo radiactivo se transforma emitiendo partículas alfa o beta, puede que también emita uno o más rayos gama para liberar cualquier exceso de energía.
- Los rayos gama son paquetes de energía que no poseen carga o masa. Esto les permite viajar distancias muy largas a través del aire, tejidos corporales y otros materiales.
- Se movilizan una distancia tanto más larga que las partículas alfa o beta que la fuente de rayos gama no necesita estar localizada en el interior del cuerpo o cerca de la piel.
- La fuente de rayos gama puede estar relativamente lejos, por ejemplo en forma de materiales radiactivos en materiales de construcción que están cerca, en el suelo o el asfalto.
- Un rayo gama puede atravesar el cuerpo sin hacer contacto con nada, o puede que choque con un átomo y le dé al átomo toda o parte de su energía.
- Normalmente esto remueve un electrón del átomo (y lo ioniza). Este electrón usa la energía que recibió del rayo gama para ionizar a otros átomos removiendo también electrones de ellos.
- Debido a que un rayo gama es puramente energía, una vez que pierde toda su energía, deja de existir.

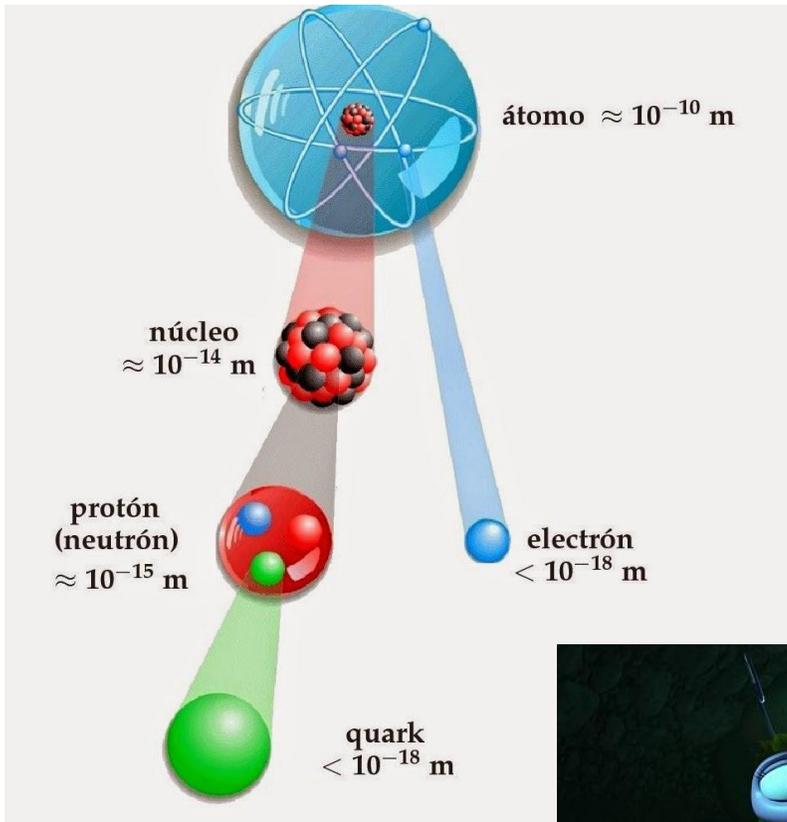


Radiación Ionizante

- Las radiaciones emitidas pueden ser electromagnéticas:
 - en forma de rayos X o **rayos gamma**.
- o bien corpusculares:
 - como pueden ser núcleos de helio, electrones o positrones, protones u otras.

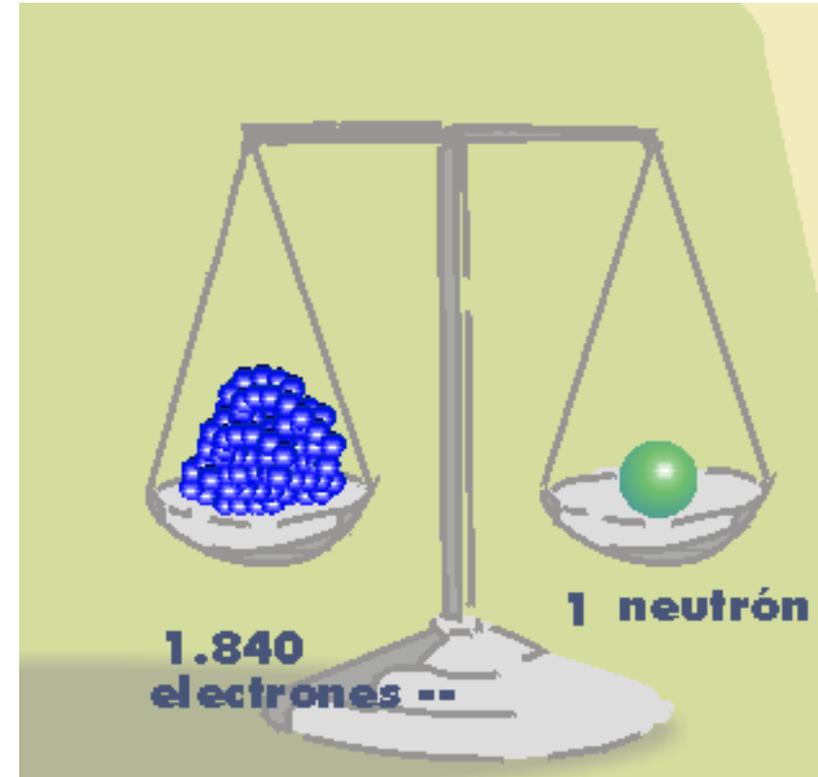
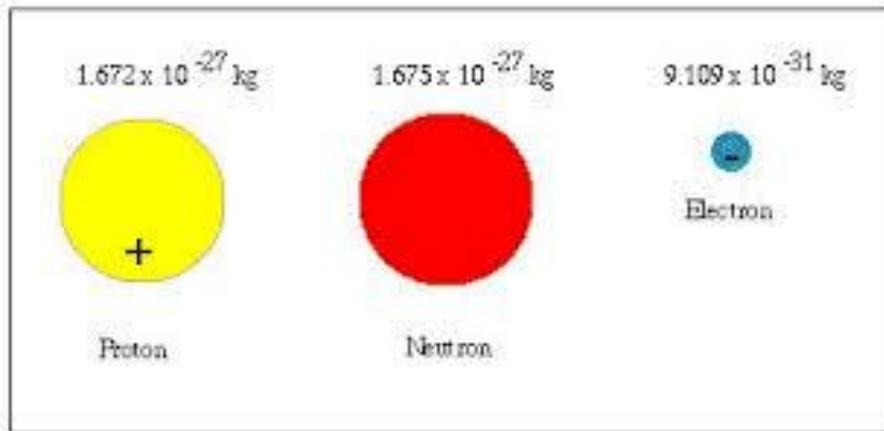


Dimensiones



Masa y Carga

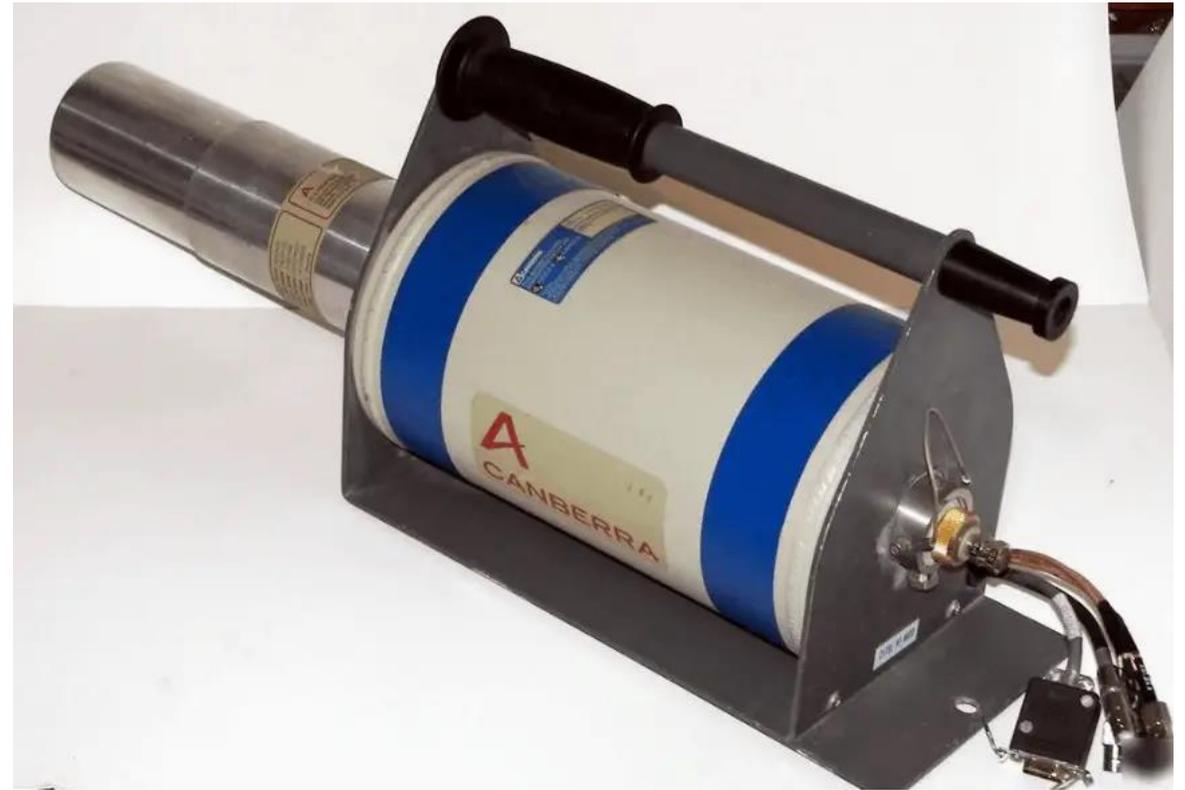
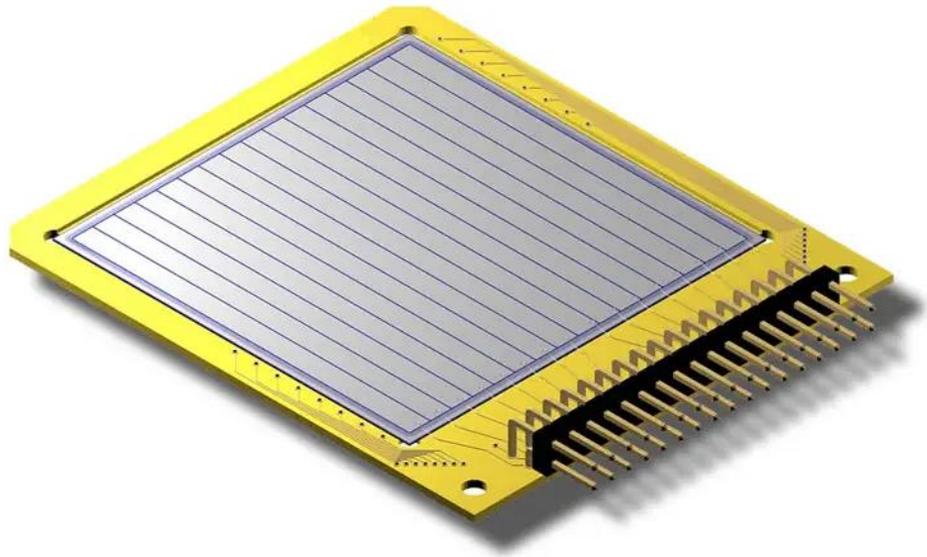
Partículas subatómicas básicas		
	Carga (C)	Masa (Kg)
Electrón	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$9,109 \cdot 10^{-31}$
Protón	$+1,6 \cdot 10^{-19}$	$1,673 \cdot 10^{-27}$
Neutrón	0	$1,675 \cdot 10^{-27}$



Conclusión:

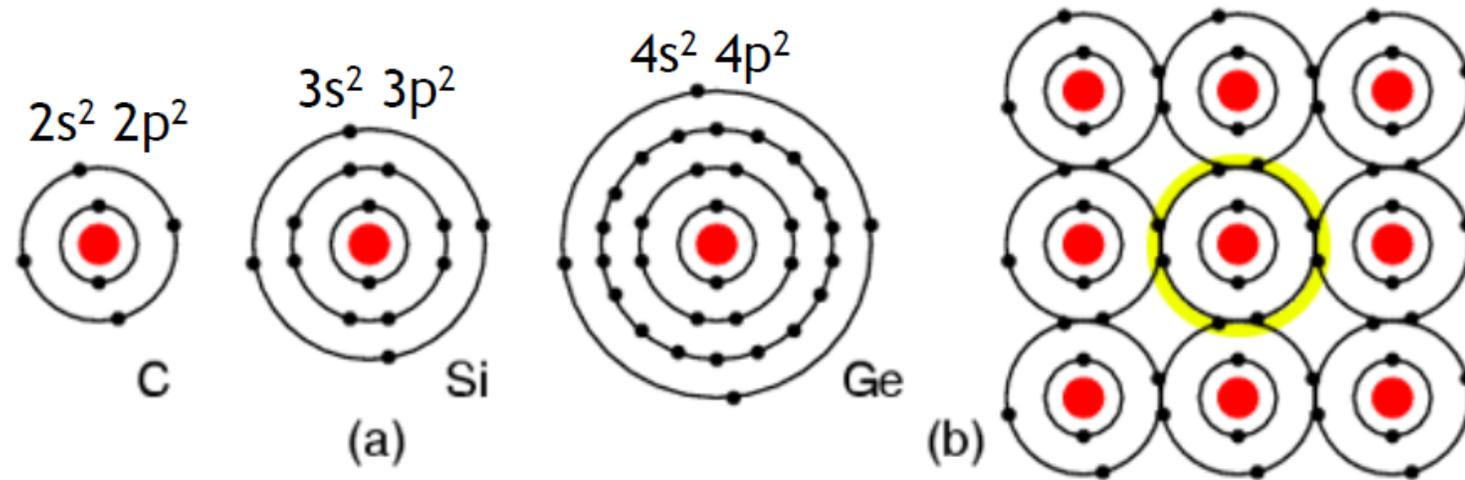
En términos prácticos en Física Nuclear, nos olvidamos de los electrones (excepto en la desintegración beta).
-si hacemos colisiones entre átomos, decimos que las hacemos entre "núcleos"
De acuerdo a la masa y la carga de cada átomo, éstos reciben un nombre, los llamados "elementos".

Detectores semiconductores



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.



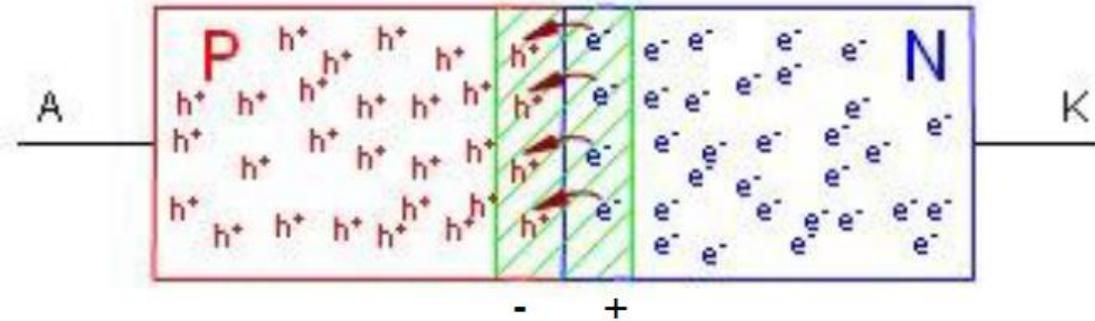
C, Si, Ge having 4 electrons in the valence shell, complete the valence shell by sharing electrons with other elements.

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

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.

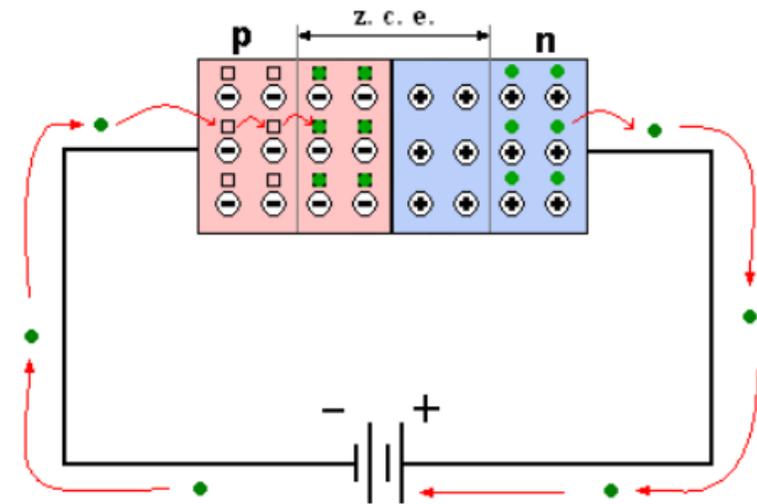
- La unión pn:



- 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.

