

Detectores gaseosos

Joany Manjarrés (TU Dresden)



Latin American alliance for
Capacity building in Advanced physics
LA-CoNGA physics

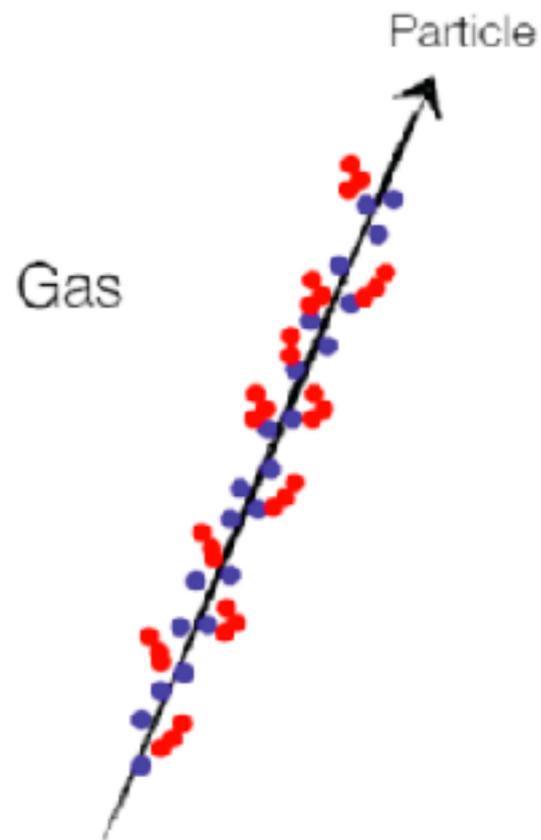


Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea





La creación de la señal

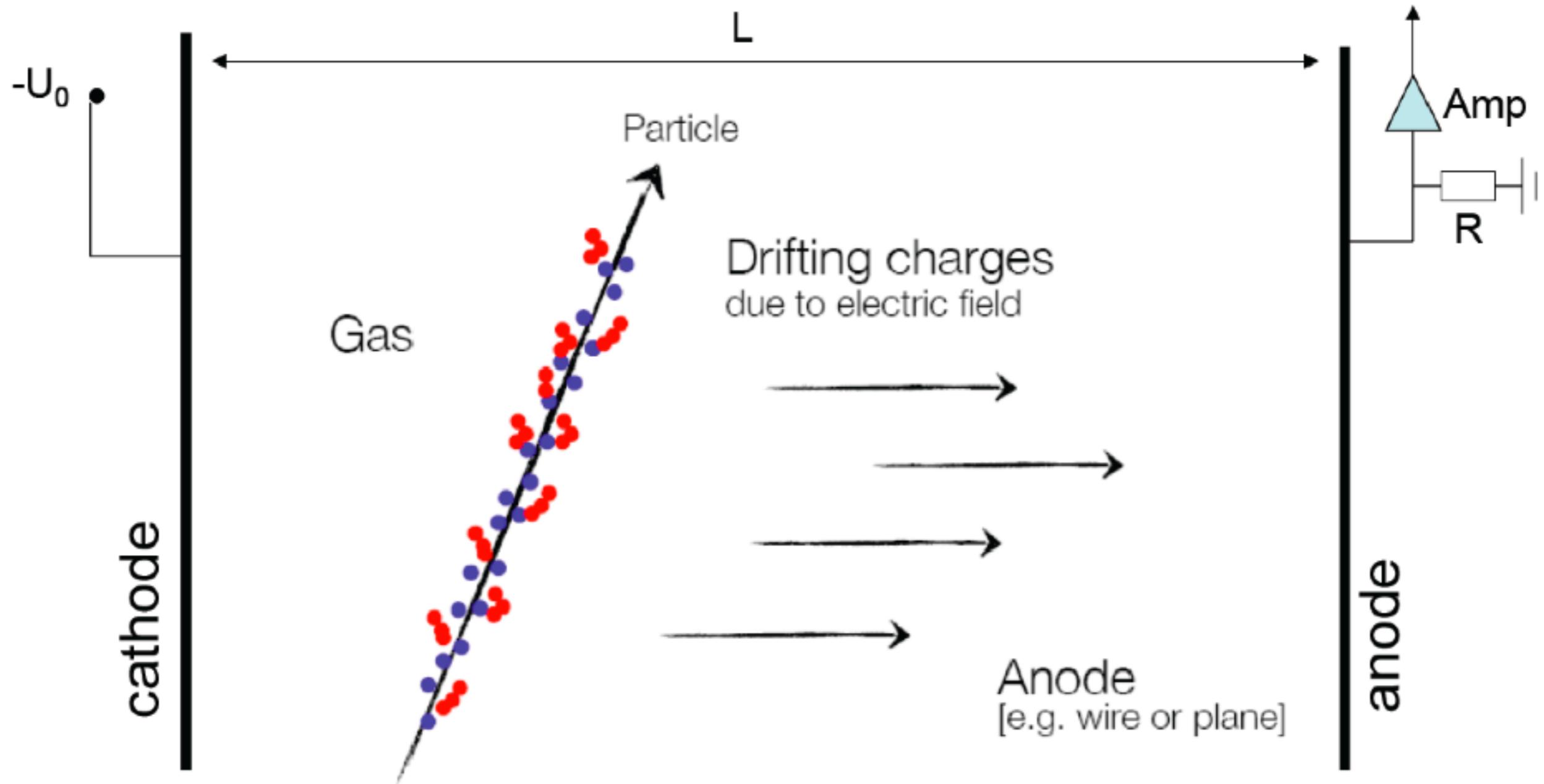


- Primary ionization
- Secondary ionization (due to δ -electrons)

- Las partículas cargadas al atravesar la materia dejan átomos excitados, creando pares de electrones-iones (gases) ó pares de agujeros de electrones (sólidos)
- Mediante la aplicación de un campo eléctrico en el volumen del detector, los electrones y los iones se pueden recoger en los electrodos y leer.



Vista esquemática de un detector

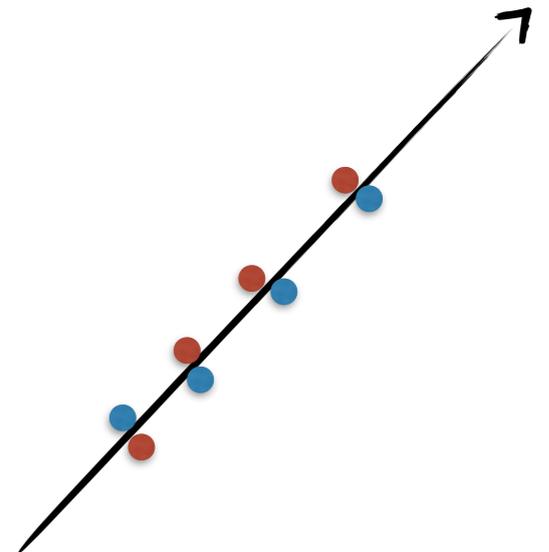


- Primary Ionization
- Secondary Ionization (due to δ -electrons)



Ionización primaria y secundaria

- Las interacciones de Coulomb entre el campo E de la partícula y las moléculas del medio producen pares de iones-electrones.
- Partículas en su mínimo de ionización (MIP) moviéndose en Argón (temperatura y presión normales)
 - ▶ $\langle n_p \rangle = 29 \text{ cm}^{-1} \rightarrow$ electrones primarios
- Los electrones primarios pueden ionizar el medio produciendo agrupaciones de iones-electrones locales. Algunos electrones pueden tener energía suficiente para producir un rastro largo (electrón delta).



- Número total de pares de iones n_T :
 - ▶ ΔE : pérdida de energía
 - ▶ w_i : energía promedio para producir un par de iones

$$n_T = \frac{\Delta E}{w_i}$$

- Para una MIP en Argón :
 - ▶ $\Delta E = 2.4 \text{ keV/cm}$ y $w_i = 26 \text{ eV}$
 - ▶ $n_T \sim 90$ pares de iones/cm



Trazas en una cámara de burbujas de 2m del CERN



Los gases más usados

Gas	ρ (g/cm ³) (STP)	I_0 (eV)	W_i (eV)	dE/dx (MeVg ⁻¹ cm ²)	n_p (cm ⁻¹)	n_t (cm ⁻¹)
H ₂	$8.38 \cdot 10^{-5}$	15.4	37	4.03	5.2	9.2
He	$1.66 \cdot 10^{-4}$	24.6	41	1.94	5.9	7.8
N ₂	$1.17 \cdot 10^{-3}$	15.5	35	1.68	(10)	56
Ne	$8.39 \cdot 10^{-4}$	21.6	36	1.68	12	39
Ar	$1.66 \cdot 10^{-3}$	15.8	26	1.47	29.4	94
Kr	$3.49 \cdot 10^{-3}$	14.0	24	1.32	(22)	192
Xe	$5.49 \cdot 10^{-3}$	12.1	22	1.23	44	307
CO ₂	$1.86 \cdot 10^{-3}$	13.7	33	1.62	(34)	91
CH ₄	$6.70 \cdot 10^{-4}$	13.1	28	2.21	16	53
C ₄ H ₁₀	$2.42 \cdot 10^{-3}$	10.8	23	1.86	(46)	195

Quelle: K. Kleinknecht, *Detektoren für Teilchenstrahlung*, B.G. Teubner, 1992



Estadística de la ionización

- Múltiples colisiones ionizantes siguen la estadística de Poisson:

$$\langle n_p \rangle = \frac{L}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{1}{n_e \sigma_I}$$

$$P_{n_p}^{\langle n_p \rangle} = \frac{\langle n_p \rangle^{n_p} e^{-\langle n_p \rangle}}{n_p!}$$

σ_I : sección eficaz de ionización

n_e : densidad de electrones

L : Distancia recorrida

$\langle n_p \rangle$: promedio de electrones primarios

$$\varepsilon = 1 - P_0^{\langle n_p \rangle} = 1 - e^{-\langle n_p \rangle}$$

- Typical values of the mean free path λ

- He 0.25 cm
- Air 0.052 cm
- Xe 0.023 cm

L (mm)	ε (%) for $\langle n_p \rangle = 25$ /mm
1	91.8
2	99.3

- Eficiencia

- Otros parámetros importantes son:

- ▶ Recombinación y unión de electrones debido a gases electro-negativos que unen electrones; Ej: O₂, Freon, Cl₂, SF₆ ... → influencia la eficiencia del detector
- ▶ Difusión → Influye en la resolución espacial
- ▶ Movilidad de cargas → Influye en el comportamiento temporal de los detectores de gas
- ▶ Proceso de avalancha mediante ionización por impacto: → Importante para el factor de ganancia del detector de gas



Transporte de electrones/iones en el gas

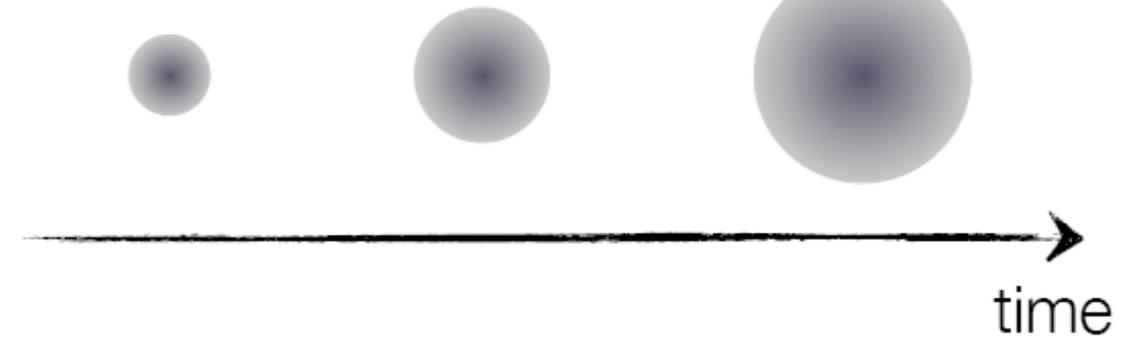
- La difusión se evalúa utilizando la teoría cinética clásica de los gases.