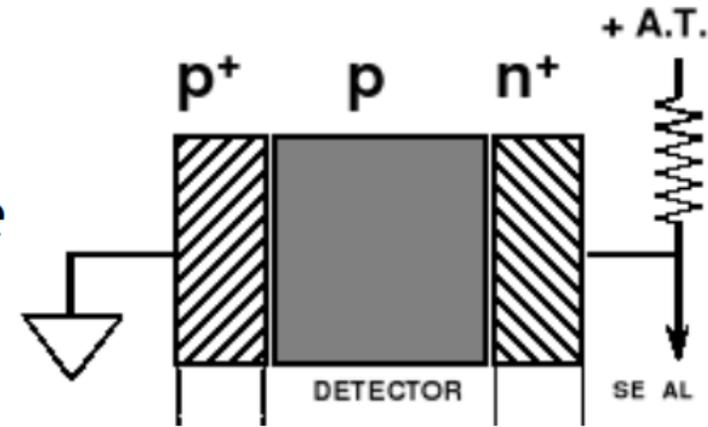
La unión pn

- 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



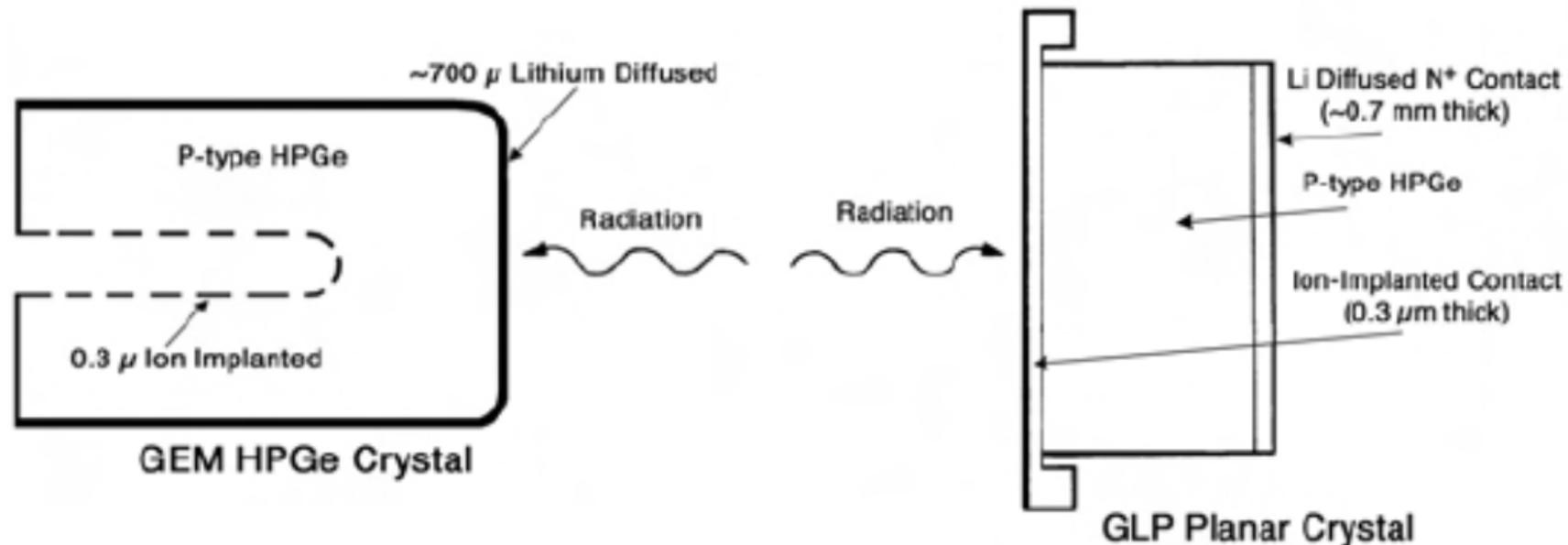
La unión pn en detectores reales

- 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).



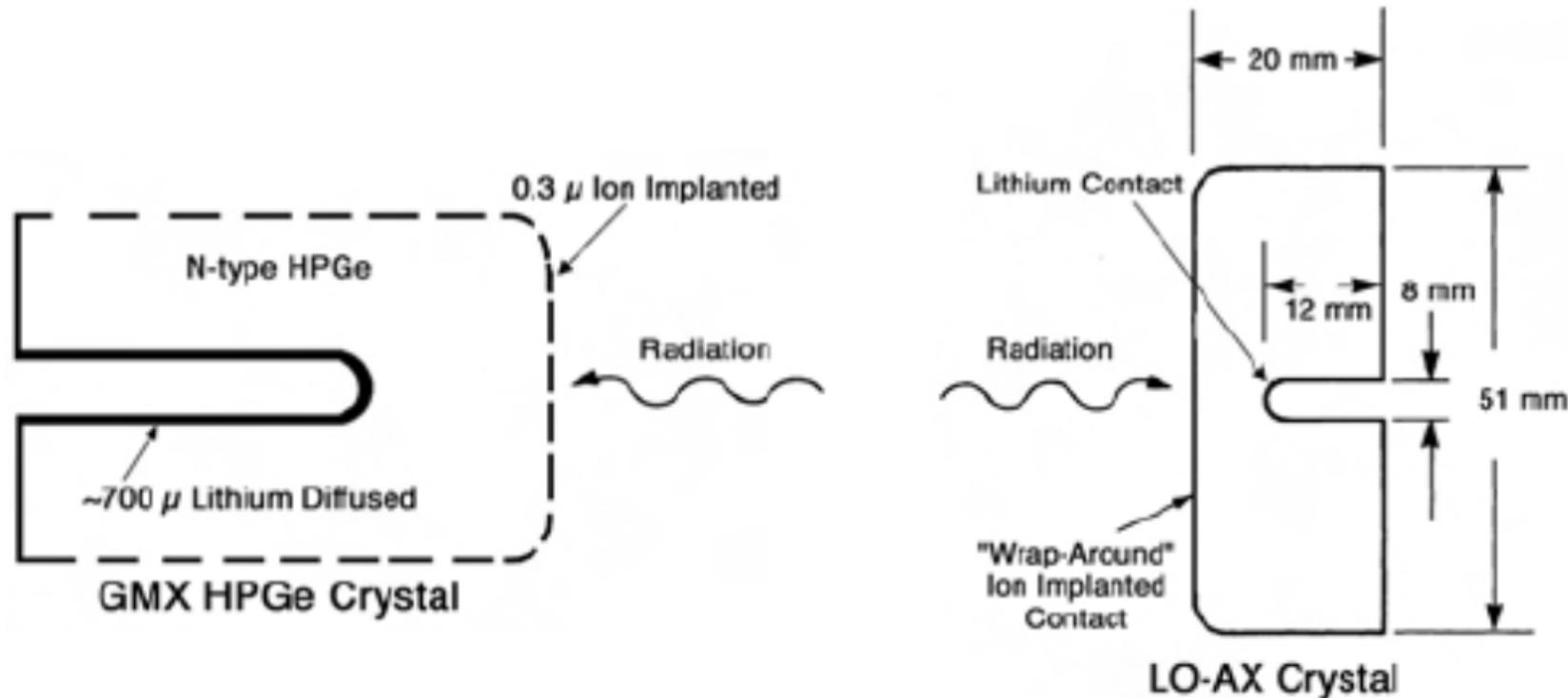
Detectores de Germanio (HPGe)

- 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^+).



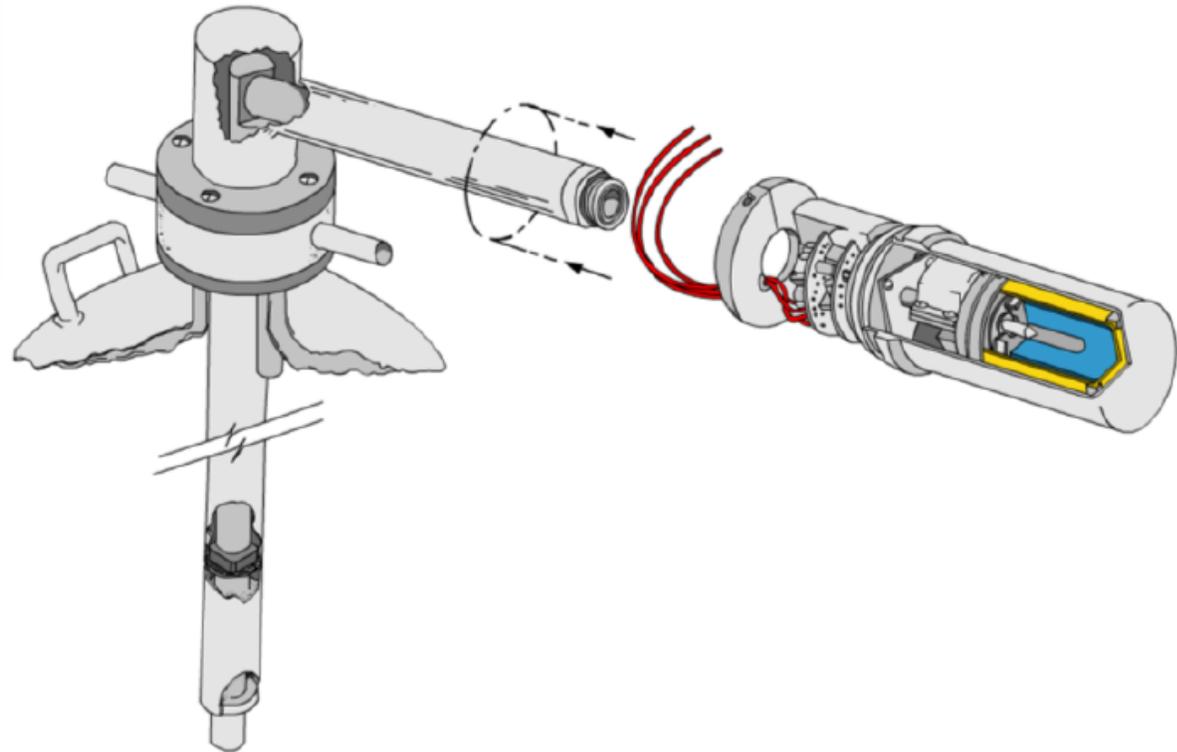
Detectores de Germanio (HPGe)

- 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.



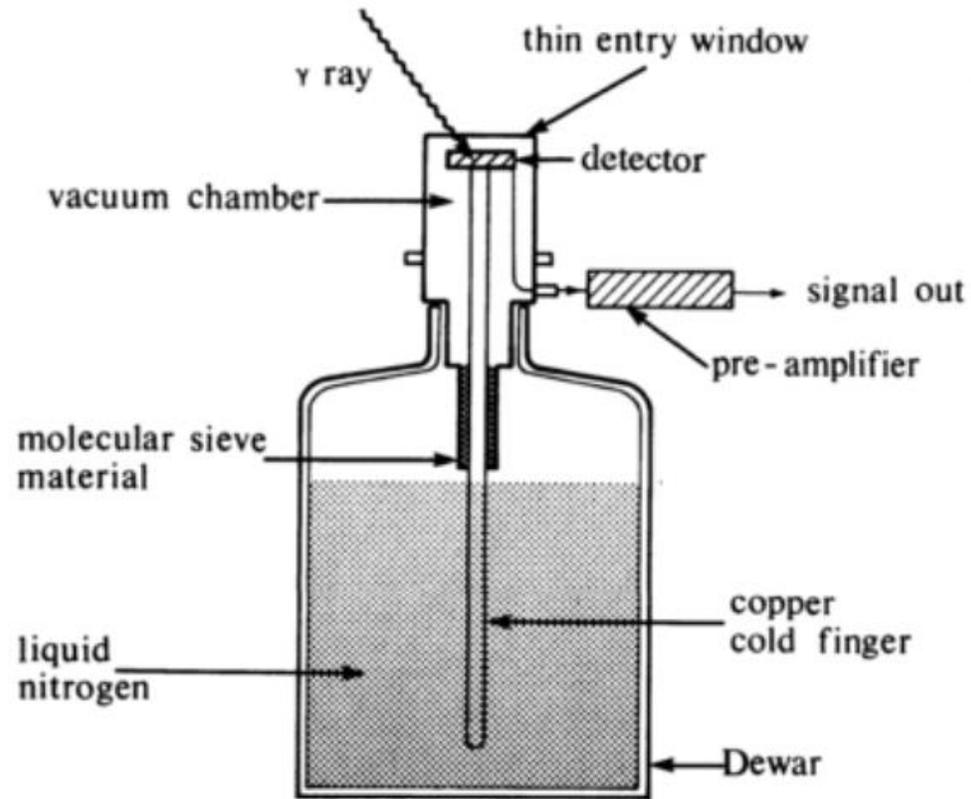
Detectores de Germanio (HPGe)

- Refrigeración a través de un criostato.



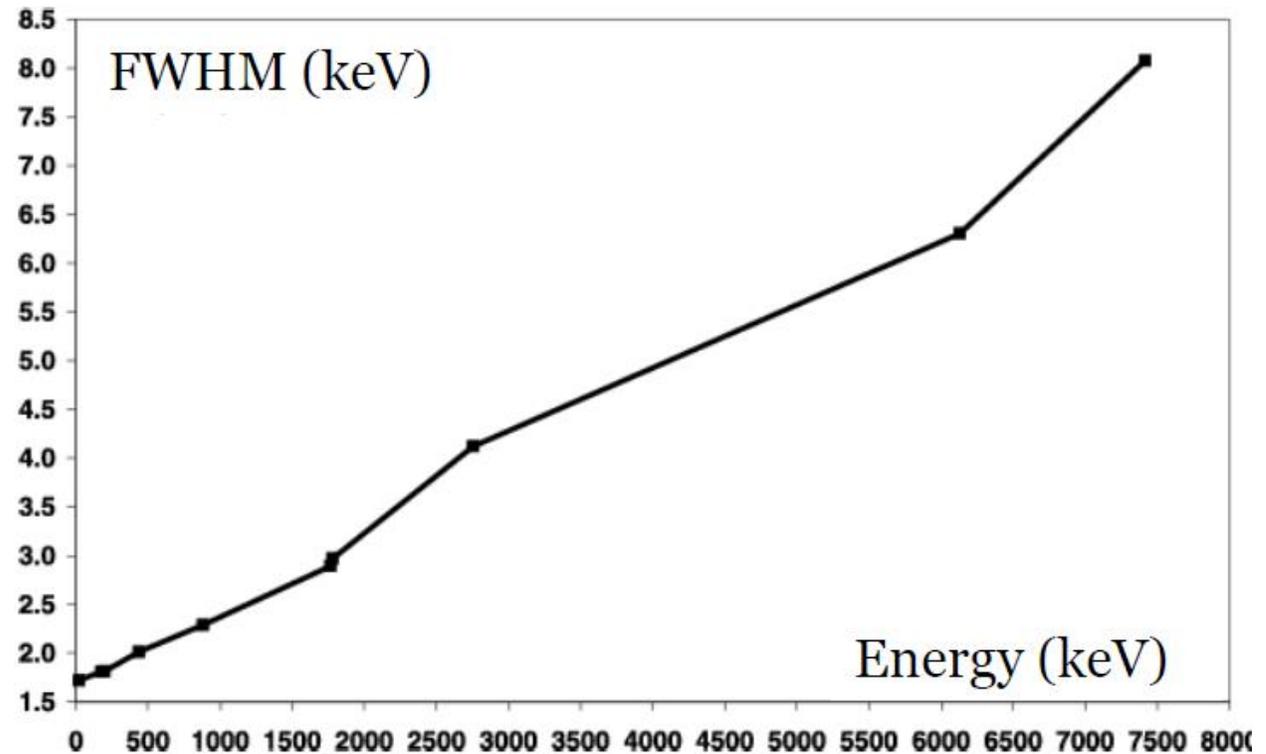
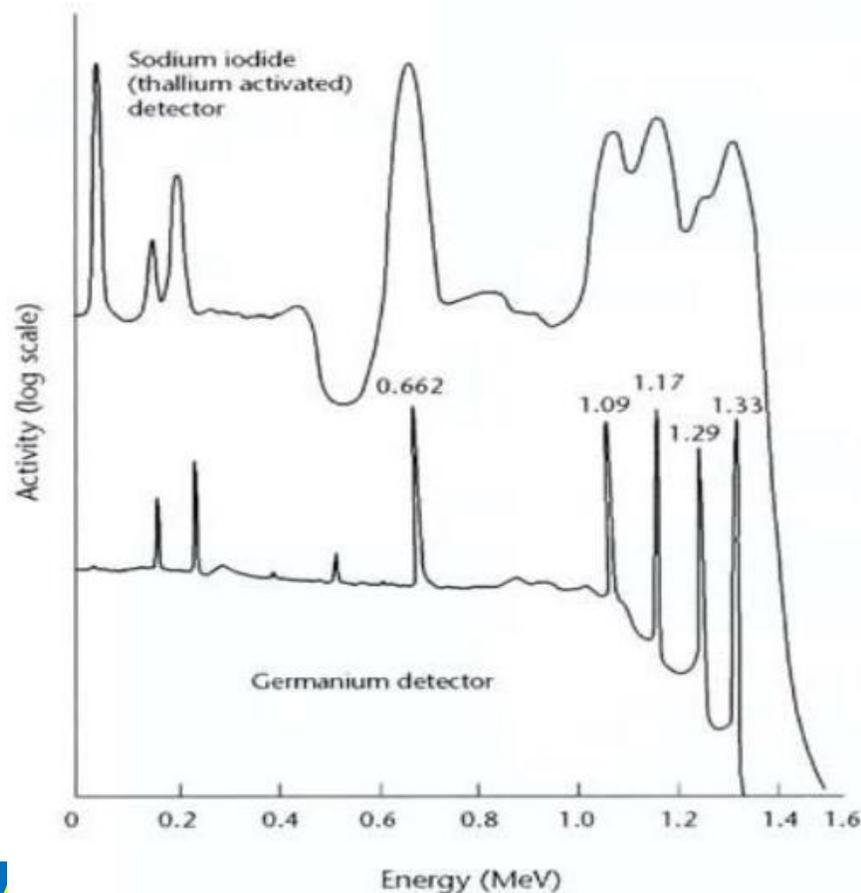
Detectores de Germanio (HPGe)

- Refrigeración a través de un criostato.



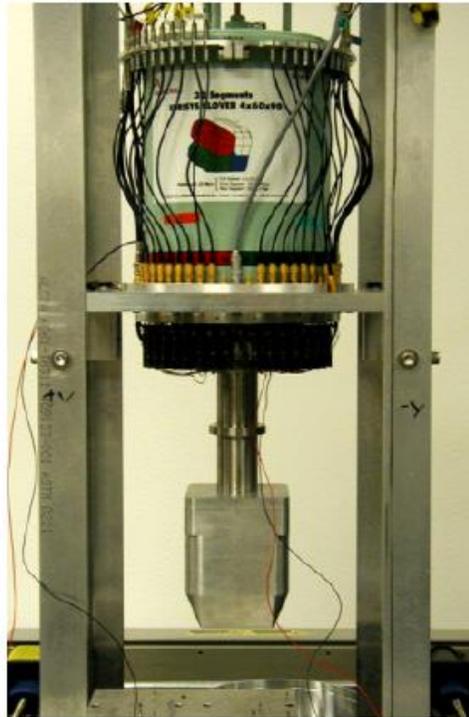
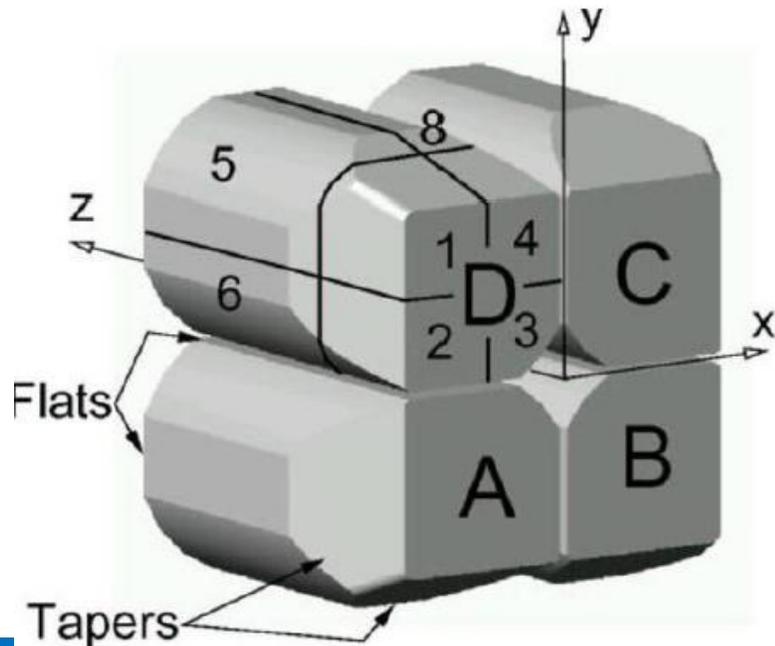
Resolución energética de los HPGe

- 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.



HPGe segmentados y compuestos

- Para mejorar la relación fótónica 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.



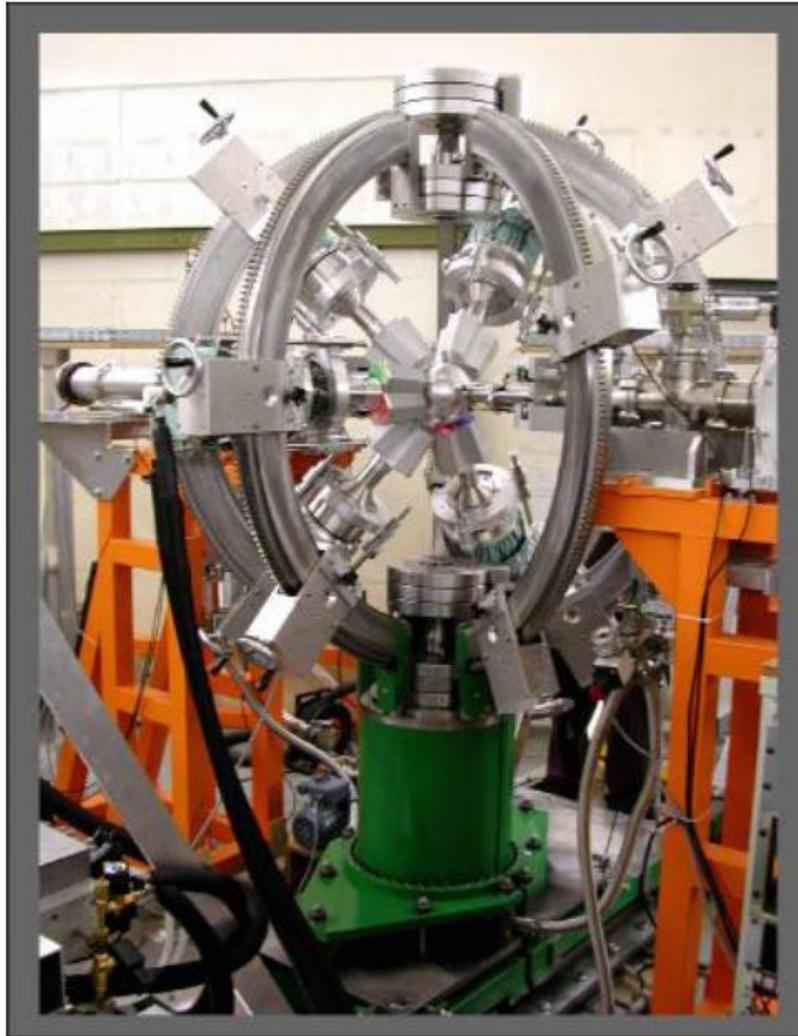
HPGe segmentados y compuestos

Exogam

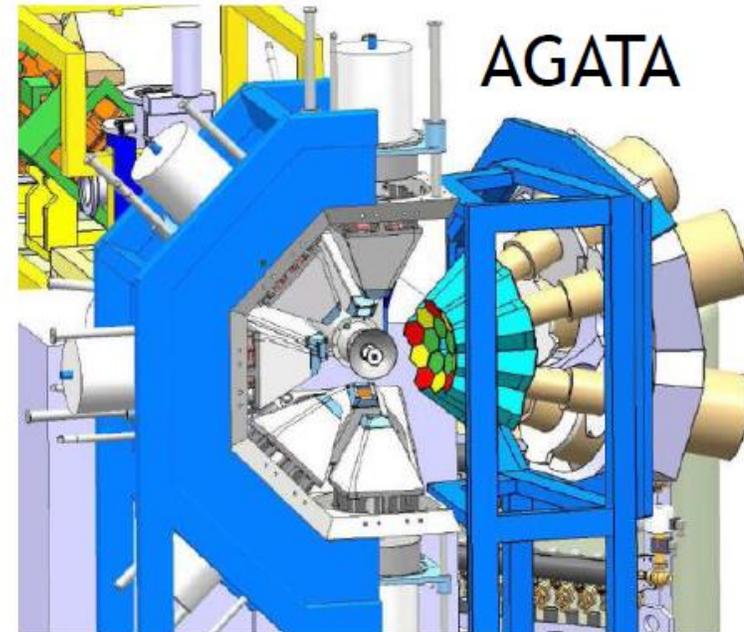


Euroball

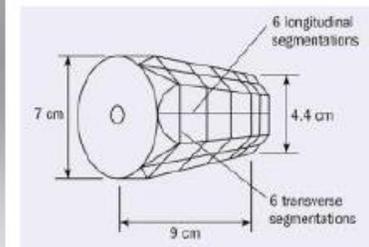
HPGe segmentados y compuestos



Miniball



AGATA



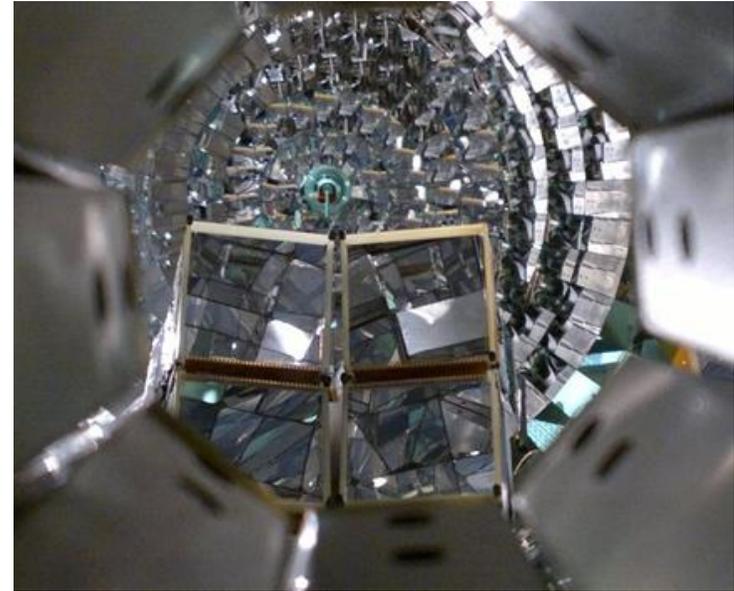
Detectores de Silicio

- 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)

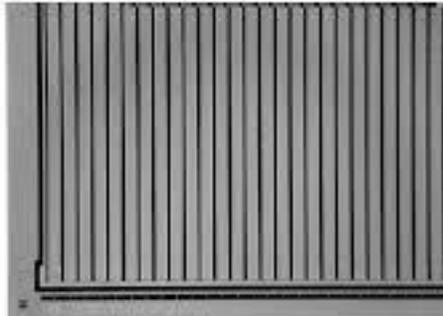
Silicon detectors

“charged particles detectors”

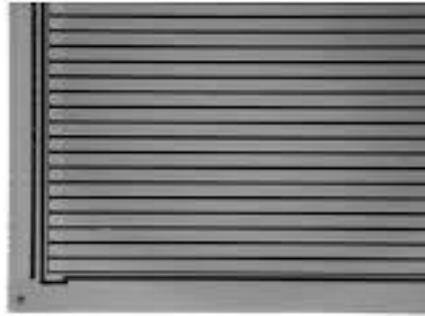
- Pasivated Implanted Planar Silicon detectors
- Surface Barrier detectors
- Single and double side silicon strip detector (SSSSD and DSSSD).



(a) DSSSD junction side

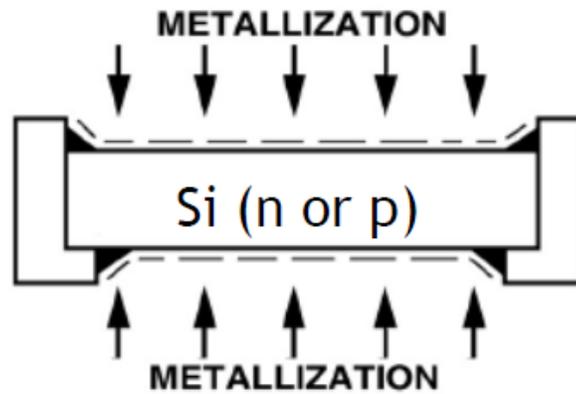


(b) DSSSD ohmic side

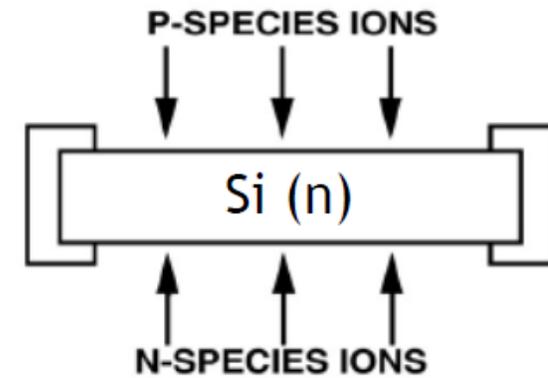


Detectores de Silicio continuos

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



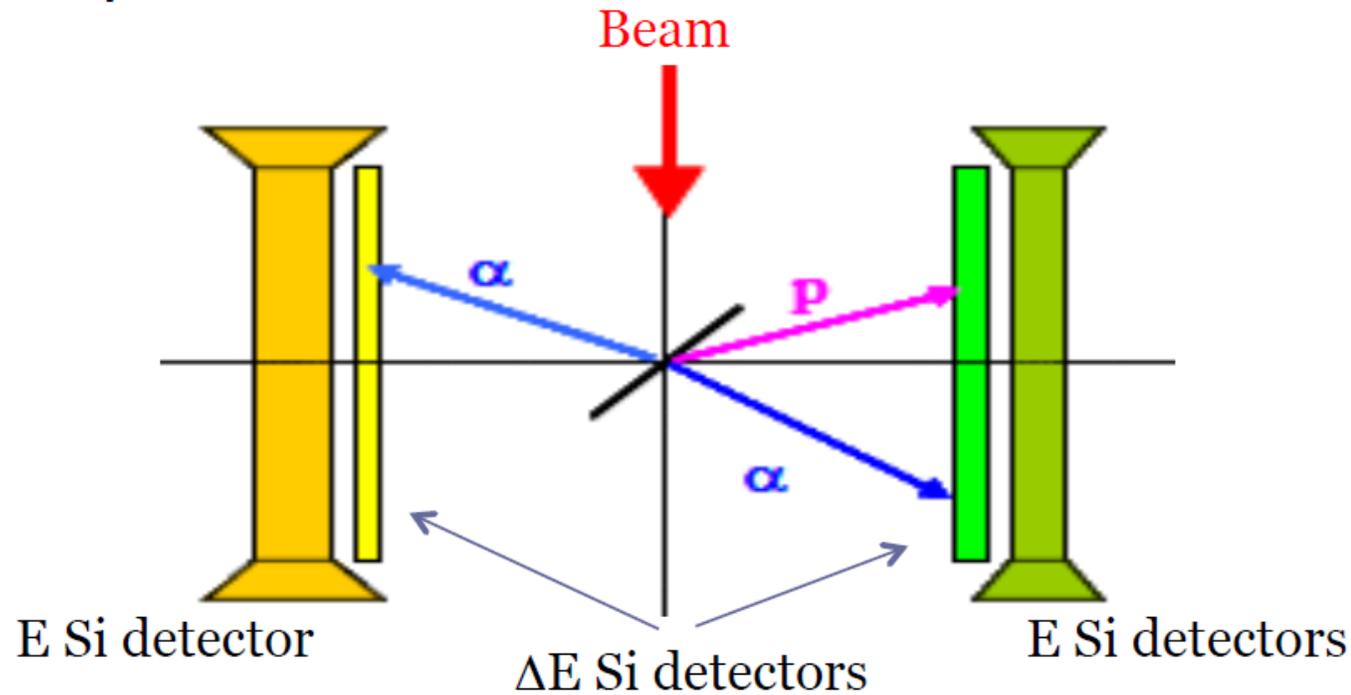
Detector de Si de barrera de superficie
Contactos por difusión de Au y Al