N : número de partículas

$$\frac{dN}{dx} = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

Diffusion without E,B field

Electron cloud



- Los pares e-/ion se distribuyen tienen una distribución gaussiana $\sigma(r)$ después de un tiempo de difusión t

$$\sigma(r) = \sqrt{6Dt}$$

El coeficiente de difusión D , depende de la presión P y la temperatura T

$$D = \frac{1}{3} v \lambda = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{1}{P\sigma_0} \sqrt{\frac{(kT)^3}{m}}$$

- El camino libre medio de los pares e-/ion

σ_0 : sección eficaz de interacción

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{kT}{\sigma_0 P}$$

- La velocidad media según la distribución de Maxwell

m : la masa de la partícula

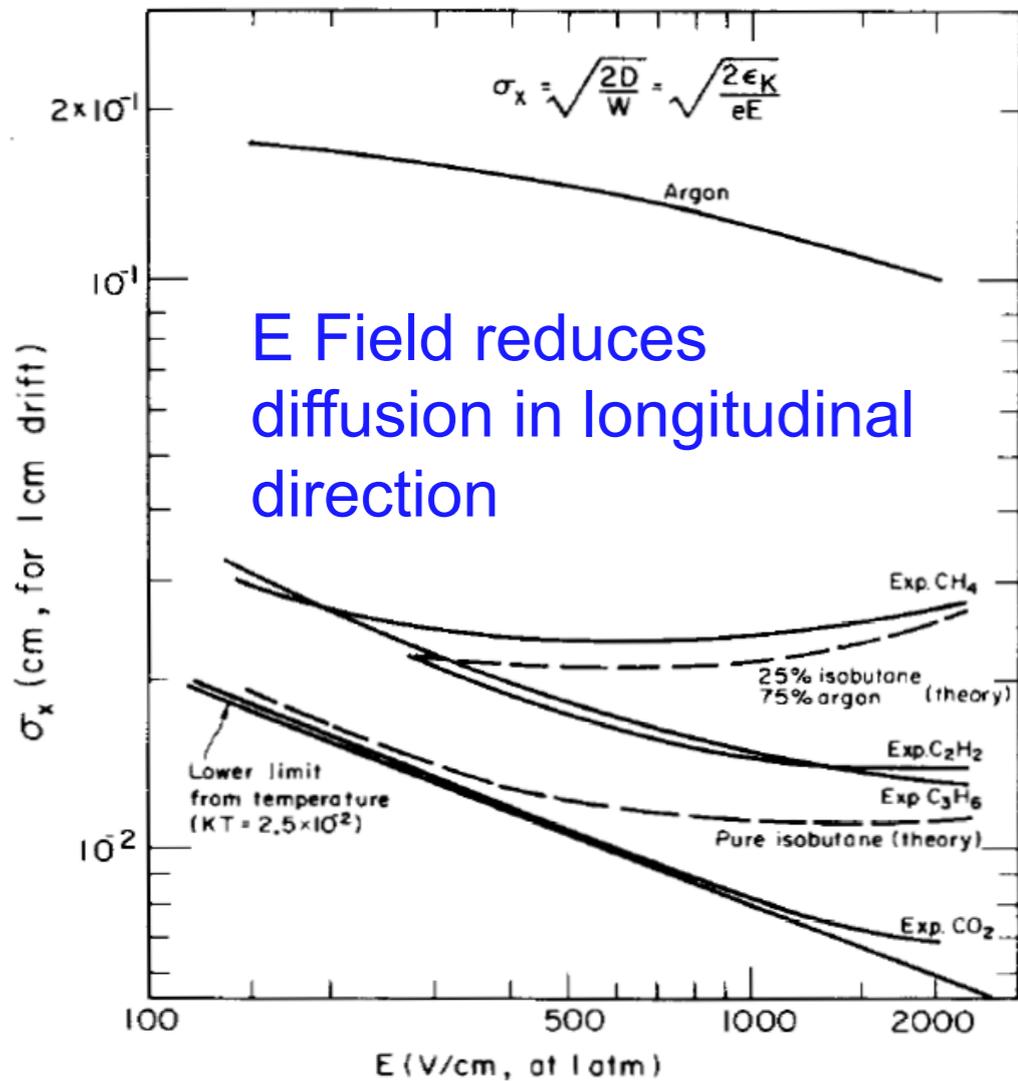
$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$



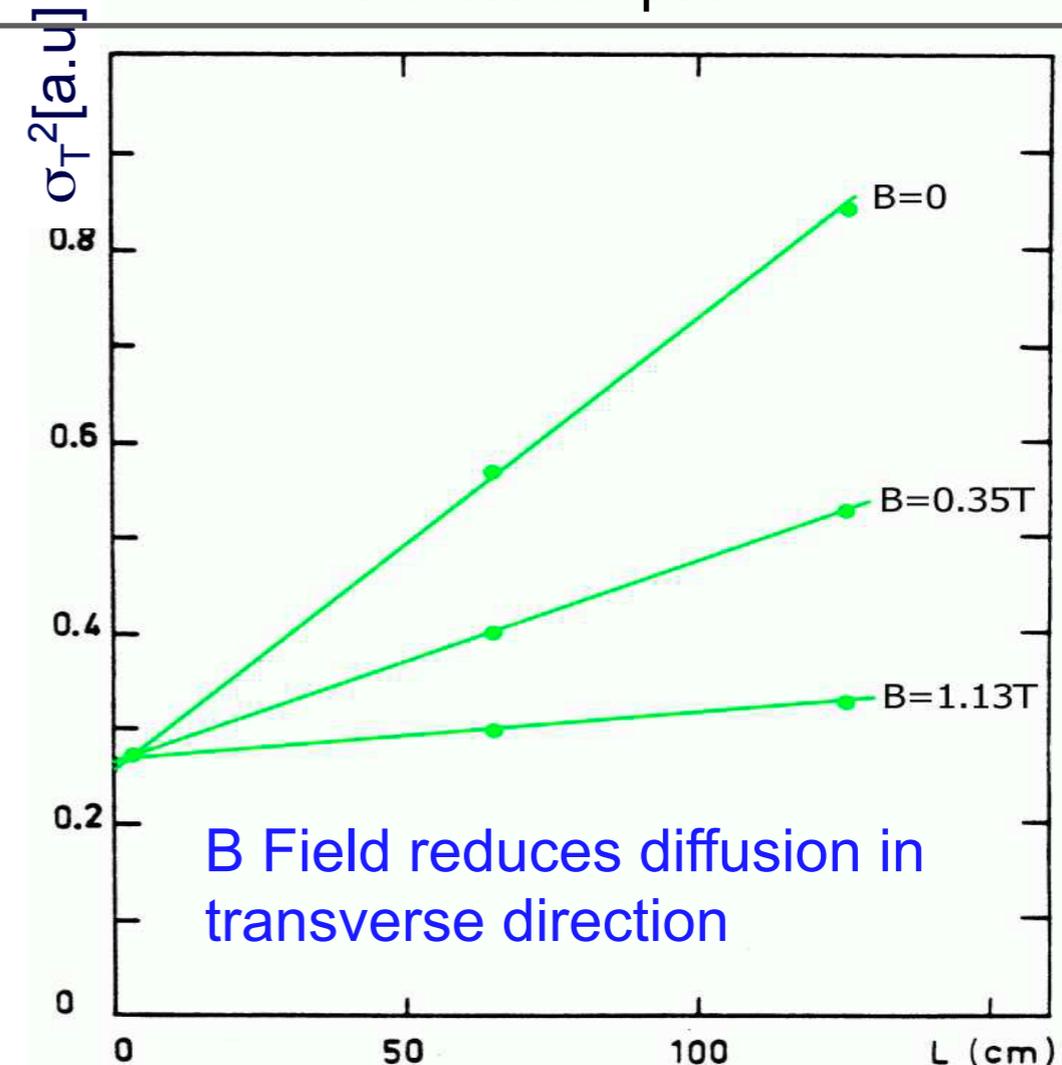
Deriva y difusión en campos E y B

- Si ponemos nuestro detector dentro de un campo eléctrico, la deriva de las partículas cargadas será mucho mas rápido, lo que limita el tiempo de deriva y a su vez la difusión de la nube de pares e-/ion

Difusión longitudinal en función del campo E



Difusión transversal vs longitud de deriva para diferentes campos B



- La ecuación de transporte generalmente se resuelve numéricamente usando programas como Magboltz y Garfield