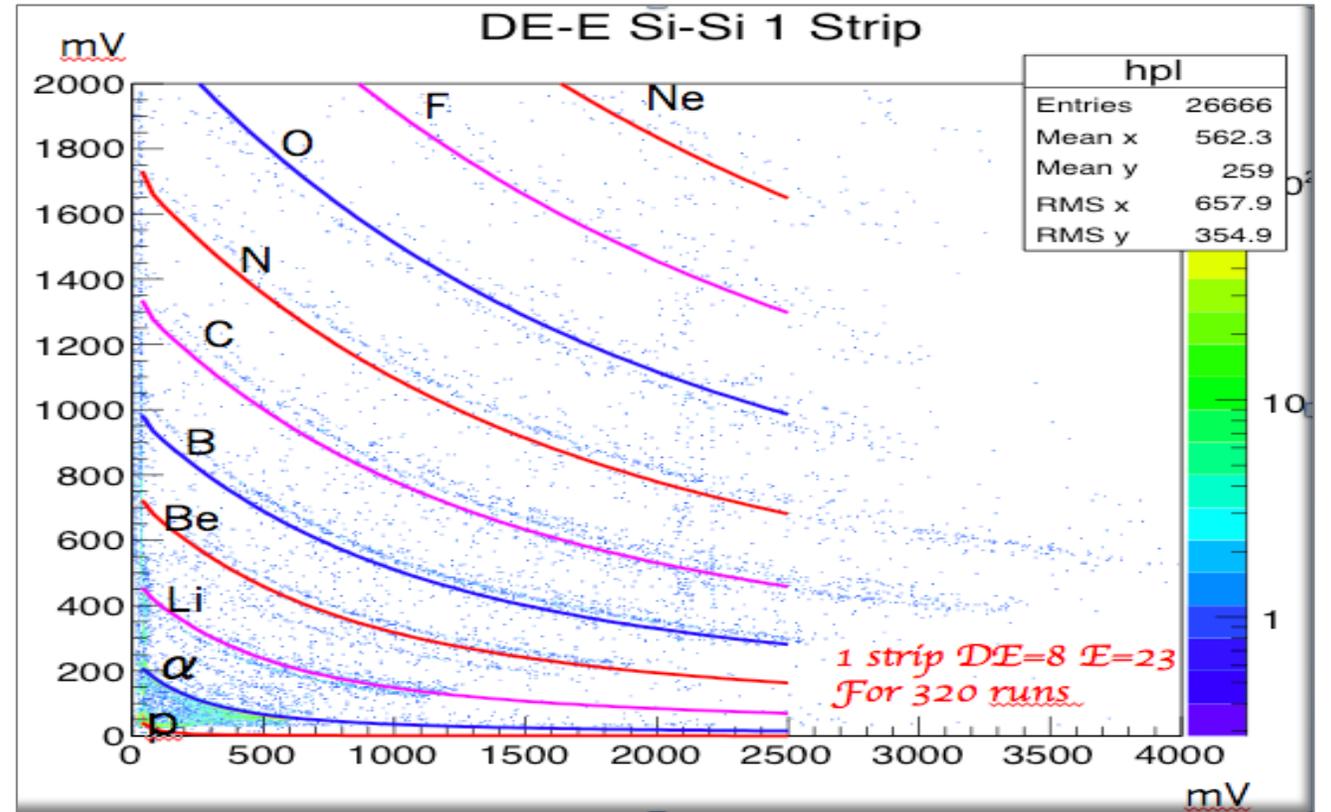
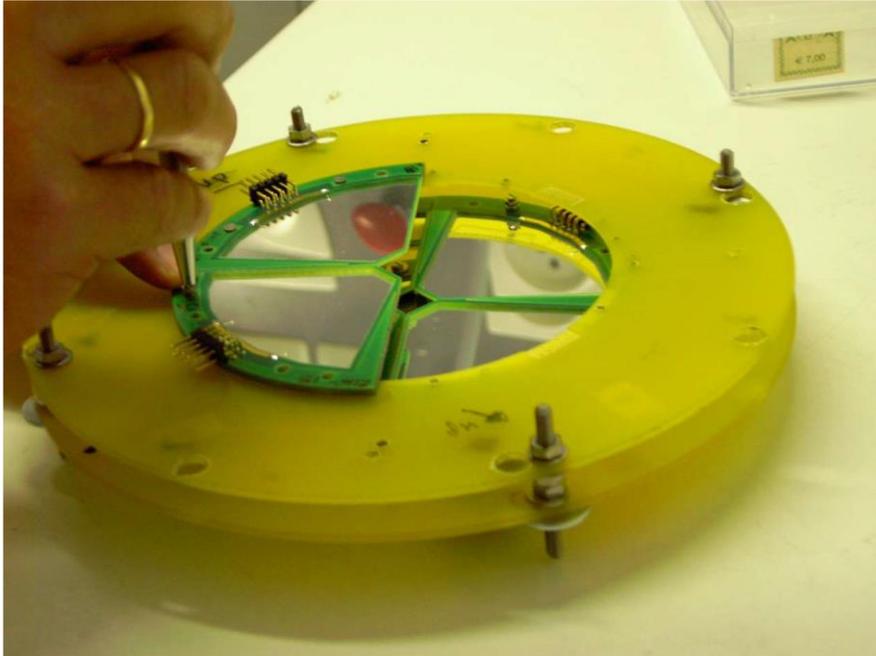
Detector de Si de iones implantados
Necesario proceso de
'annealing' (templado)

Telescopio de Silicio

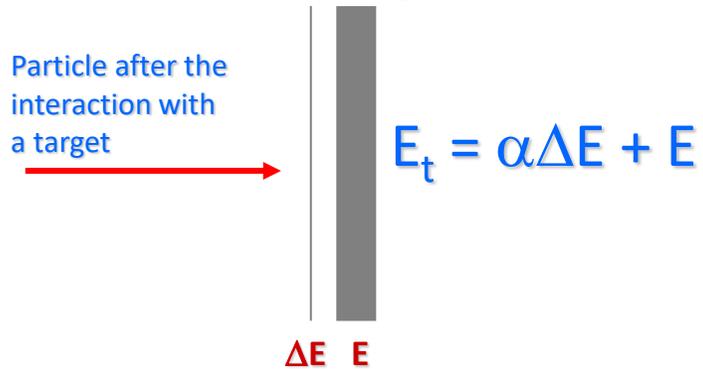
- Configuración en telescopio: ΔE -E. Un detector fino (5-50 μm) que no detiene las partículas mide el ΔE , y otro más grueso (200-1500 μm) detrás las detiene por completo. Sumando la energía depositada en ambos se tiene E.



Extracting information from D1+D2 “telescope”



telescope

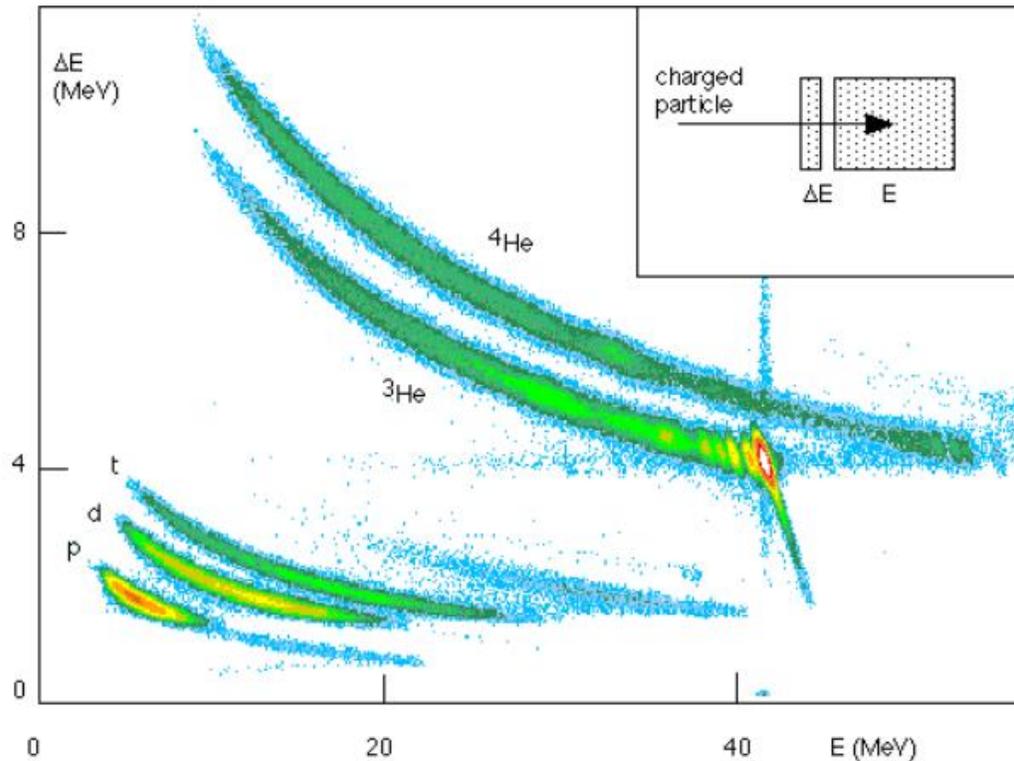


Bethe-Bloch
Aproximation

$$\Delta E \approx C \frac{mZ^2}{E_t} \Delta x$$

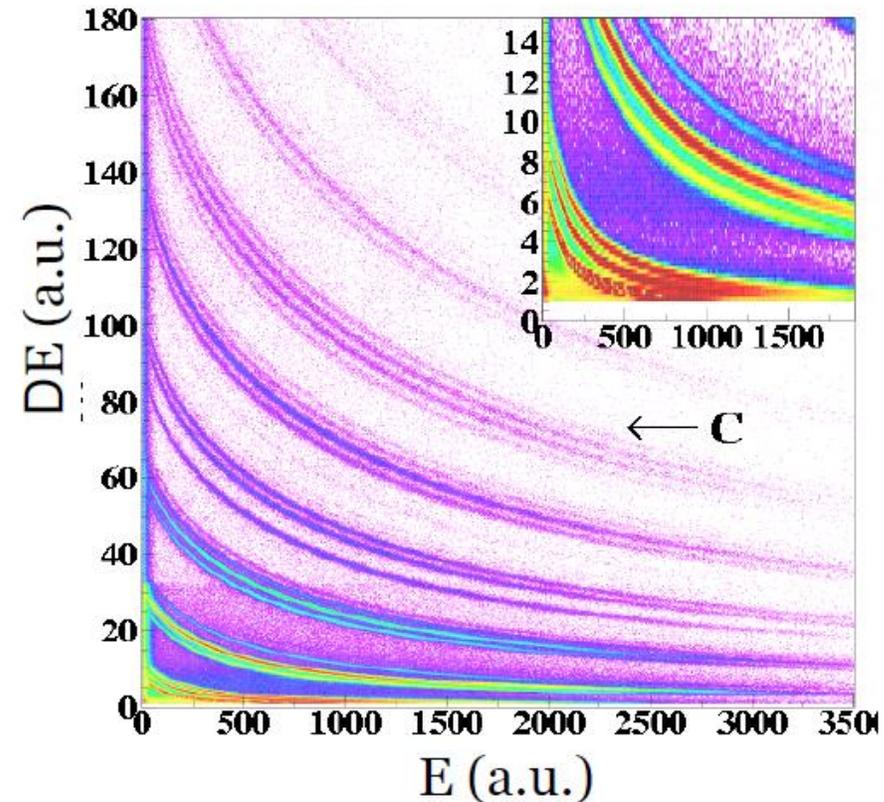
Identificación de partículas

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



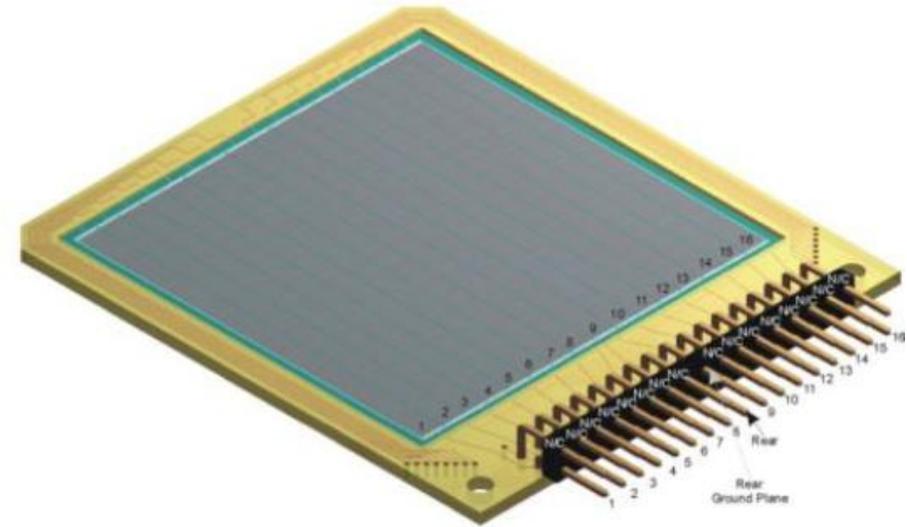
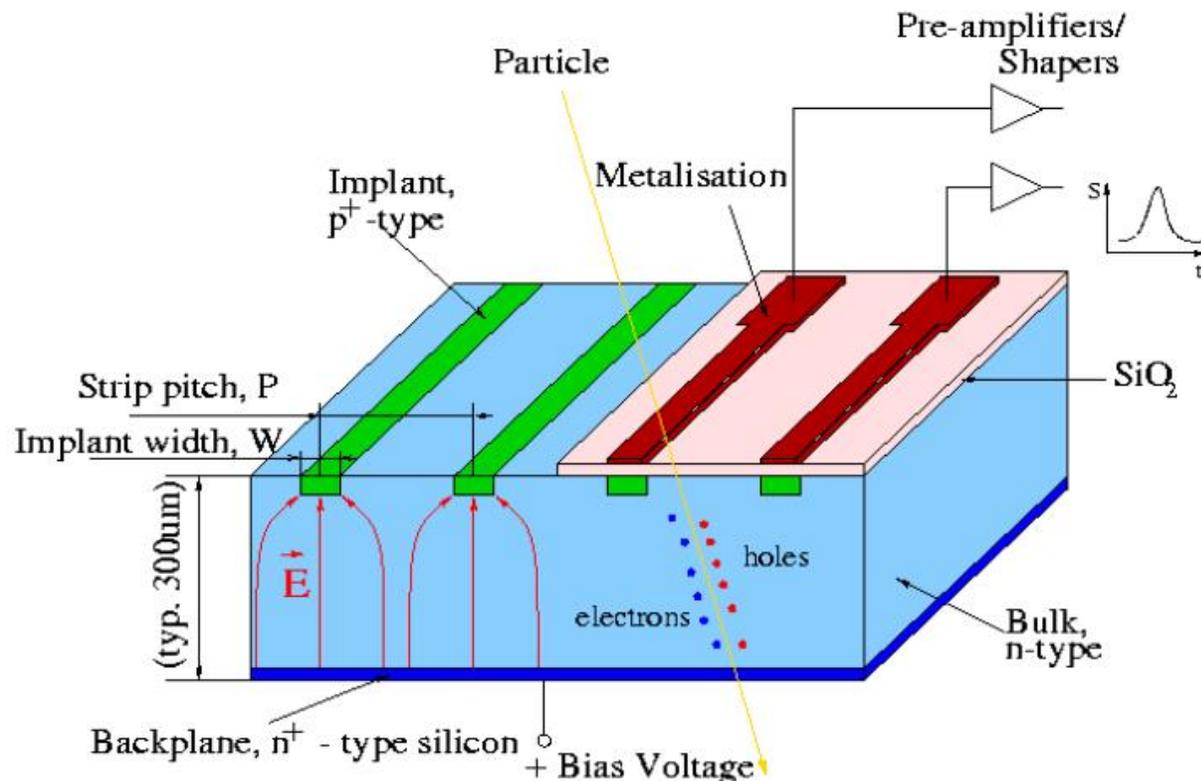
${}^3\text{He}(45 \text{ MeV}) + {}^{163}\text{Dy}$

Si telescope: 140 mm + 3 mm



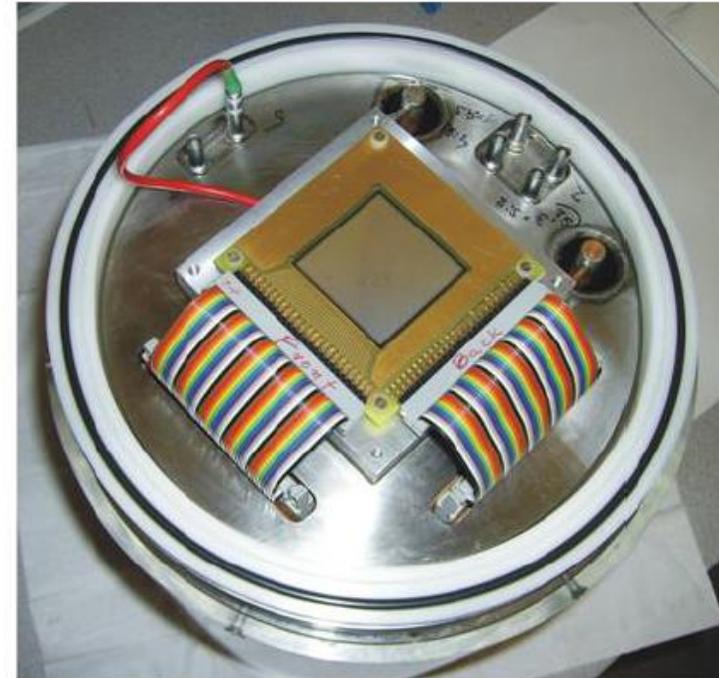
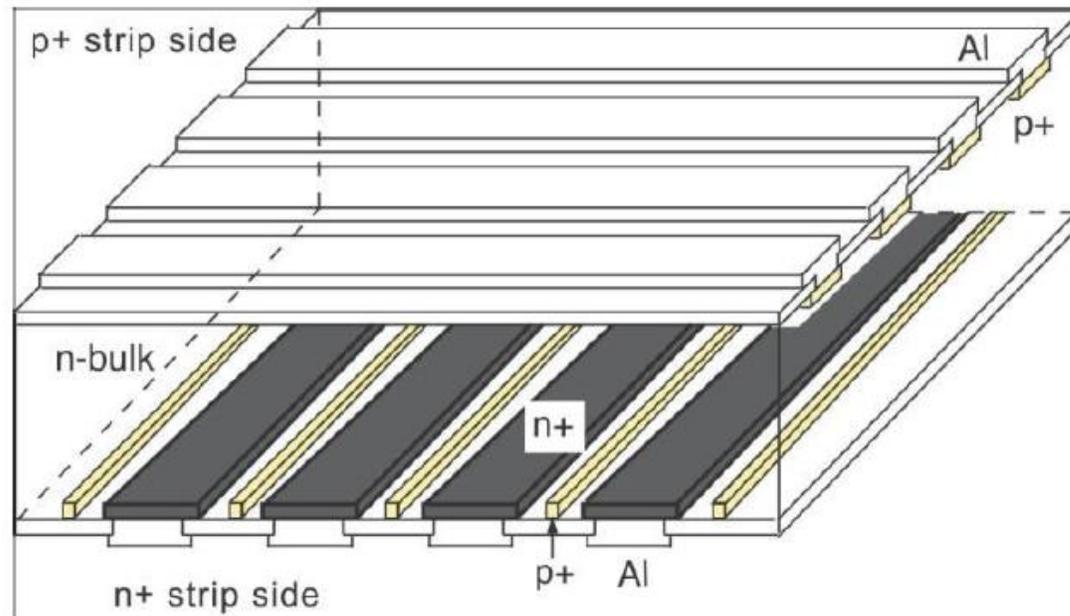
Detectores Silicio de bandas

- 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.

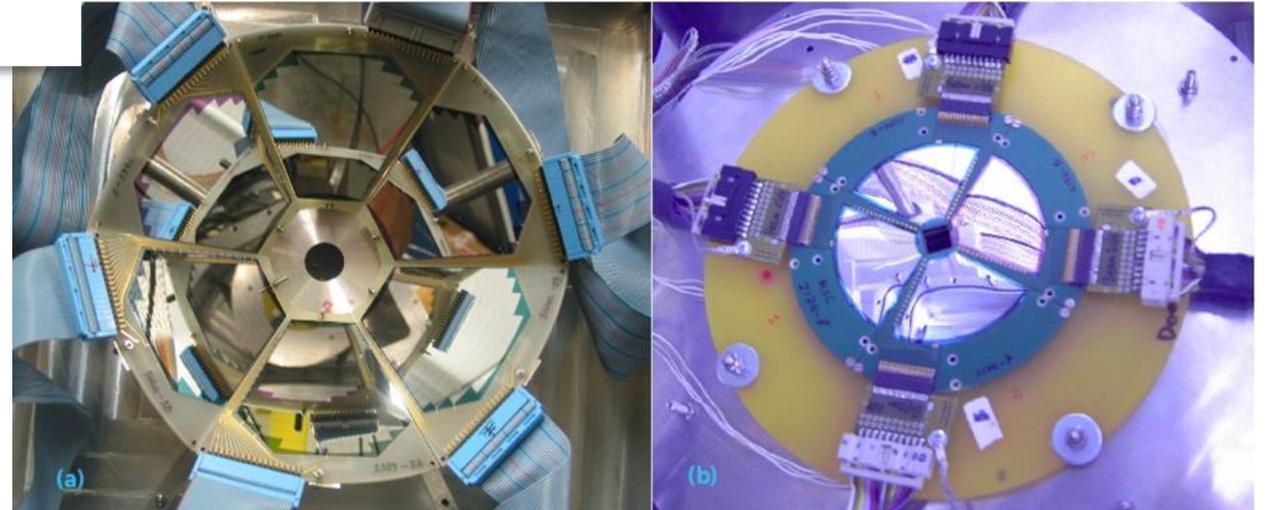
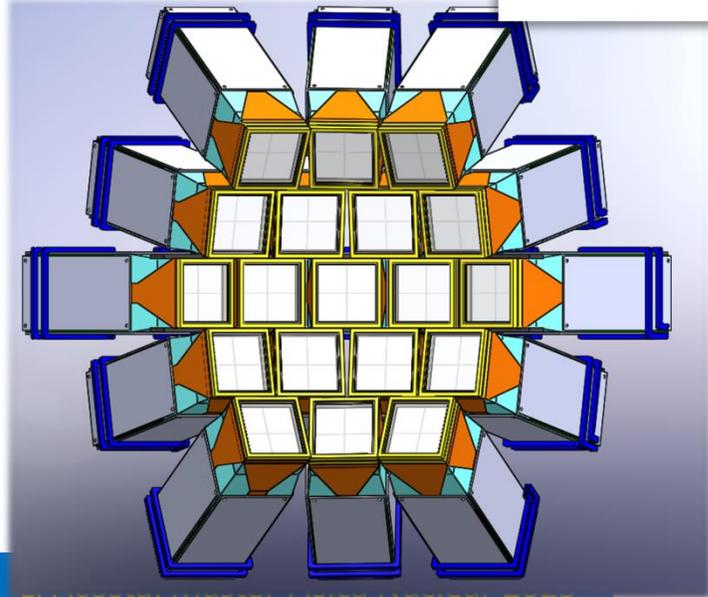
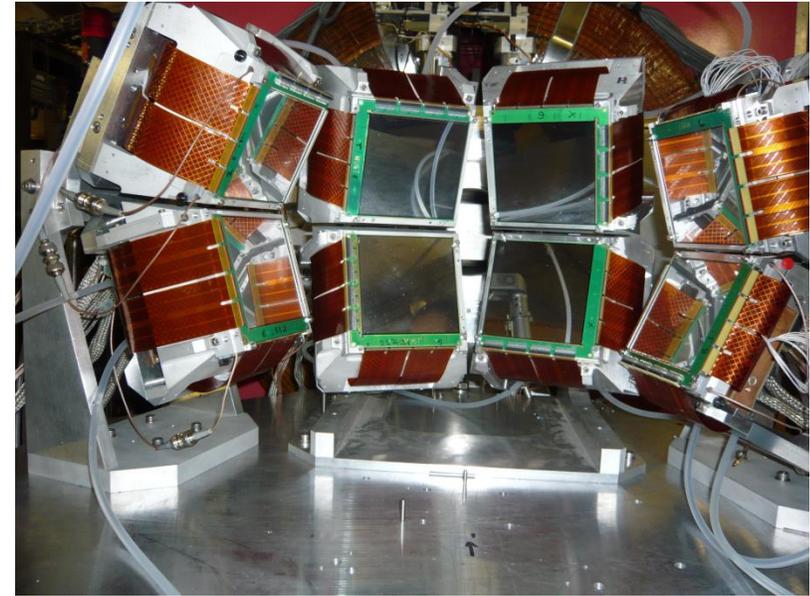
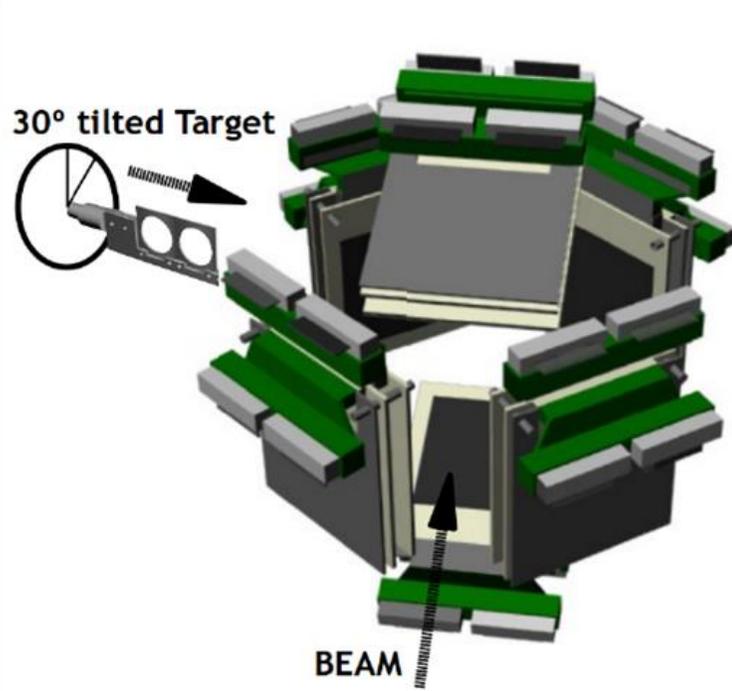


Detectores Silicio de bandas

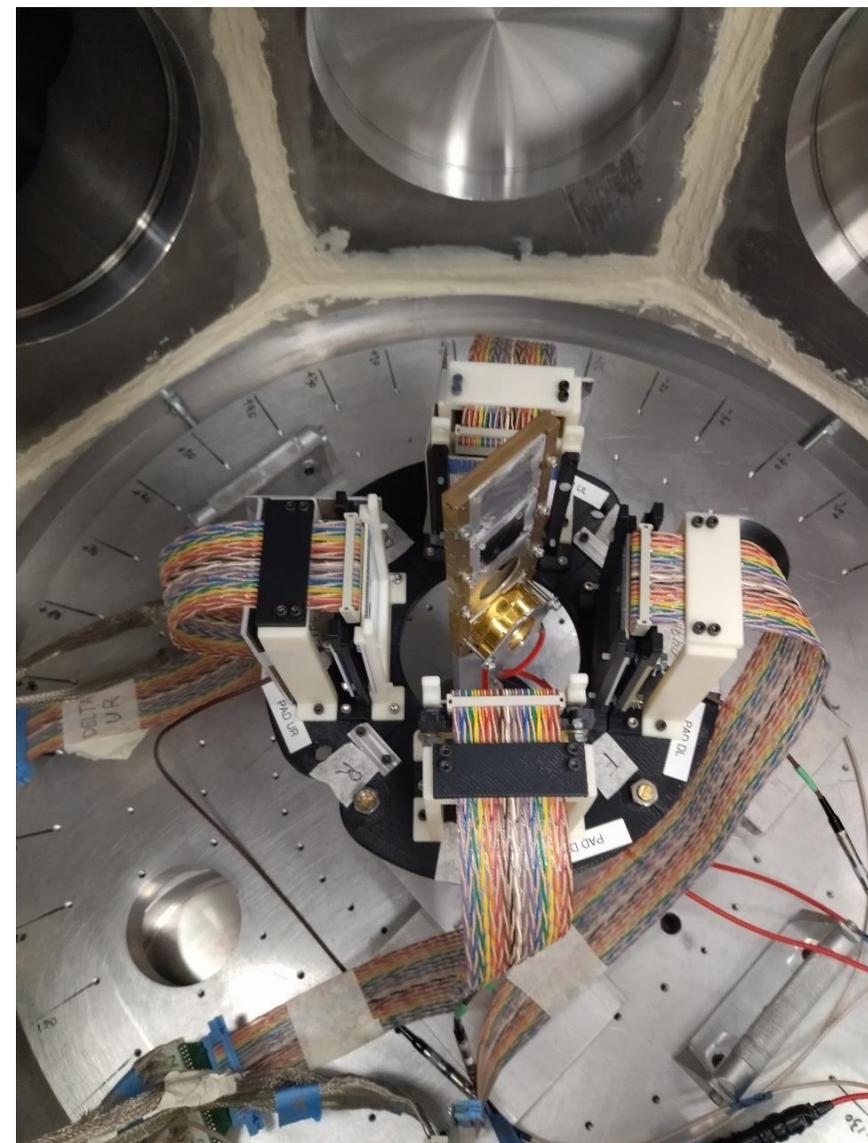
- Si tienen bandas a ambos lados se llaman DSSD (Double-Sided Silicon Strip Detector). Detectan la posición del impacto en 2D con precisión milimétrica.



Examples of systems based on DSSSD



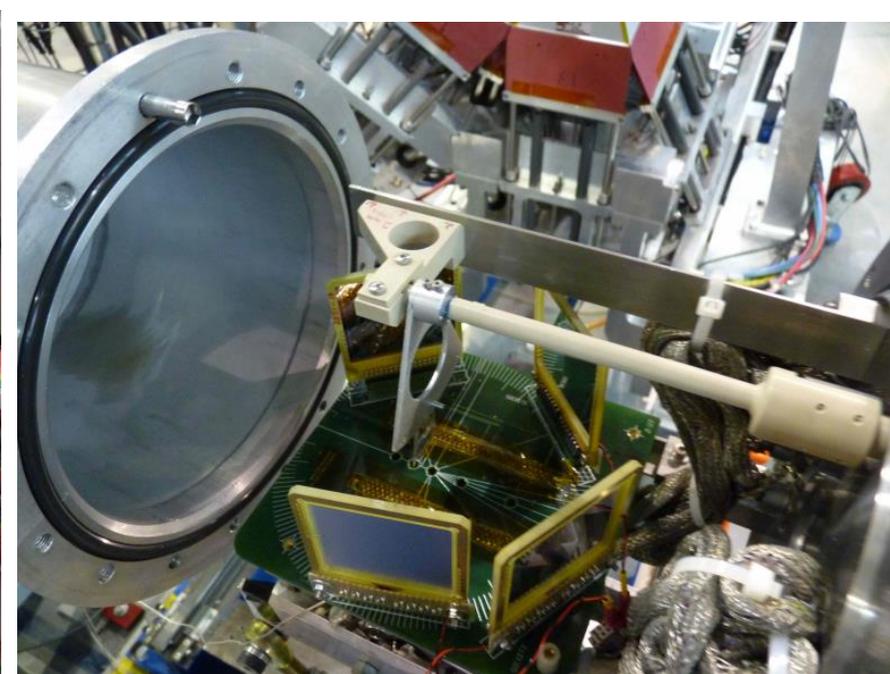
GLORIA (UHU), MUST2 (GANIL-Orsay), FARCOS (LNS-INFN), LEDA (Edimburg, LLN), DINEX (UHU, US, Madrid) 32



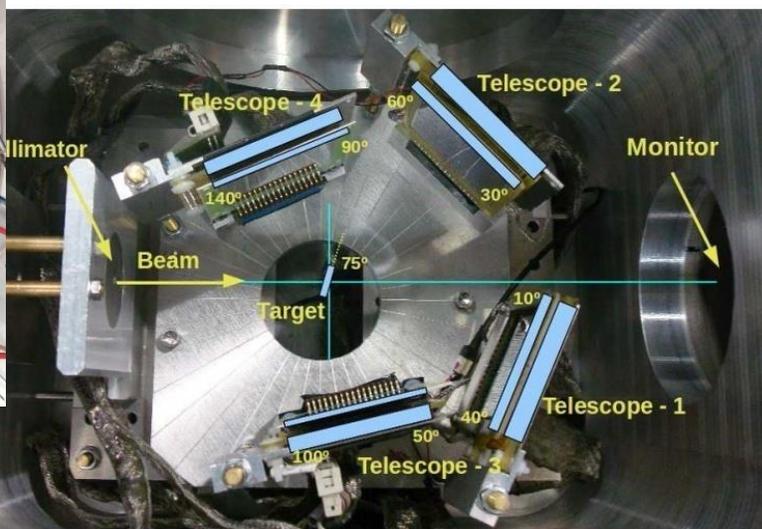
SIMAS array @ UND (USA)



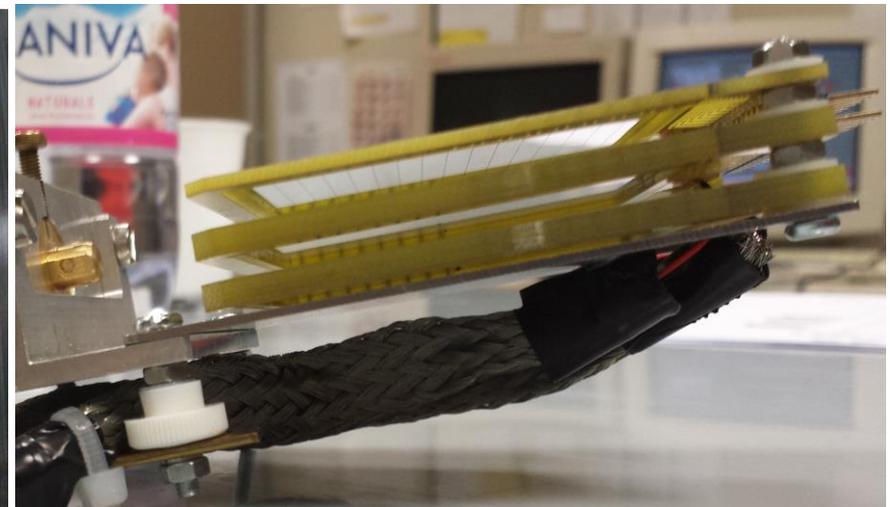
LAMP array @ UND (USA)



IEM-CSIC array @ TRIUMF (Canada)



IEM-CSIC array @ TRIUMF (Canada)



Triple Telescopio GLORIA @ LNS-INFN (Italia)

Detectores de diamante y SiC

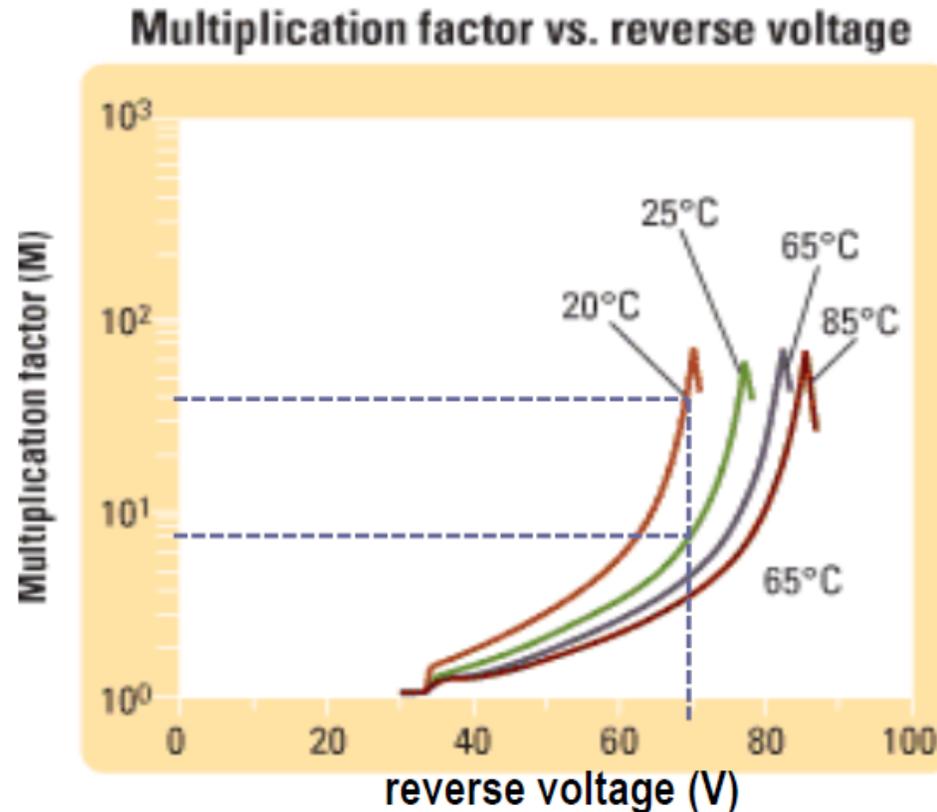
- Ambos prometedores para el perfilado de haz. Pueden resistir altas Corrientes (por encima de 10^7 pps, de acuerdo con recientes estudios incluso hasta 10^{13} pps).
- Buena respuesta temporal (en el orden de los cientos de ps).
- Resolución aceptable (entre 20 y 60 keV FWHM dependiendo del fabricante).