Deriva y movilidad

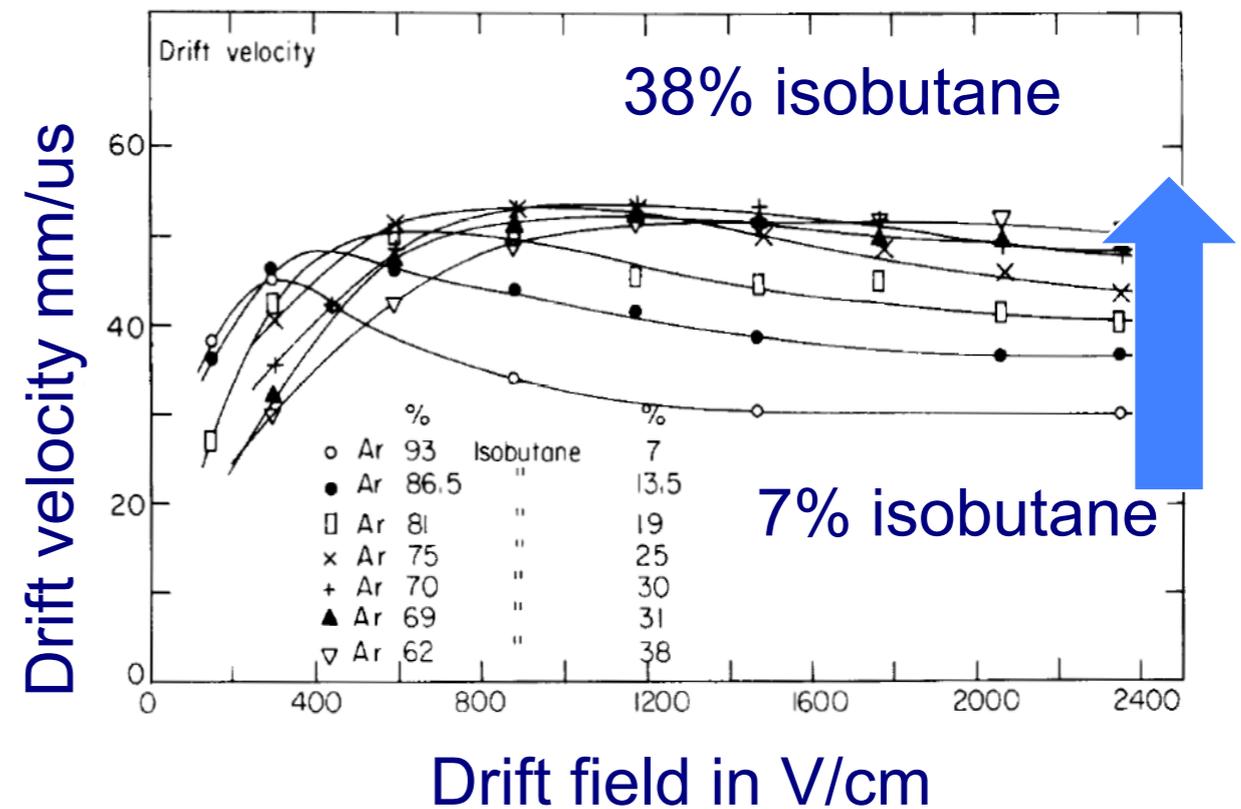
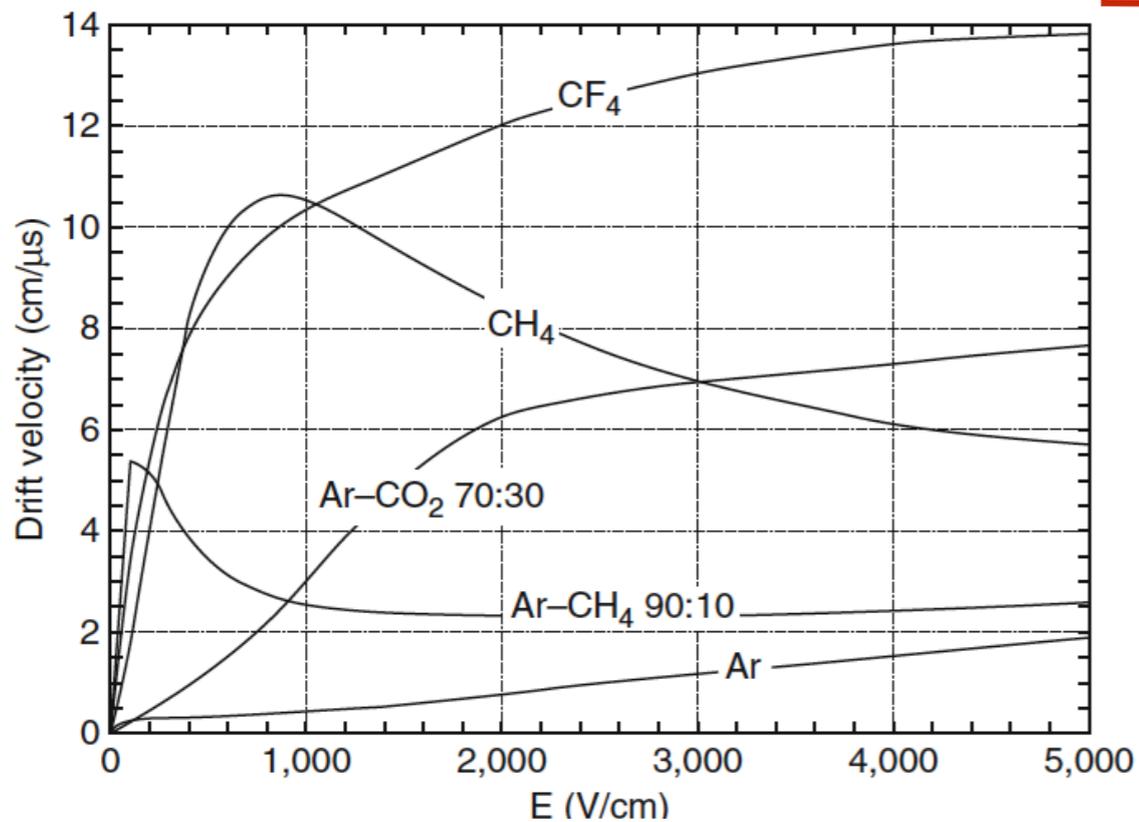
- En un campo E externo, los pares e-/ion adquieren una velocidad de deriva v_D , además del movimiento térmico; en promedio, los pares e-/ion se mueven a lo largo de las líneas de campo del campo eléctrico

$$\vec{v}_D = \mu_{\pm} |\vec{E}|$$

- valores típicos de v_D
 - $E \sim 1 \text{ kV/cm}$
 - $v_d \approx \text{cm/ms}$ for ions
 - $v_d \approx \text{cm}/\mu\text{s}$ for e-

- μ mobility
- E Campo eléctrico

Los electrones se mueven mucho más rápido que los iones!



- Mezclas de CF₄- pueden alcanzar $v_D \sim 10 \text{ cm}^4 \mu\text{s}^{-1}$

- Dado que el tiempo de recolección es inversamente proporcional a la velocidad de deriva, los efectos de difusión se reducen en gases como el CF₄ que tienen una alta deriva.



Multiplicación en la avalancha

- La señal de ionización primaria es muy pequeña en una capa de gas: en 1 cm de Ar / CO₂ (70:30) a temperatura y presión normales, solo se crean ~100 pares e-/ion → necesario utilizar un mecanismo de "amplificación en el gas" para aumentar la señal

- Campos E grandes → electrones con energía cinética grande → formación de avalanchas

- $dn = n \alpha dx$

α =Coeficiente de ionización de Townsend

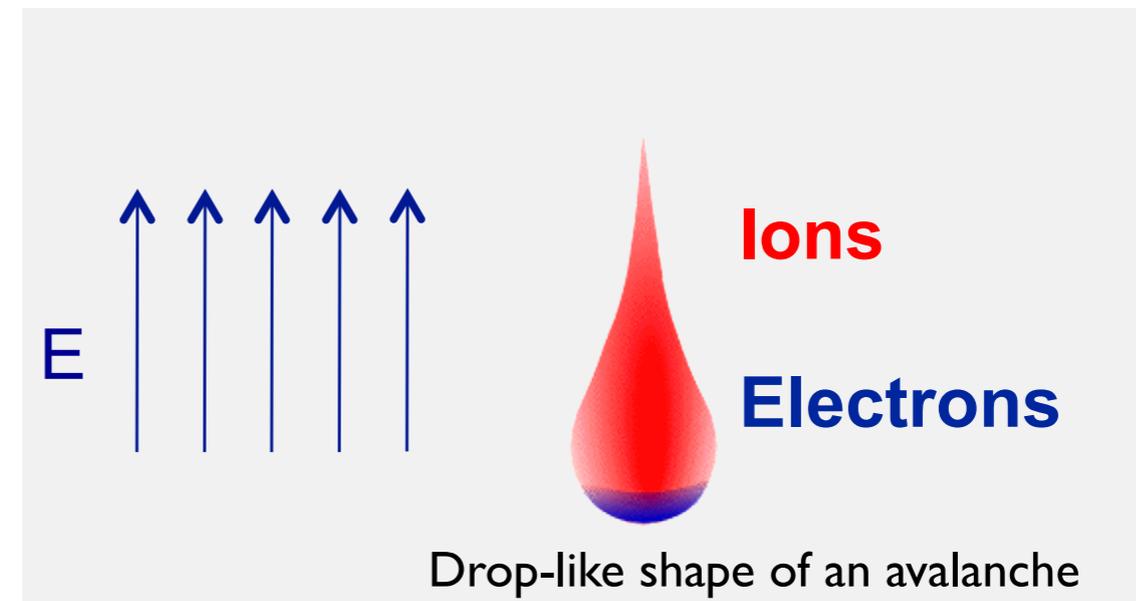
- $n(x) = n_0 e^{\alpha x}$

$n(x)$ =electrons en un punto x

- Ganancia o Amplificación es:

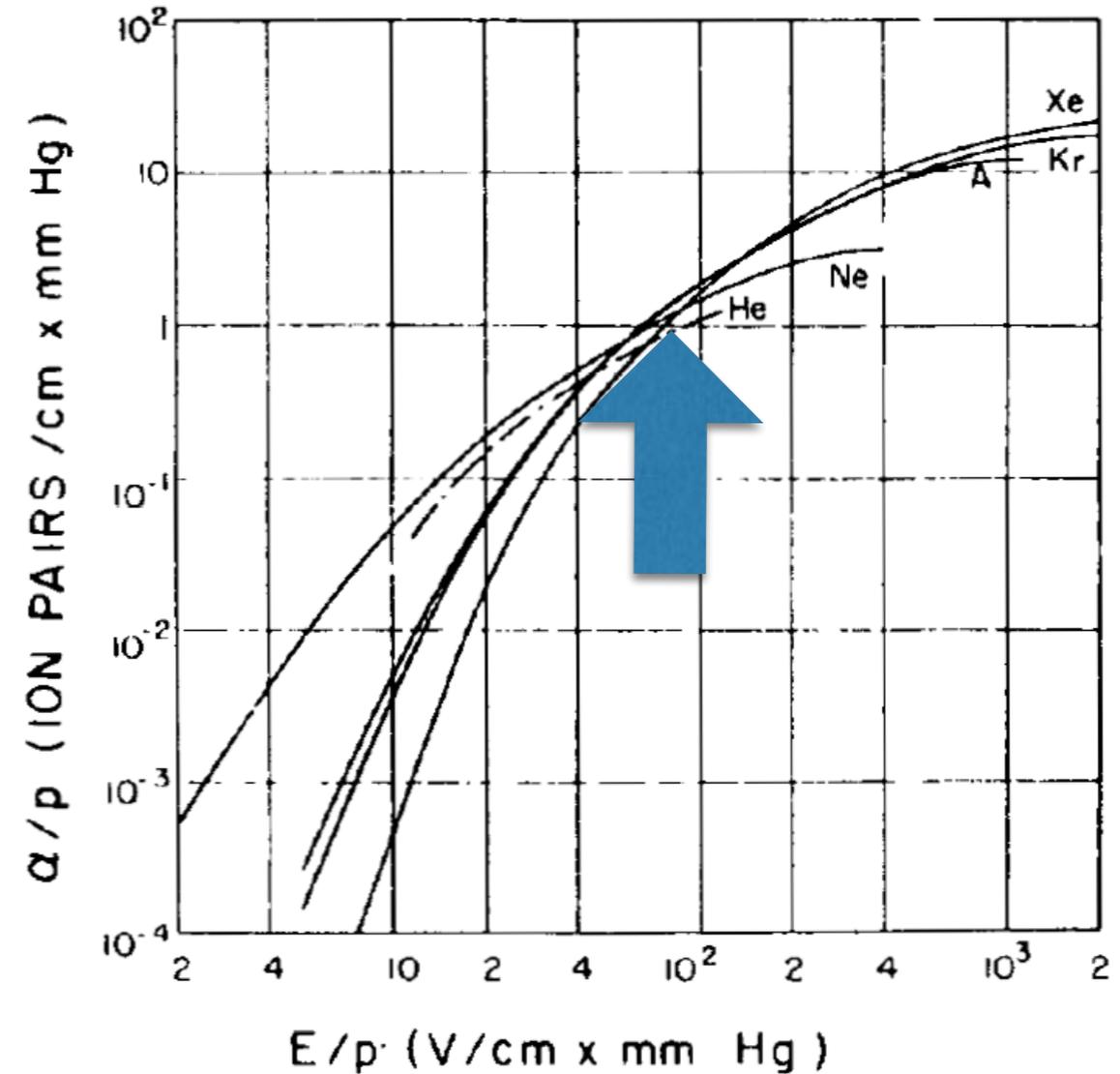
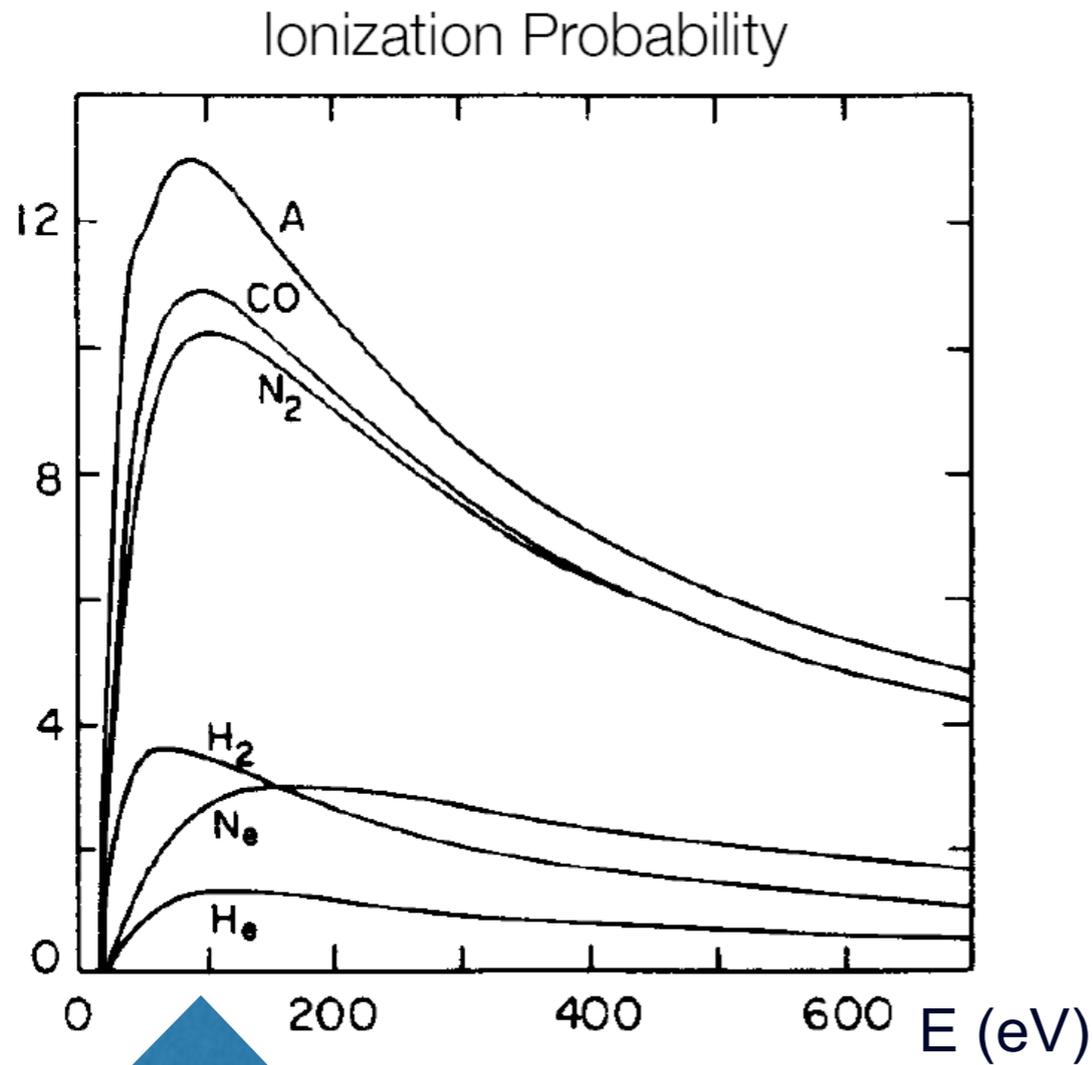
$$G = \frac{n}{n_0} = e^{\alpha x}$$

- El limite de Raether $G \approx 10^8$, es el punto en el que chispas "sparks" comienzan a aparecer





Multiplicación en la avalancha



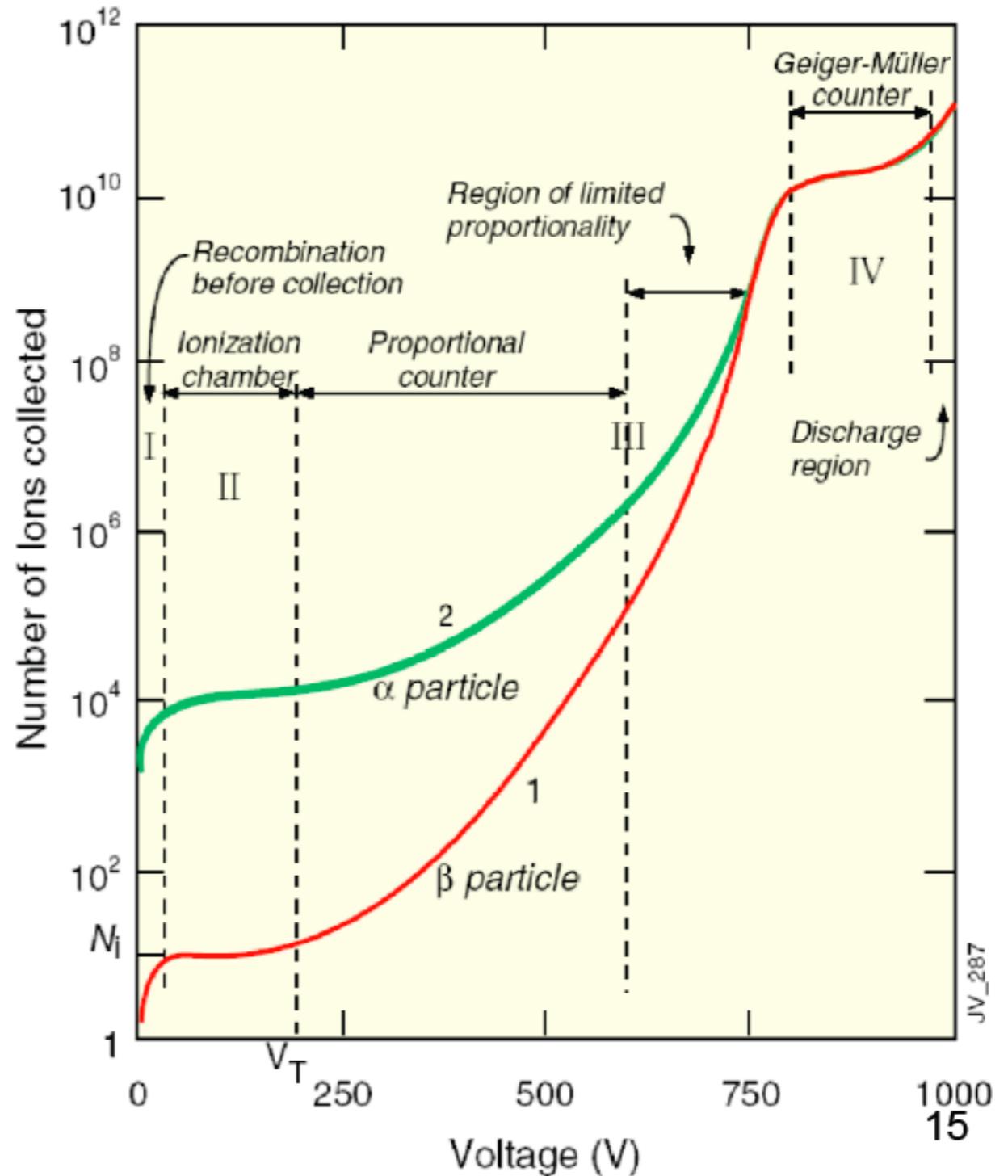
- Se necesita al menos una energía de 75-100 eV para tener una alta probabilidad de ionización (y necesita ganarla en unos pocos μm)

- $E=75$ kV/cm to reach $\alpha=1$



Factor de amplificación del gas

- **Modo de ionización:** colección de carga completa; sin amplificación; $G = 1$ (sin ganancia)
- **Modo proporcional:** multiplicación; señal proporcional a la ionización original \Rightarrow medición de dE / dx . Las avalanchas secundarias deben apagarse; $G \approx 10^4 - 10^5$
- **Proporcional limitado (saturado, modo Streamer):** fuerte fotoemisión; Requiere quenchers fuertes. Alta ganancia $10^{10} \Rightarrow$ señal grande, electrónica simple
- **Modo Geiger:** emisión masiva de fotones. Todo el ánodo se ve afectado. Descarga detenida por corte HV