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

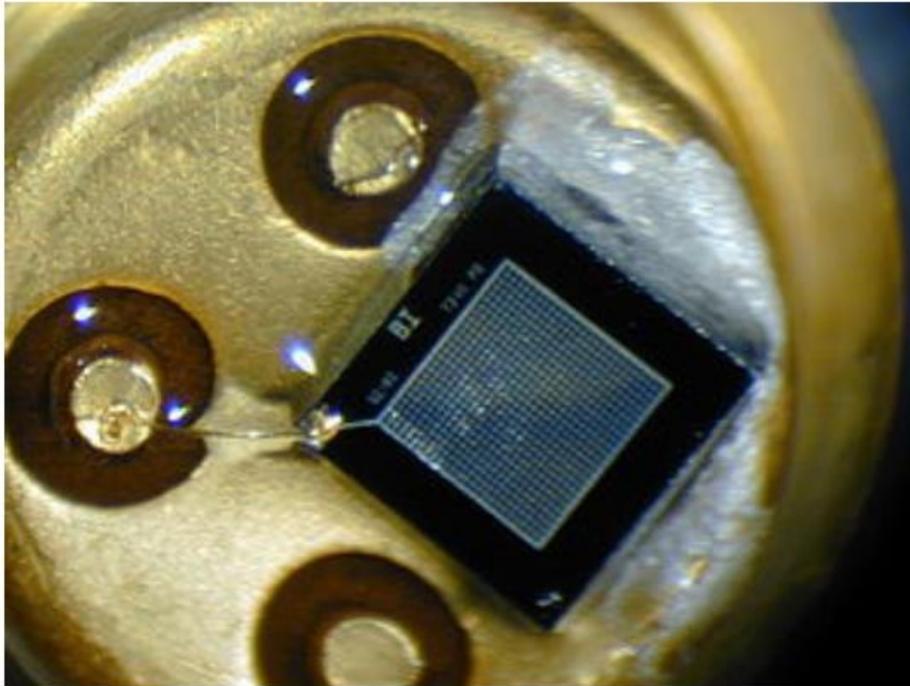


- En modo proporcional la ganancia depende fuertemente de la temperatura



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)

Scintillation detector:



- Simple
- Versatile
- Rugged
- Cheap

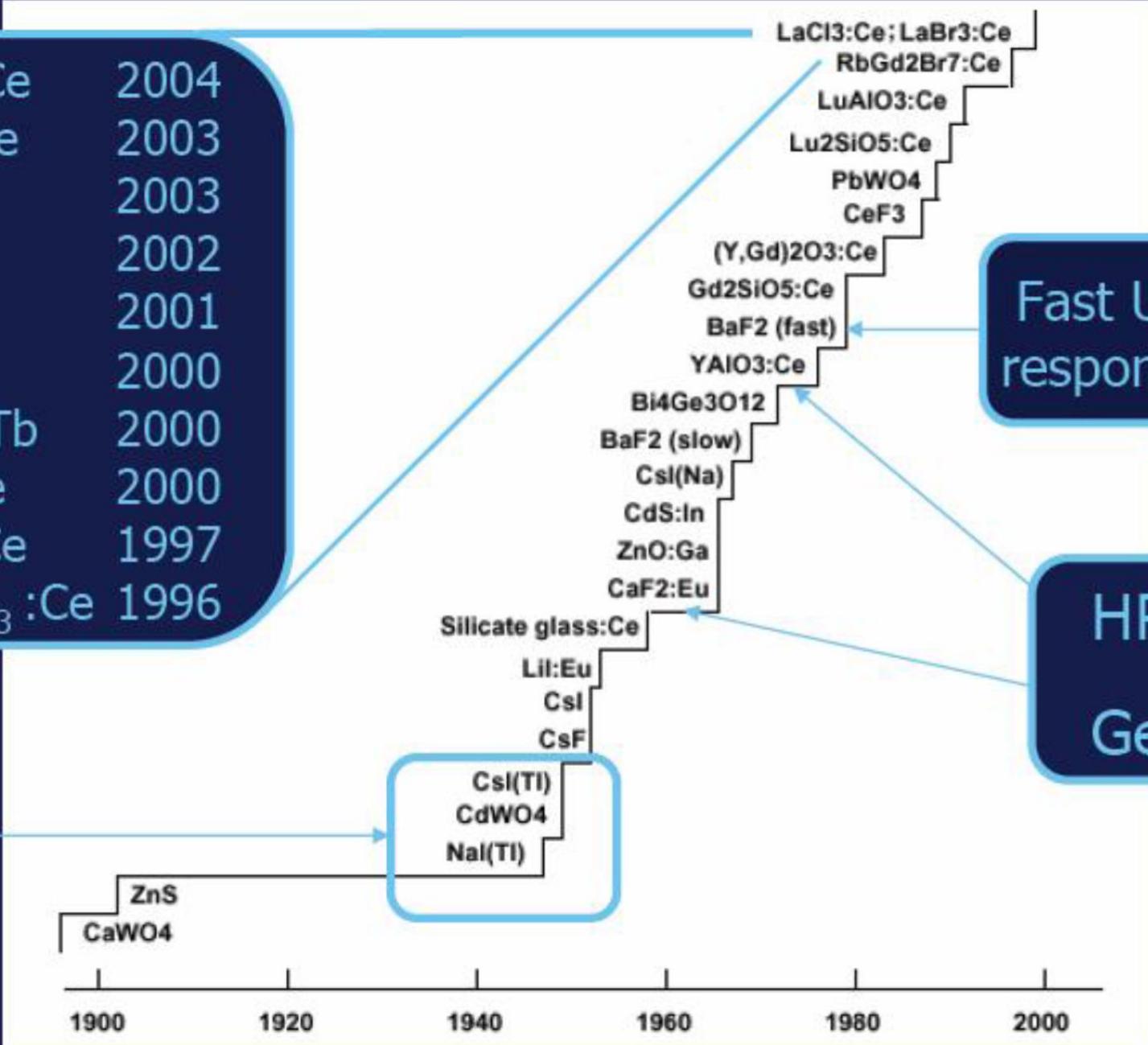


History:

- Crookes (1903): ZnS screen + microscope
- Regener, Crookes (1908): nature of α -particles . + Rutherford, Geiger (gas counter)
- Geiger, Marsden (1909): angular distribution of scattered α -particles
- Rutherford (1911): discovery of atomic nucleus
- Rutherford (1919): discovery of nuclear reactions, $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$
- Cockcroft, Walton (1932): coincidence experiment, $^7\text{Li}(p, \alpha)\alpha$
- Krebs (1941): photo-sensitive Geiger-Muller counter
- Curran, Baker (1944): use of photomultiplier + scintillator(ZnS)
- Kallman (1947): first organic scintillator (naphthalene)
- Hofstadter (1948): NaI(Tl)
- several (1980' s): BGO
- Laval (1983): fast component of BaF_2
- several (1990' s): many new scintillation materials

$\text{Rb}_2\text{LiYBr}_6:\text{Ce}$	2004
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$	2003
$\text{LuI}_3:\text{Ce}$	2003
$\text{K}_2\text{LaI}_5:\text{Ce}$	2002
$\text{LaBr}_3:\text{Ce}$	2001
$\text{LaCl}_3:\text{Ce}$	2000
$\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Eu, Tb}$	2000
$\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$	2000
$\text{RbGd}_2\text{Br}_7:\text{Ce}$	1997
${}^6\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$	1996

Invention of the photomultiplier tube



Fast UV response

HPGe
Ge:Li

Scintillation materials

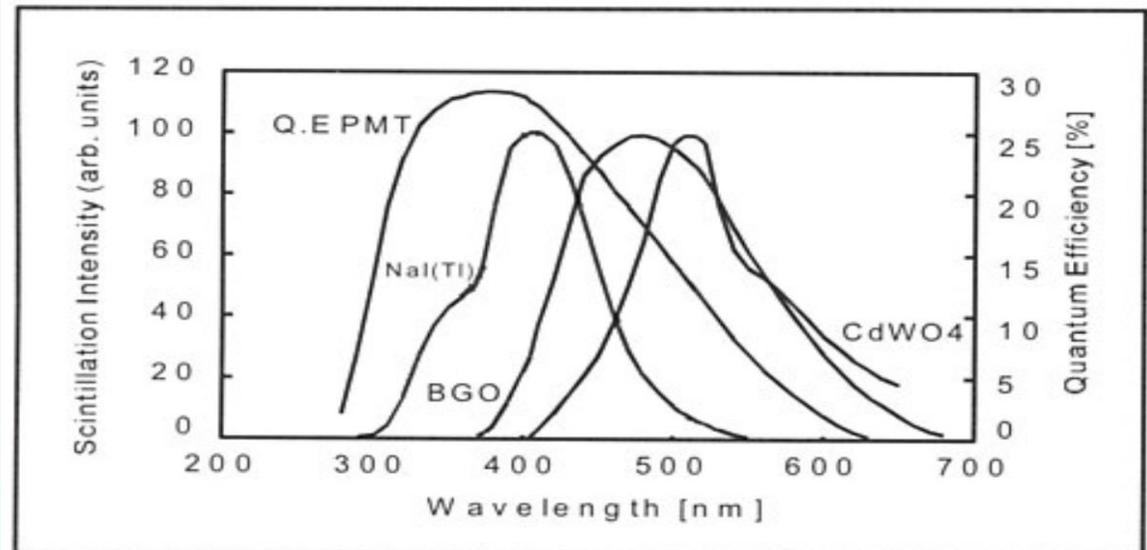
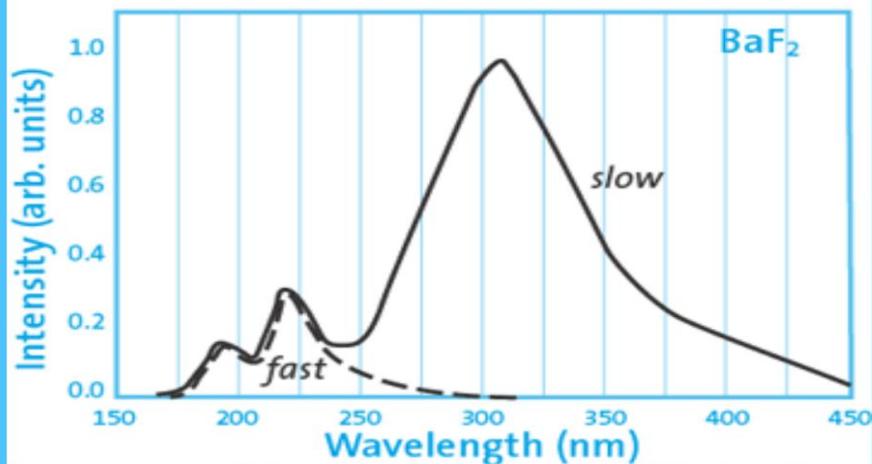
Luminescent materials: reemit part of the absorbed energy in the form of light

Emissions: fluorescence (prompt), delayed fluorescence and phosphorescence (delayed, different wavelength)

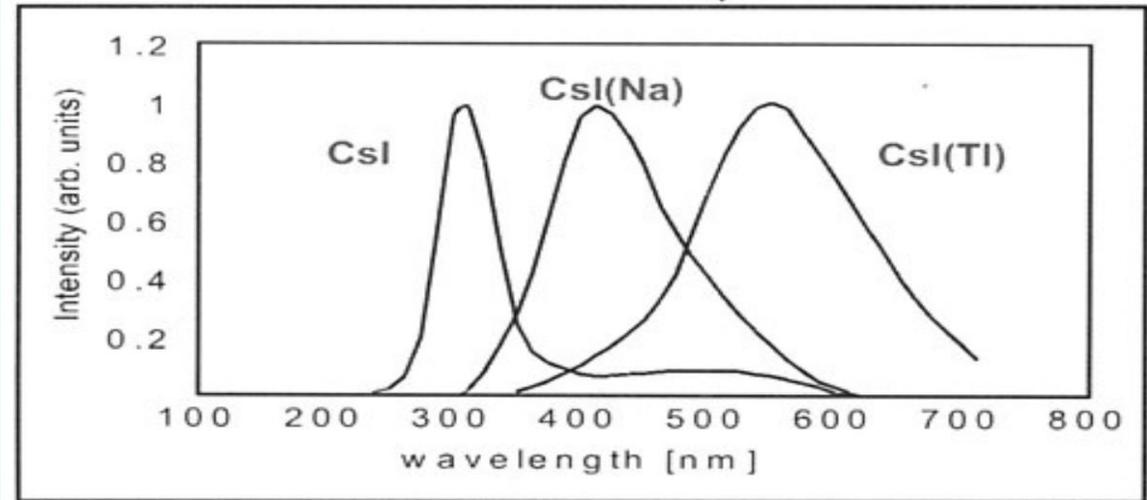
Scintillation material properties:

- transparency to its fluorescence
- luminous efficiency
- light spectral distribution
- light temporal distribution
- mechanical and chemical properties

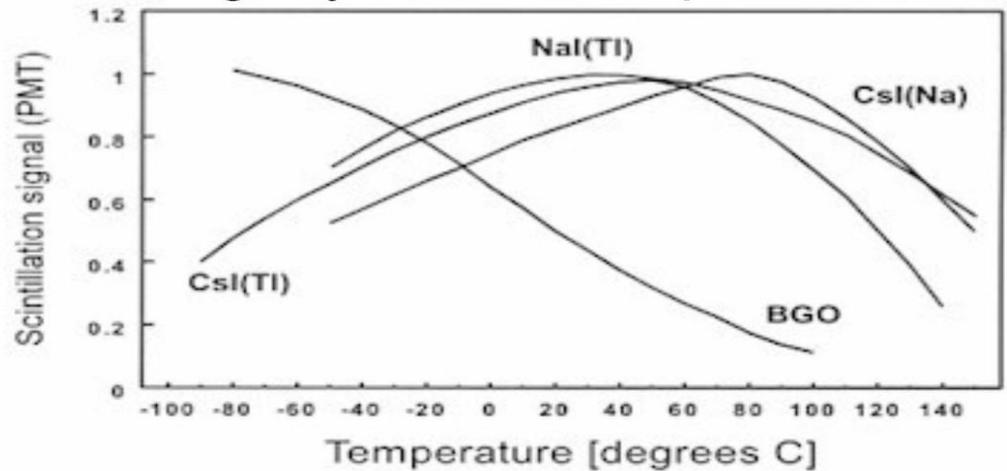
- 
- Organic materials:
 - Crystals
 - Liquids
 - Plastics
 - Inorganic crystals
 - Glasses
 - Gasses