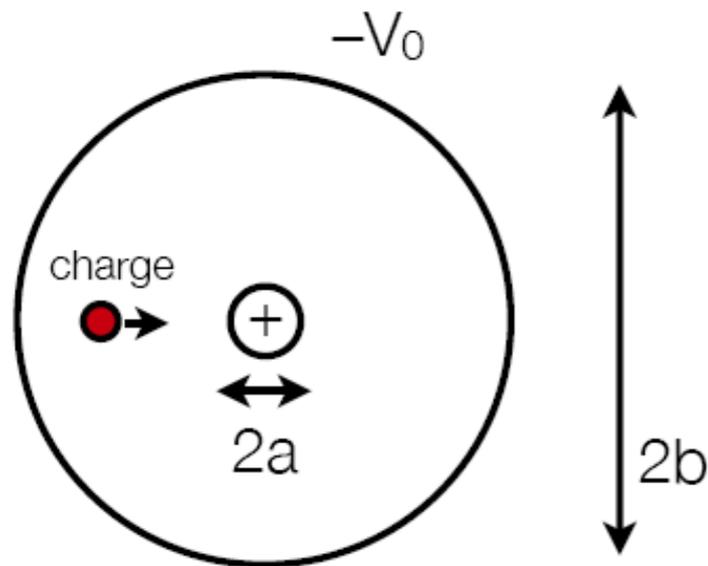
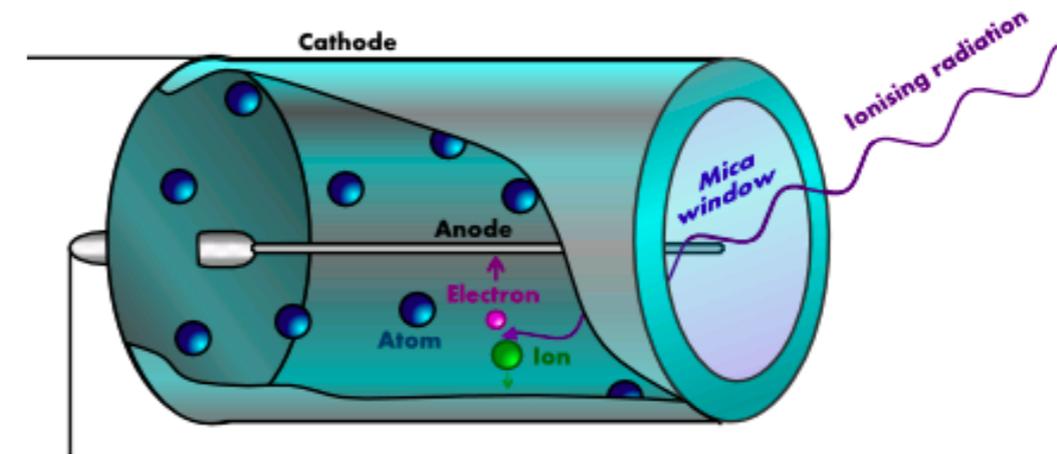
- ¿Como se genera la señal?
 - Ionización primaria y secundaria
 - Probabilidad de ionización depende del gas y de los campos E y B
 - Movilidad de pares e-/iones en el gas
 - Multiplicación de la señal (Ganancia)

- ¿Qué parámetros son críticos / importantes?
 - Eficiencia deseada del detector
 - Ganancia requerida. Estabilidad de la ganancia (medición precisa dE / dx)
 - "plateau" de parámetros (HV, fracción de gas, etc.)



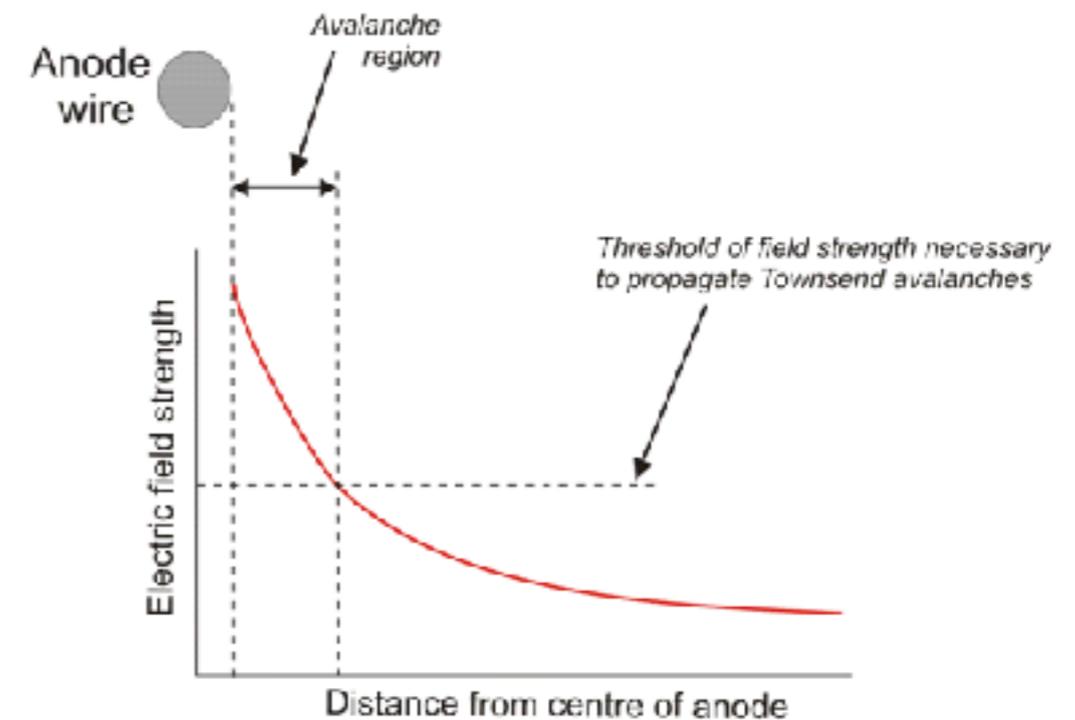
Contador proporcional

- Contador proporcional cilíndrico:
 - Alambre de ánodo único en un cátodo cilíndrico
 - $E \sim 1/r$: campo débil lejos del cable
 - los electrones / iones se derivan en el volumen
 - La multiplicación ocurre solo cerca del ánodo



$$E = \frac{V}{r \ln(a/b)}$$

- Fuerte campo E cerca del cable
- Se usan alambres delgado



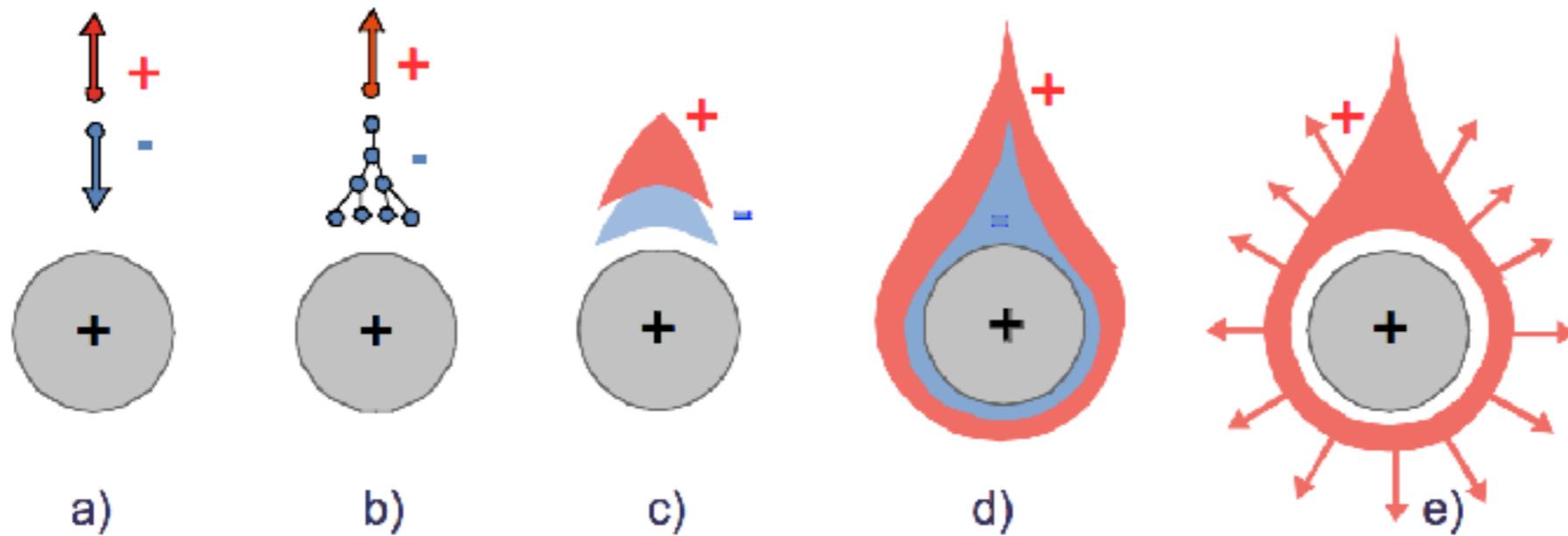
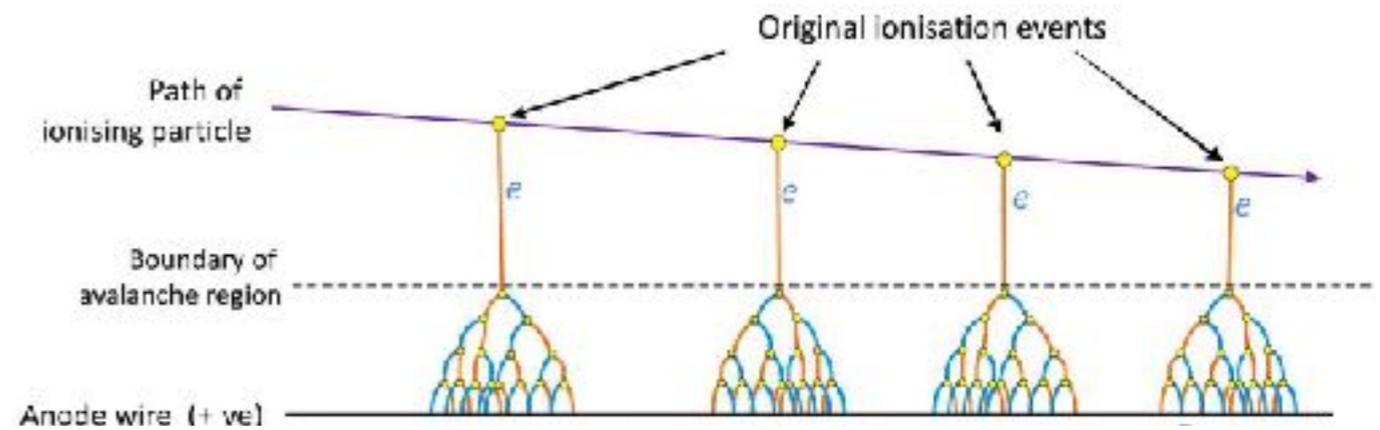
- La energía cinética de los electrones se vuelve muy grande cerca del cable y puede producir ionización secundaria.

$$\Delta T_{kin} = e\Delta U$$



Desarrollo de una avalancha

- Desarrollo de una avalancha cerca del cable de un contador proporcional.