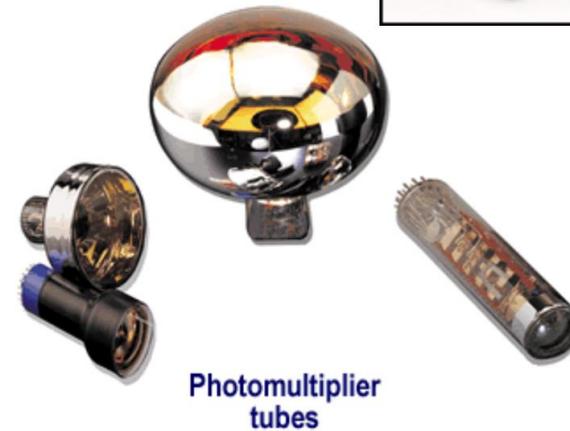
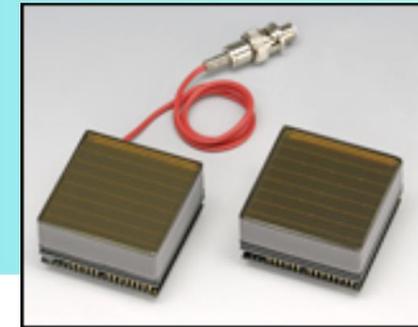
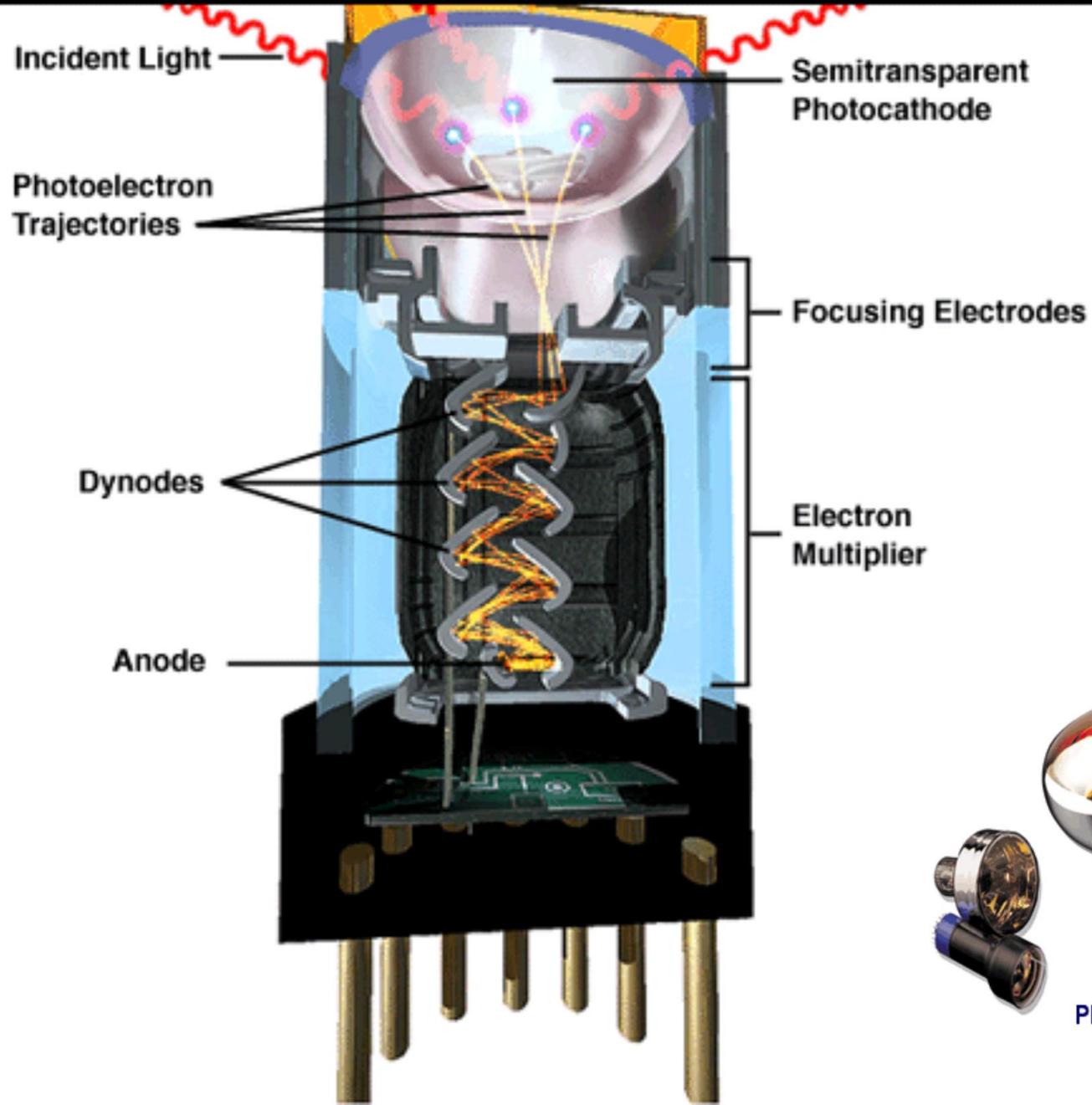
Emission spectra



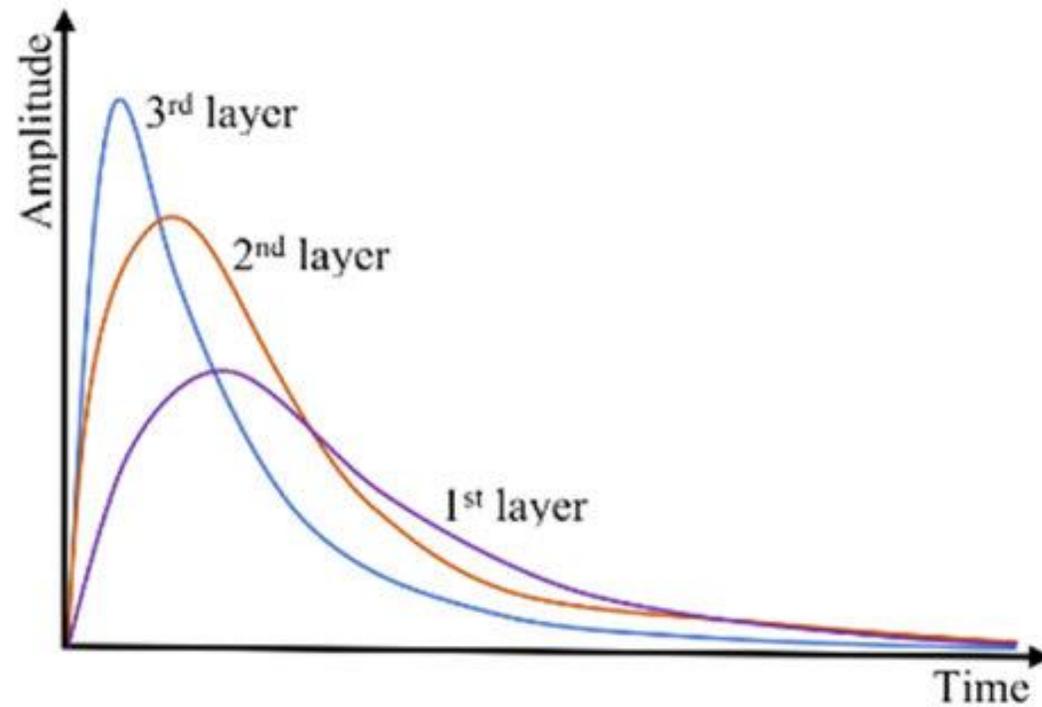
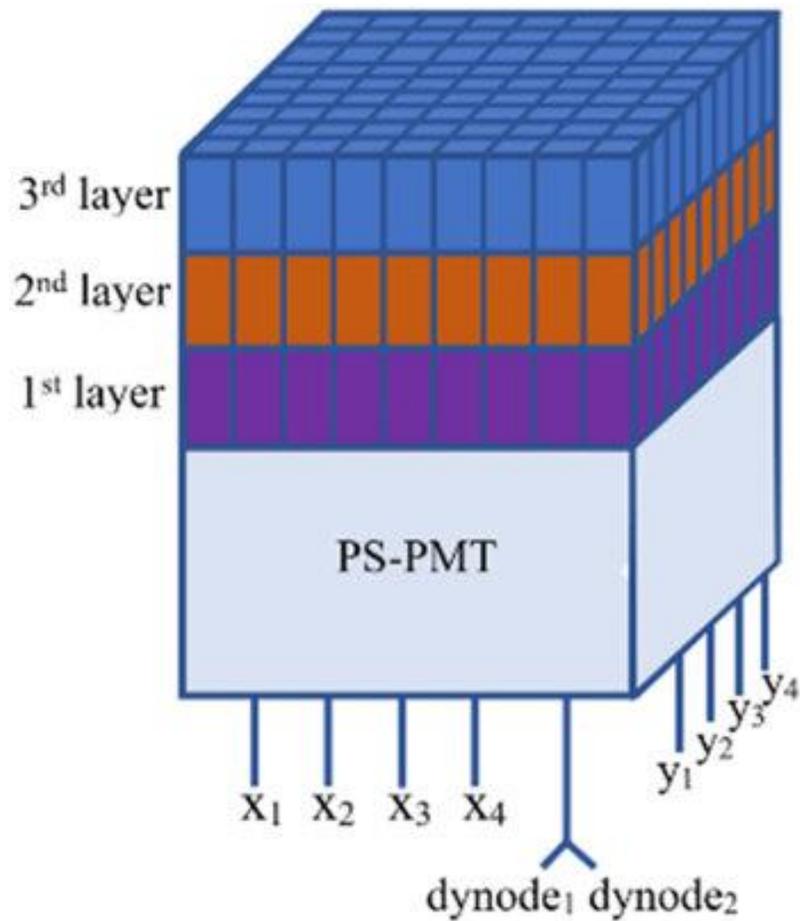
Light yield vs. temperature

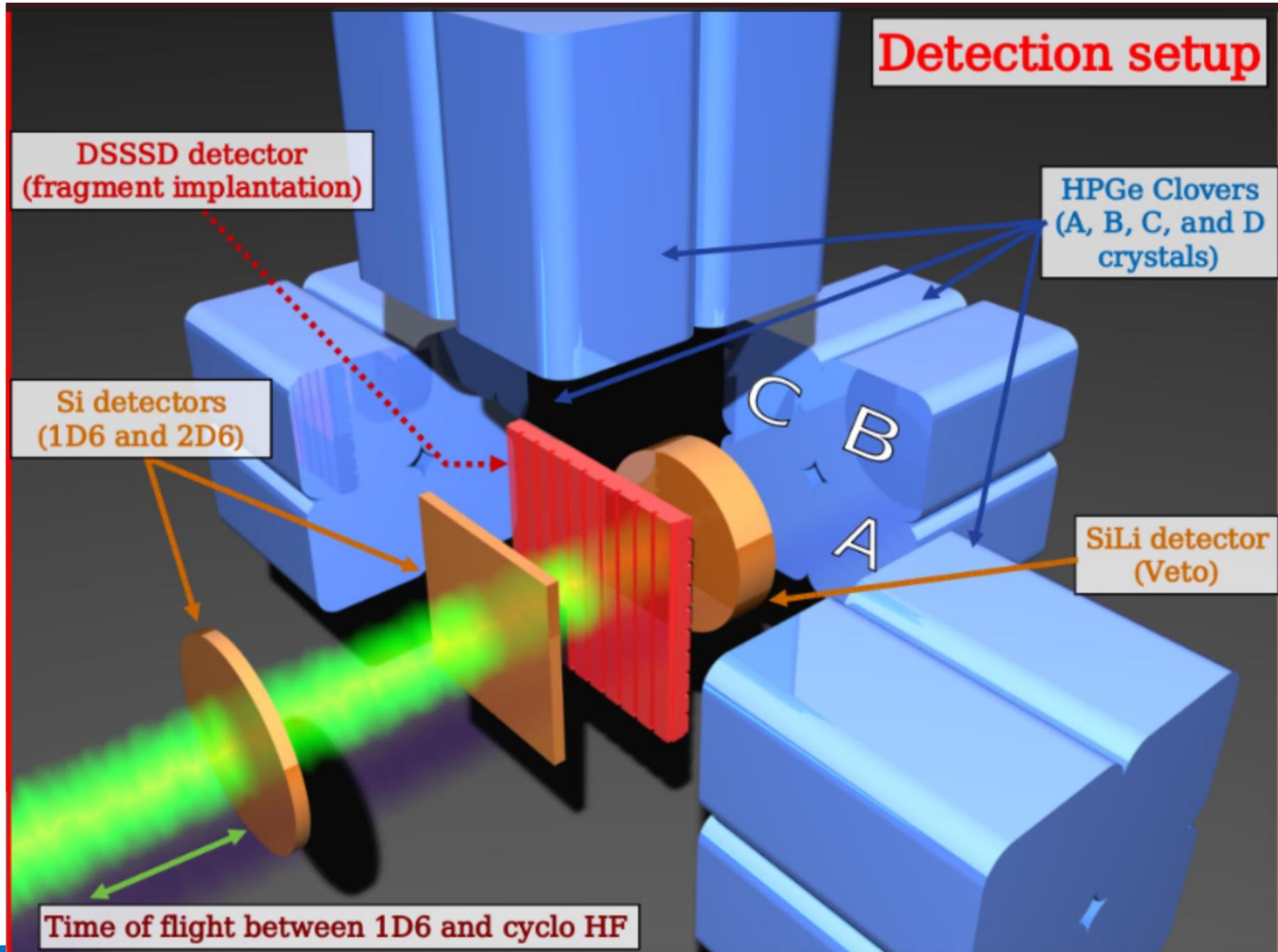


The Photomultiplier Tube



Phoswich (combinación de 2 o más cristales en un mismo detector)



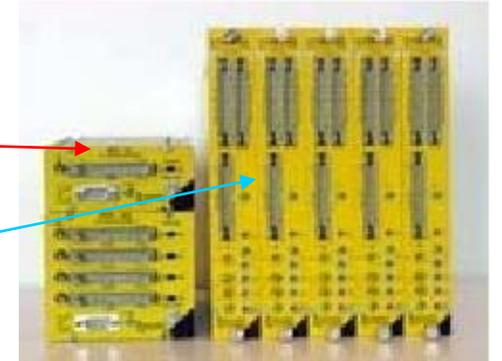


Cadena electrónica

Señal analógica
Producida por una partícula cargada en un detector



- ✓ Preamplificadores
- ✓ Amplificadores-Shapers



Tensión de Polarización
BIAS

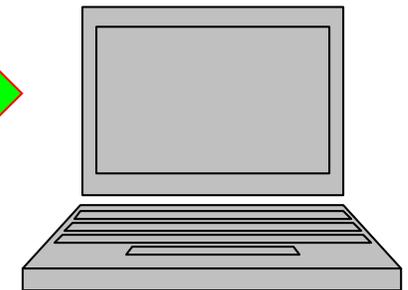
Señal Digital



Cadena Lógica

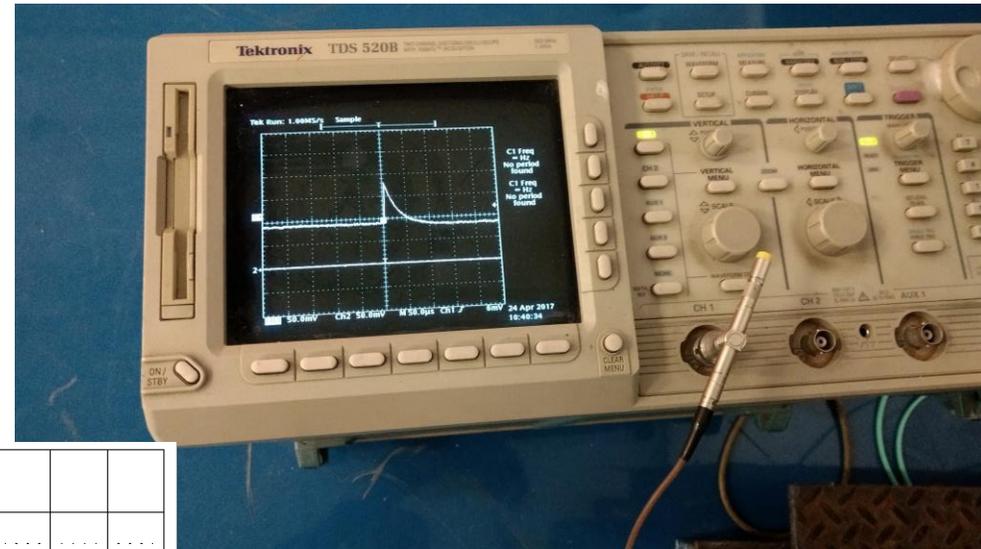
- ✓ Sistema de ADC's (Analogic/Digital Converter)
- ✓ Procesador de disparos (TRIVA3)
- ✓ Procesador de Información (CPU-RIO2)