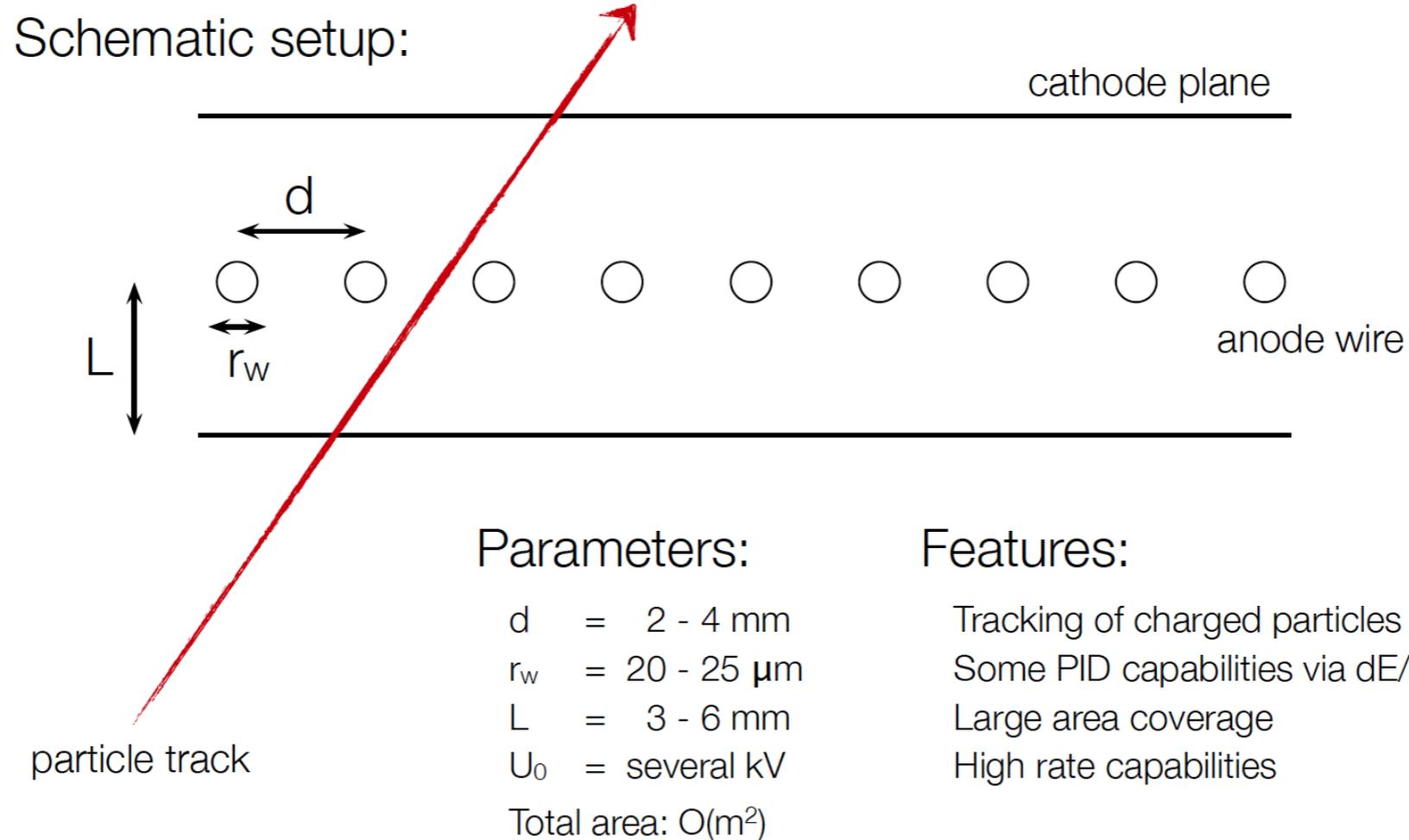


- a) un solo electrón primario avanza hacia el ánodo del alambre,
- b) En la región de campo cada vez más alto, comienza la multiplicación de avalanchas.
- c) los electrones y los iones están sujetos a difusión lateral,
- d) se desarrolla una avalancha en forma de gota que rodea el cable del ánodo,
- e) los electrones se recogen rápidamente (~ 1 ns) mientras que los iones comienzan a desplazarse hacia el cátodo generando la señal en los electrodos



Cámara proporcional de multihilos

- Charpak desarrolló una cámara proporcional de múltiples cables MWPC (premio Nobel 1992)

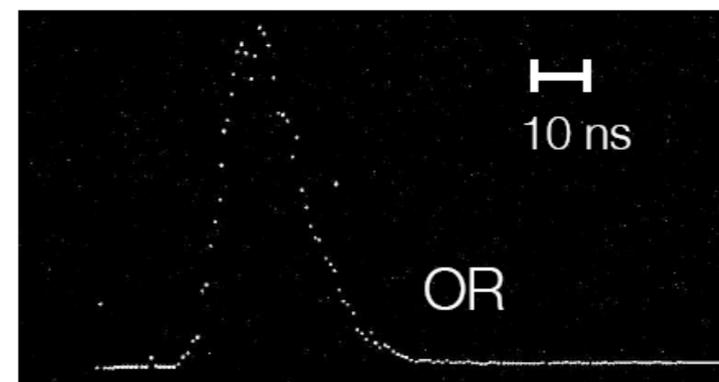
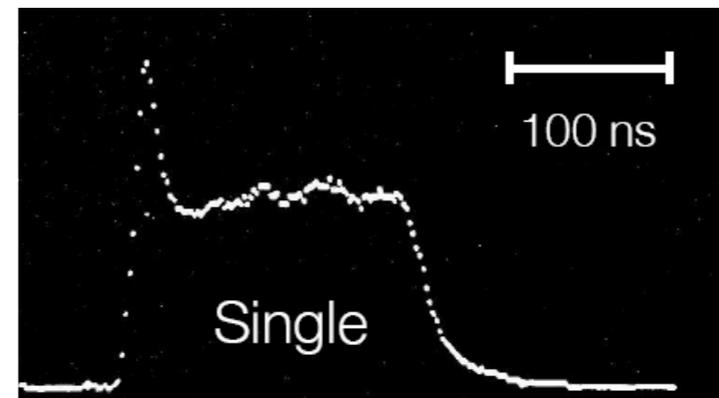
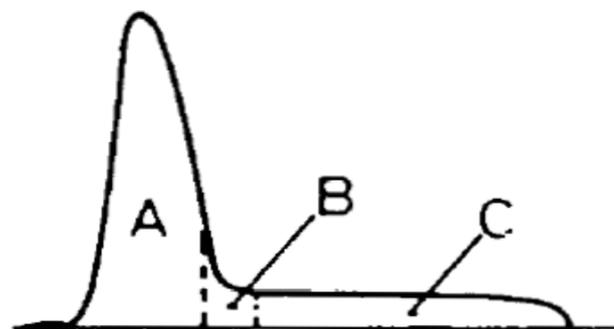
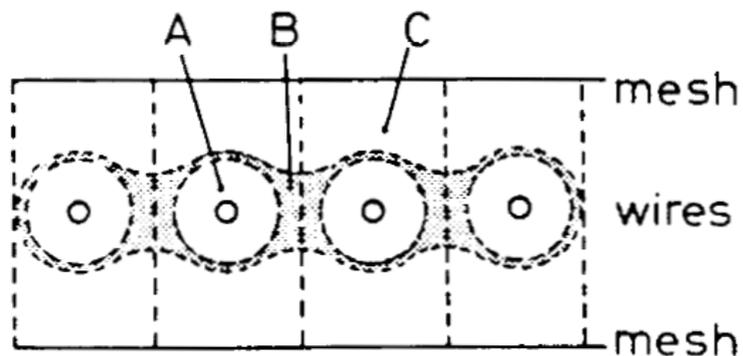


- La cámara permitió un avance enorme en tasa detección. Las cámara de burbujas usadas hasta entonces permitían detectar una o dos partículas por segundo, mientras que las cámaras multihilos permiten 1000 detecciones de partículas por segundo.
- Es una cámara proporcional que tiene la capacidad de medir las energías de las partículas.
- Permite medir las trayectorias de las partículas con una precisión mucho mayor.



Funcionamiento de MWPC

- Creación de la señal:
 - Los electrones se desplazan hacia el cable más cercano. Amplificación de gas cerca del cable → generación de señal de avalancha debido a electrones e iones lentos
- Resolución temporal: de una cámara se define como el ancho de puerta mínimo necesario en la electrónica de detección para una eficiencia total;
 - Depende del punto por donde pasa la partícula
 - Para una respuesta rápida: hay que considerar todos los canales ... [Typical: $\sigma_t \approx 10$ ns]