Monitorización y grabación

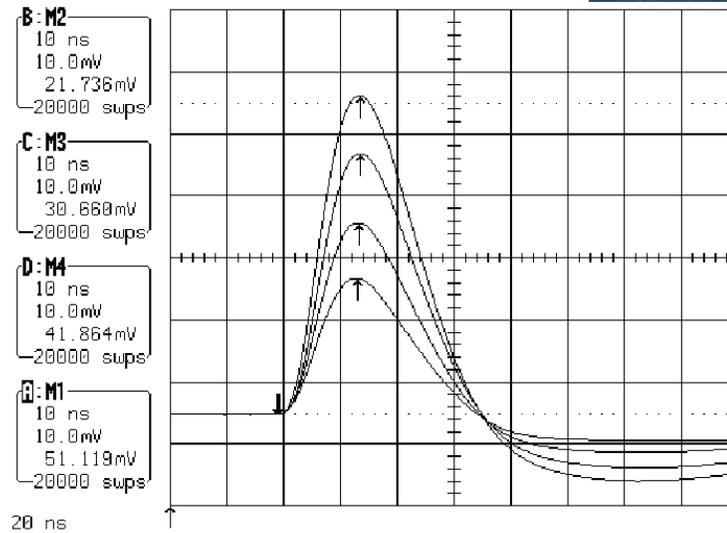


DAQ analógico

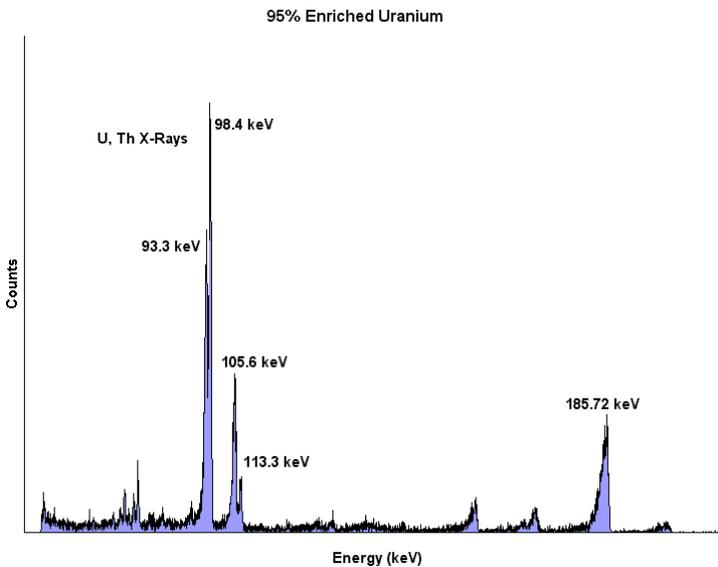
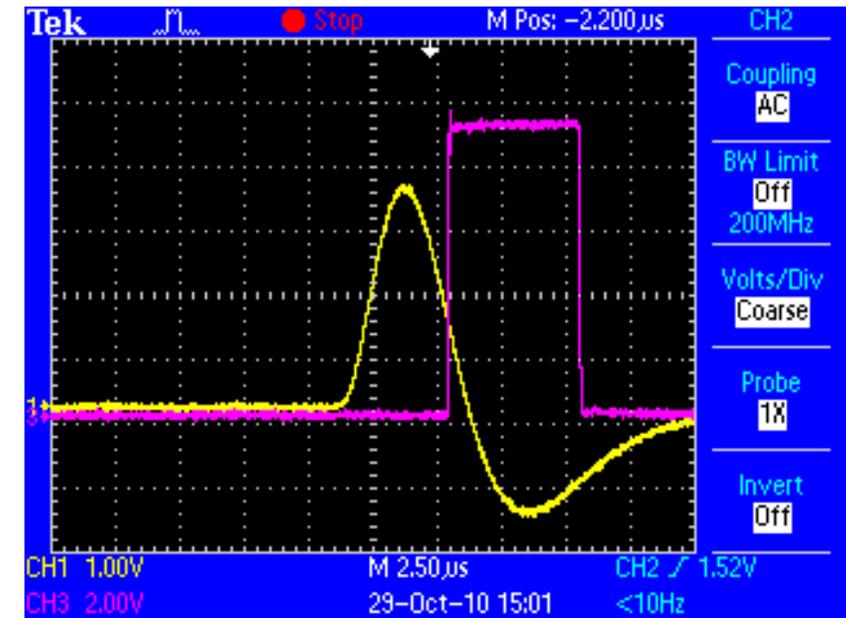
Salida
Preamplificador



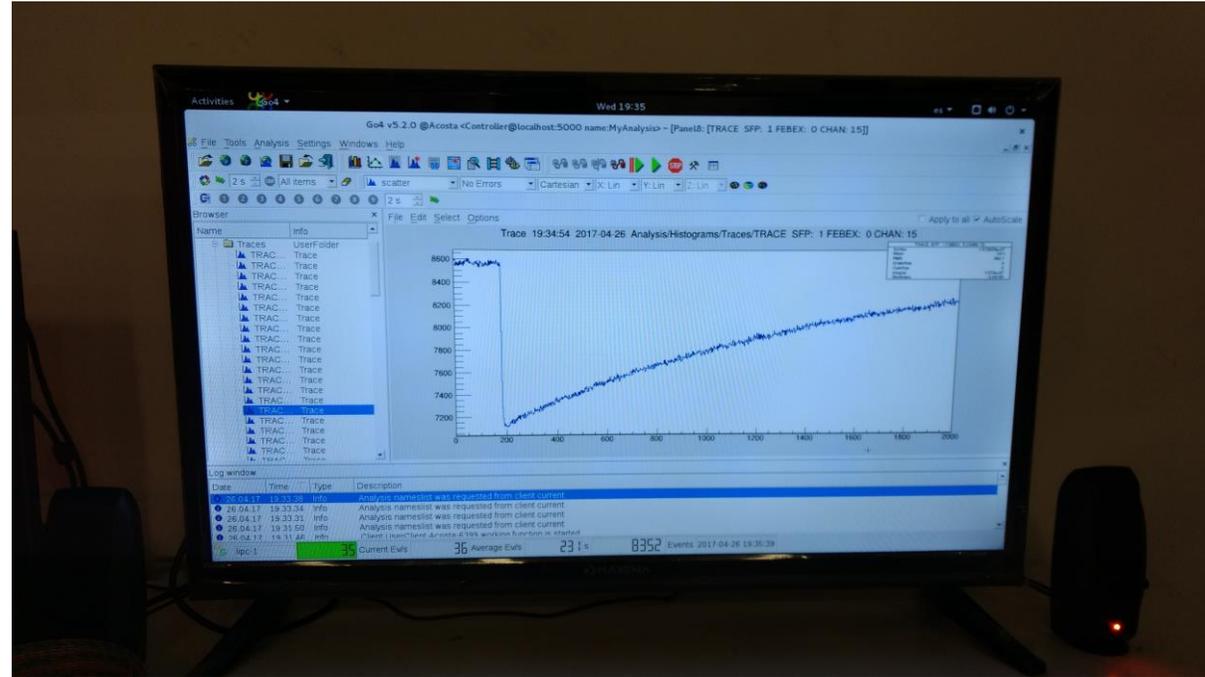
Salida
Amplificador/shaper



GATE



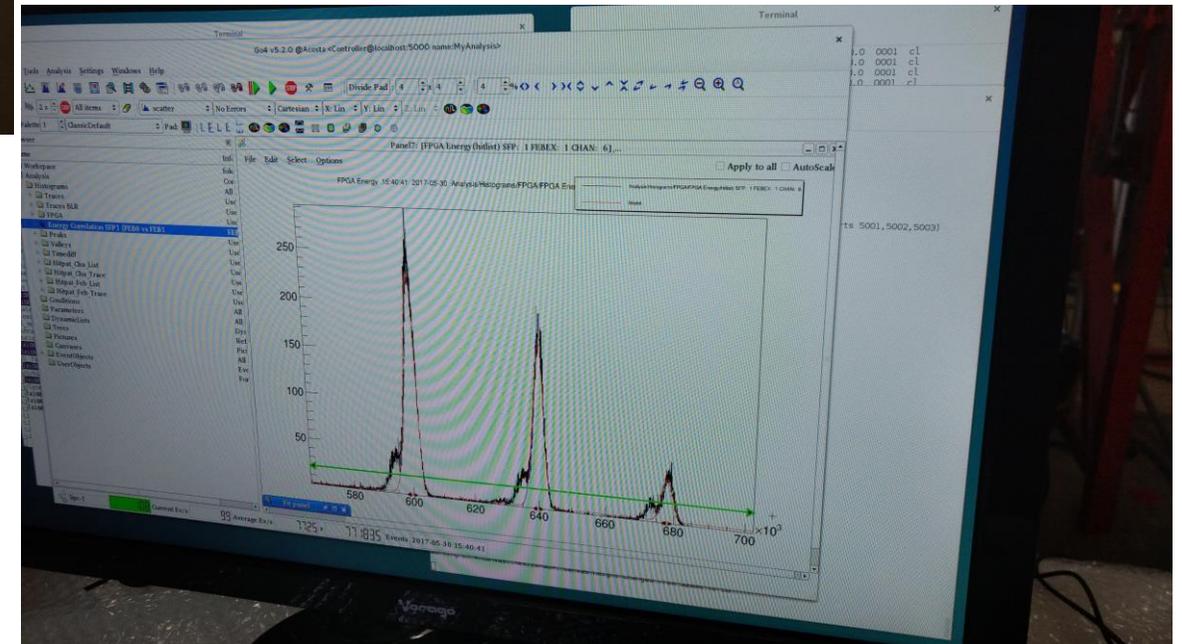
DIGITIZER

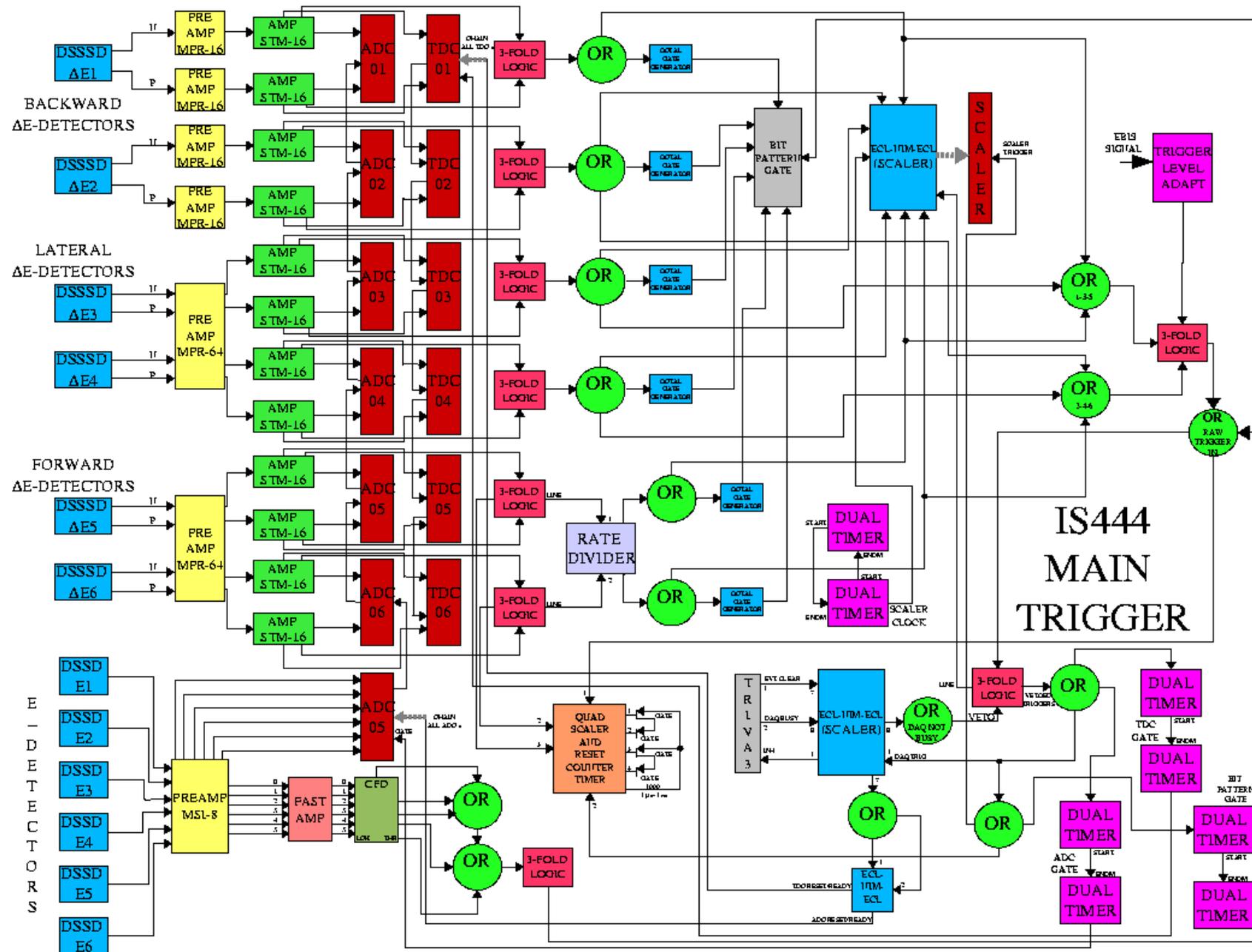


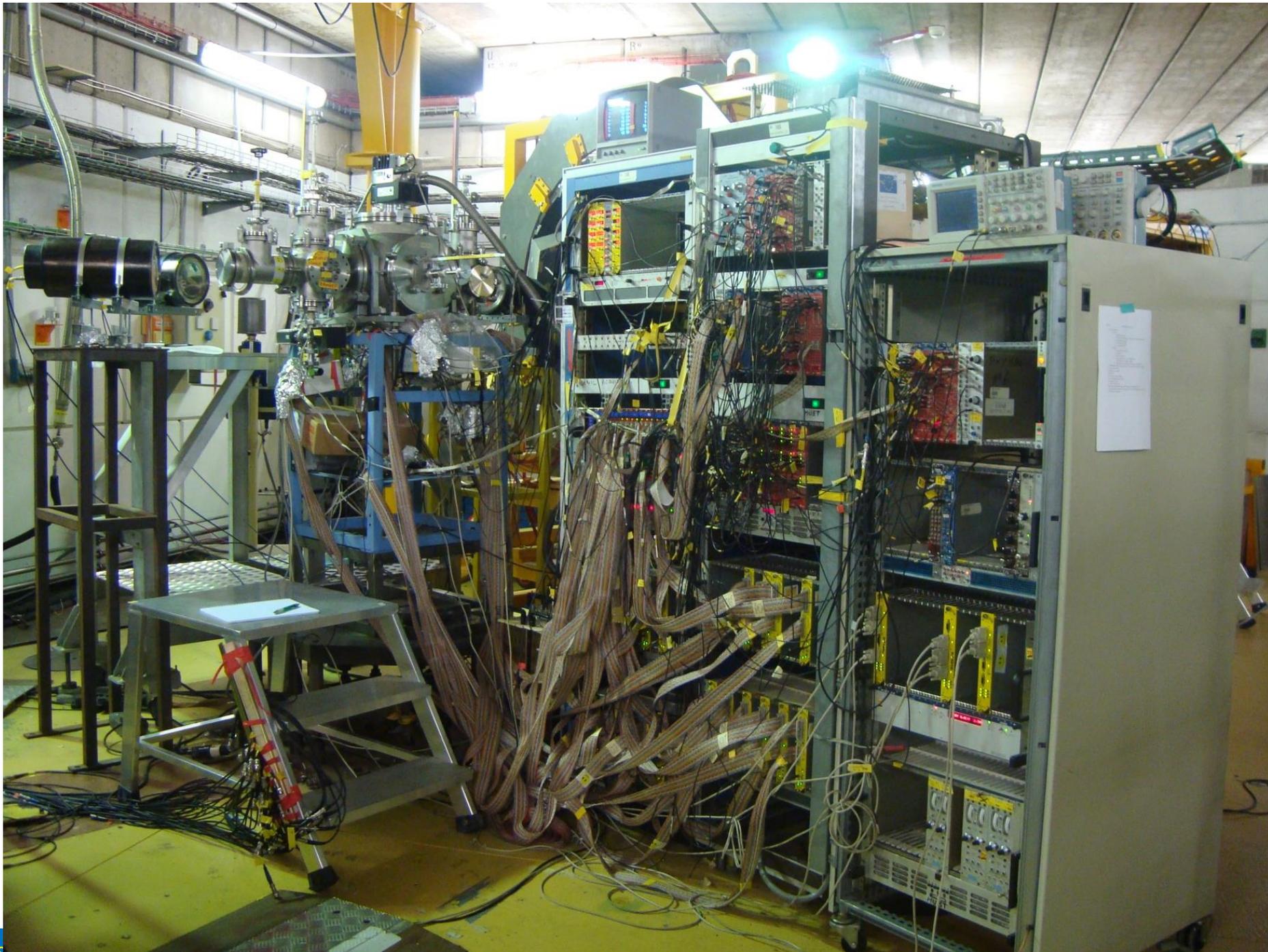
DIGITIZER

En modo genérico, no requieren de un formador de señal, digitalizan la señal de salida del preamplificador.

Después, mediante algoritmos insertados con un código de control, extraen la información necesaria para crear espectros (energía, tiempo PSD)







Aspectos importantes a tomar en cuenta

- Qué cosa voy a medir (partículas cargadas, fotones, neutrones)
- ¿Puedo usar el mismo detector para todo?
- Energía, corriente de haz, masa (si la hay) y carga.
- ¿Puedo medir simultáneamente dos tipos diferentes de radiación?
- Rangos dinámicos!!!
- Tipo de electrónica (preamps, amps, DAQ).
- Lectura de señales (cables, conectores).
- Cinemática de la reacción -> GEOMETRÍA DE DETECCIÓN

Con respecto al detector “en sí”

- Fuente de alimentación (los centelladores requieren mucha tensión de BIAS, los silicios mucho menor).
- El sistema es fotosensible.
- El sistema no funciona a temperatura ambiente.
- Los iones requieren de medir en vacío.
- El tracking de gammas es sensible a algunos materiales de masas grandes.
- El signo de la polarización es muy importante, particularmente en materiales N-P!!!
- El BIAS puede estar en el régimen de alta tensión, las subidas y bajadas tienen que ser en rampa, para evitar dañar los detectores.
- El régimen de “mal vacío” (entre 1 y 100 mbar) puede afectar al detector si se juega en tal estado con el BIAS.
- Las superficies y áreas activas de un detector deben evitar el contacto con cualquier superficie, incluidas las manos.
- Los detectores de silicio pueden ser extremadamente delgados, cualquier esfuerzo puede romperlos, hay que ser muy cuidadoso en el manejo, cableado y montaje.
- En muchos casos, la superficie de un detector cuenta con hilos de plástico conductor para su lectura (bonding), estos hilos pueden ser removidos con las yemas de los dedos o con un simple contacto con cualquier material. Hay que ubicarlos y tenerlos siempre a resguardo en el montaje.
- Seguir al pie de la letra los manuales en cada instalación experimental, ayuda muchísimo a que una medida pueda concluirse. Los sistemas de detección, así como los blancos, son quizás las partes más delicadas en un experimento. Su manejo debe abordarse con respeto (más no con miedo).