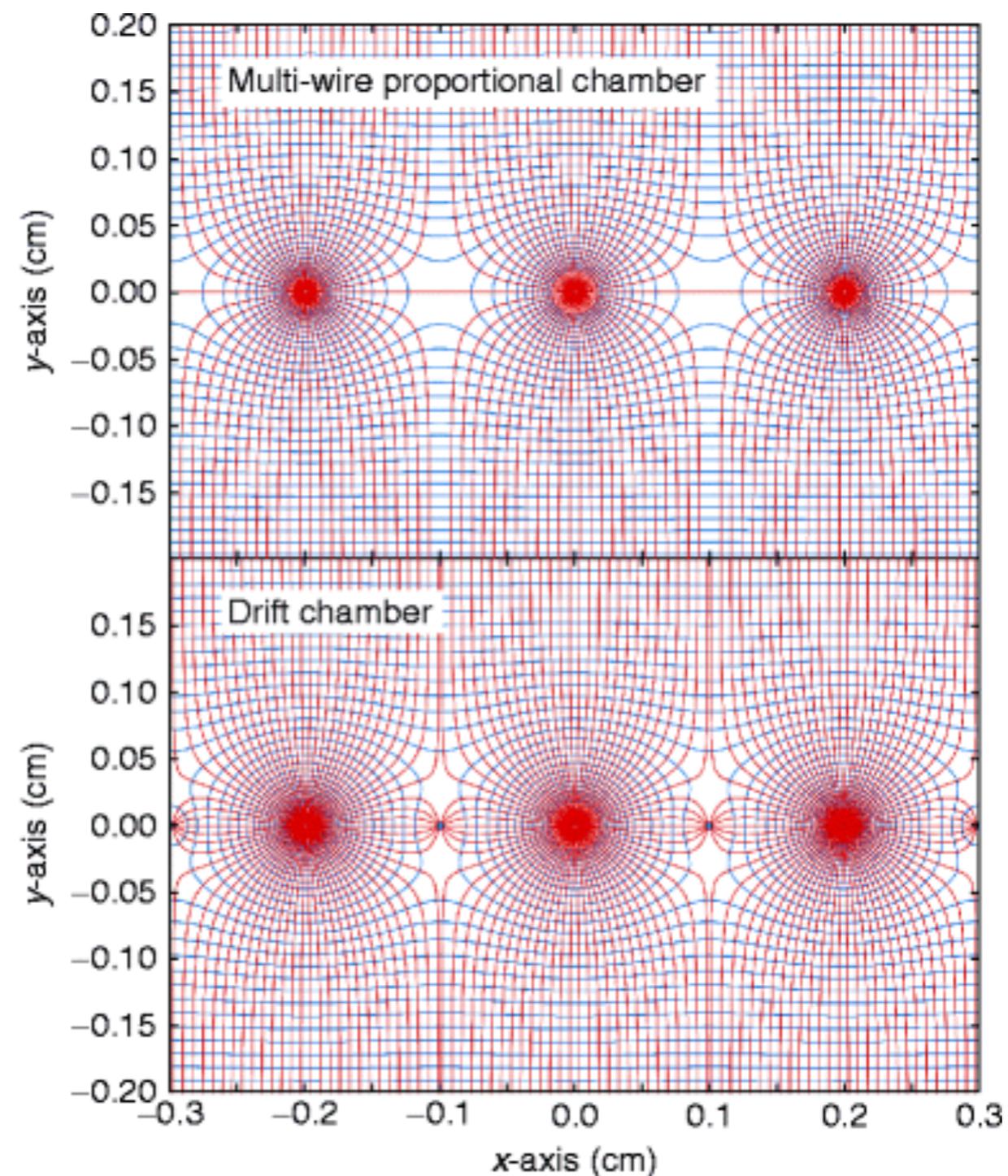
Distribución de los campos

■ MWPC:

- La operación es difícil cuando las distancias entre cables son pequeñas.
- La repulsión electrostática entre alambres de ánodo delgados ($10\ \mu\text{m}$) causa inestabilidad mecánica por encima de una longitud crítica de alambre

■ Cámaras de deriva (Drift chambers)

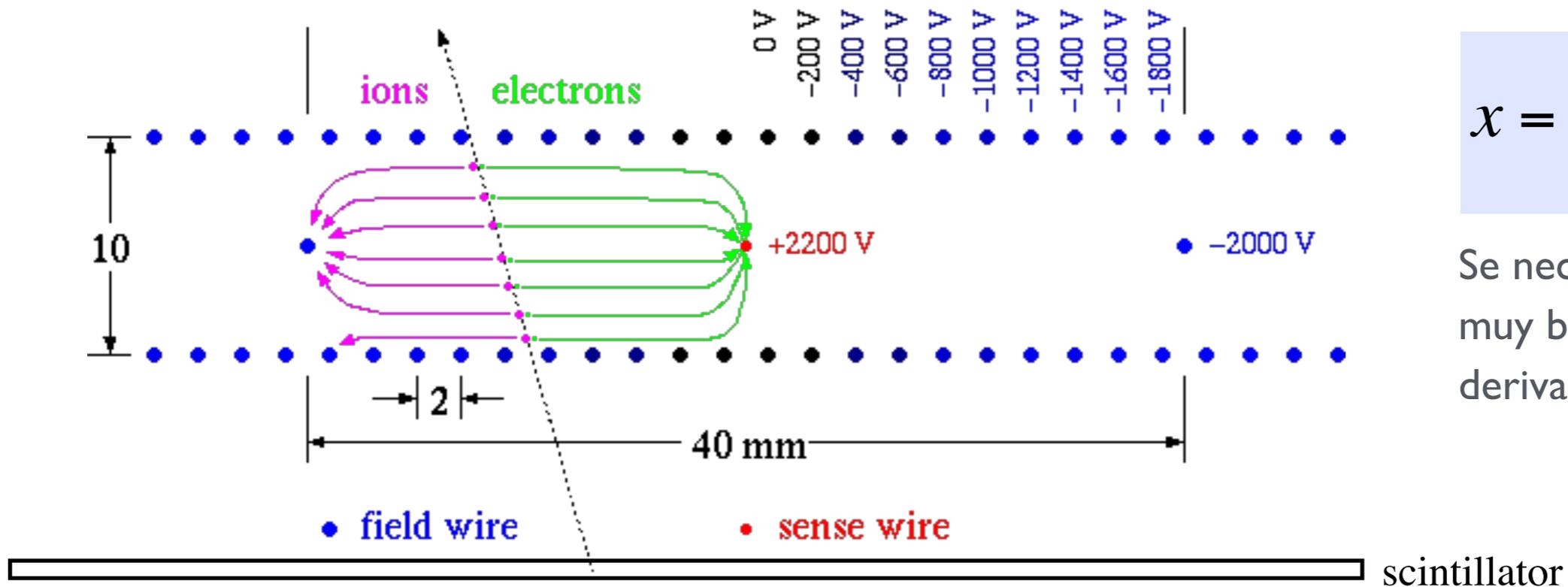
- Un cable más grueso al voltaje adecuado entre los ánodos (cable de campo) reduce el campo en el punto medio entre los ánodos y mejora la recolección de carga.
- Mejora la linealidad de la relación espacio-deriva-tiempo → resultando en una mejor resolución espacial





Cámaras de deriva

- Requieren una configuración específica de cables para tener un campo eléctrico homogéneo
- Permiten obtener información espacial midiendo el tiempo de deriva de los electrones
 - medición de tiempo iniciada por un detector externo (rápido), ej. contador de centelleo
 - los electrones se desplazan hacia el ánodo (cable sensor), en el campo creado por los cátodos
 - la llegada del electrón al ánodo detiene la medición del tiempo



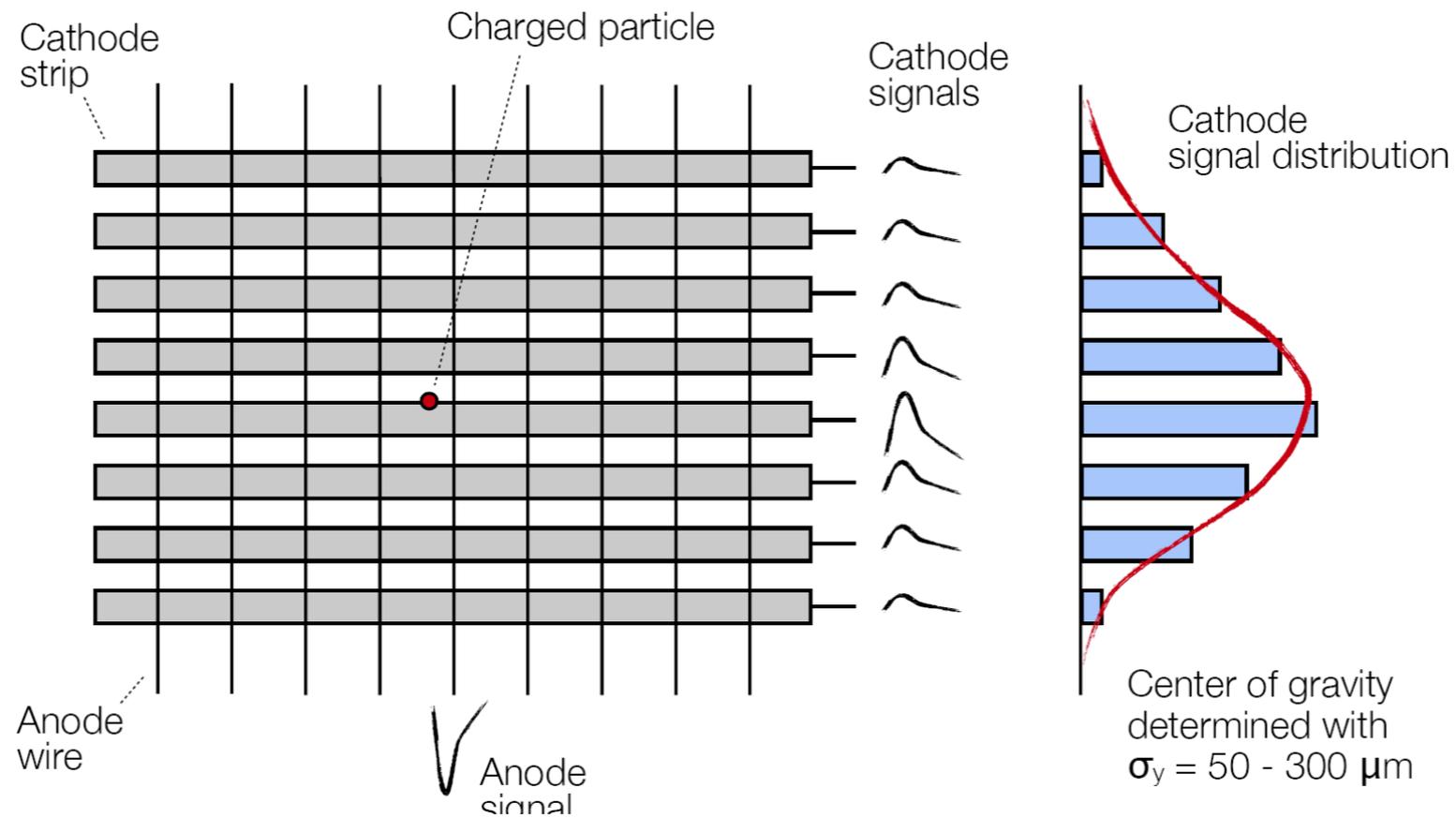
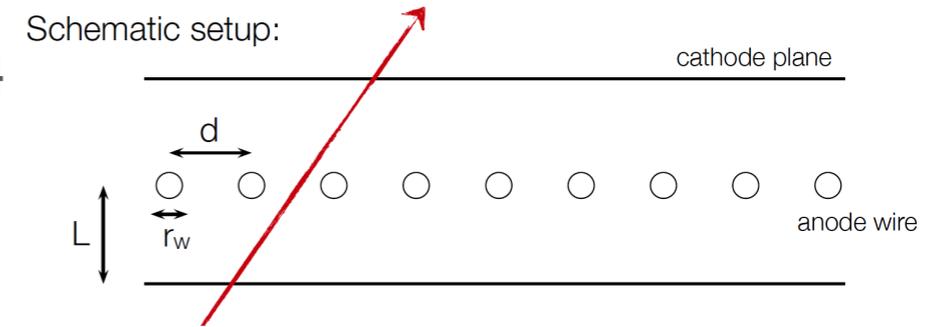
$$x = \int_0^{t_D} v_D dt$$

Se necesita conocer muy bien el campo de deriva



MWPC: Resolución espacial

- Para calcular la posición de la partícula podemos solo información sobre el cable más cercano $\rightarrow \sigma_x = d/\sqrt{12}$ [$d=2-4$ mm, $\sigma_x \sim 0.6-1$ mm]
- Algunas mejores incluyen el uso de cátodos segmentados

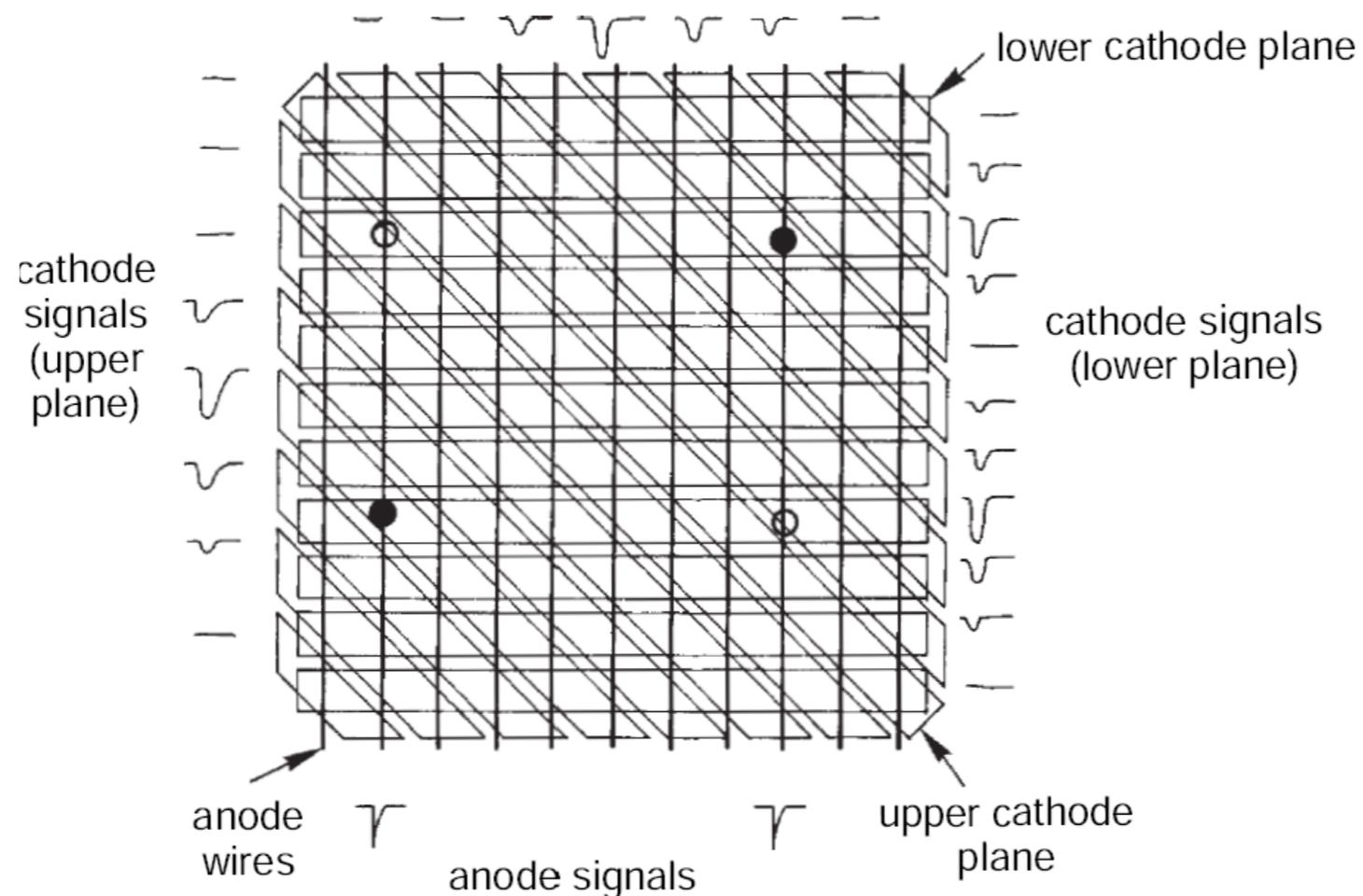


- 2-dim.: Usando 2 MWPCs orientados en distintas direcciones
- 3-dim.: multiples capas creado combinaciones X-Y-MWPC



MWPC: Camaras 2D

- Se puede obtener una mejora importante en la resolución espacial usando un cátodo segmentado en tiras/almoHADILLAS:
 - Información en 2D disponible
 - Resolución espacial mejora al usar el centro de gravedad en lugar de una sola medida
 - Resuelve ambigüedades en el posición

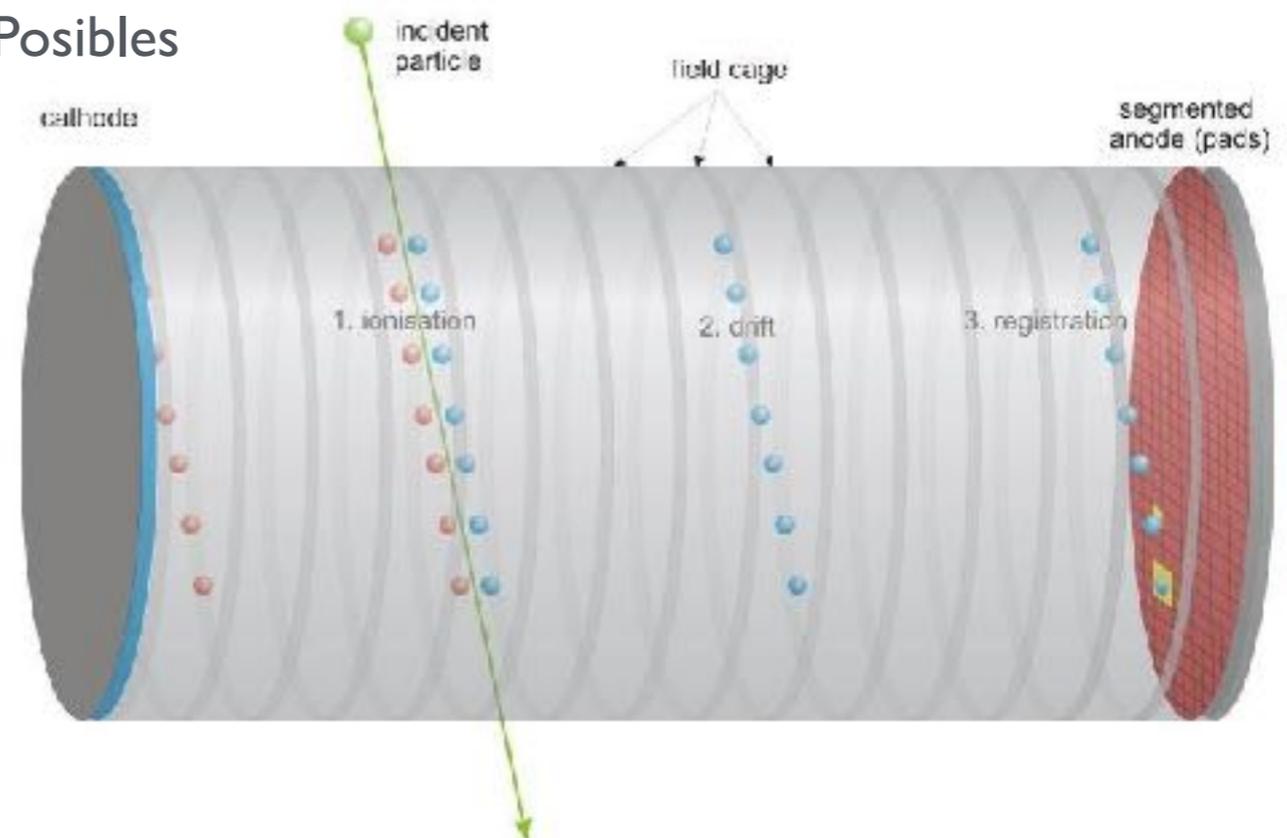


- true hit
- ghost hit



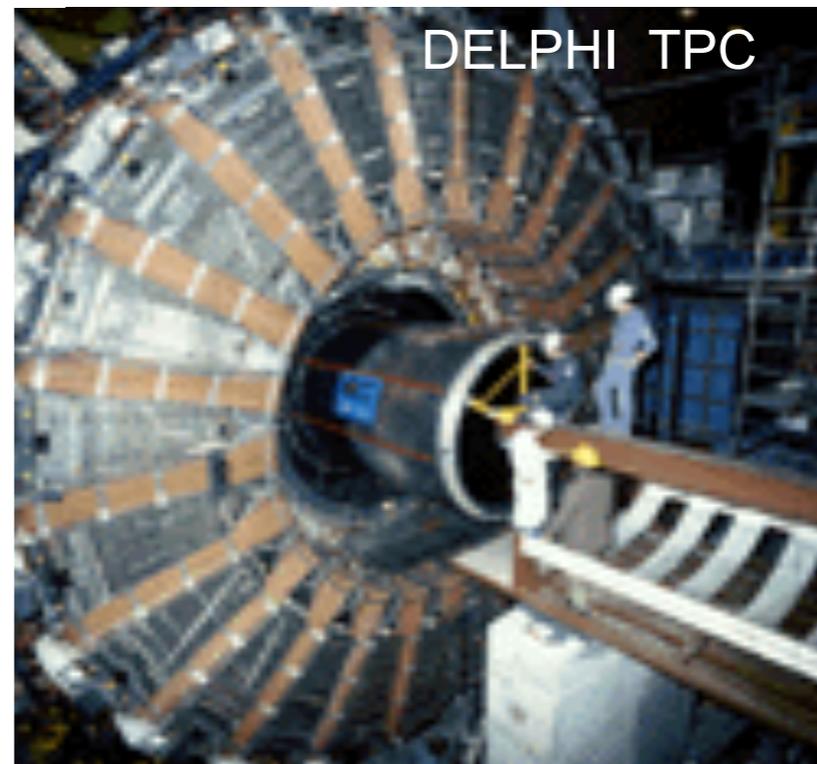
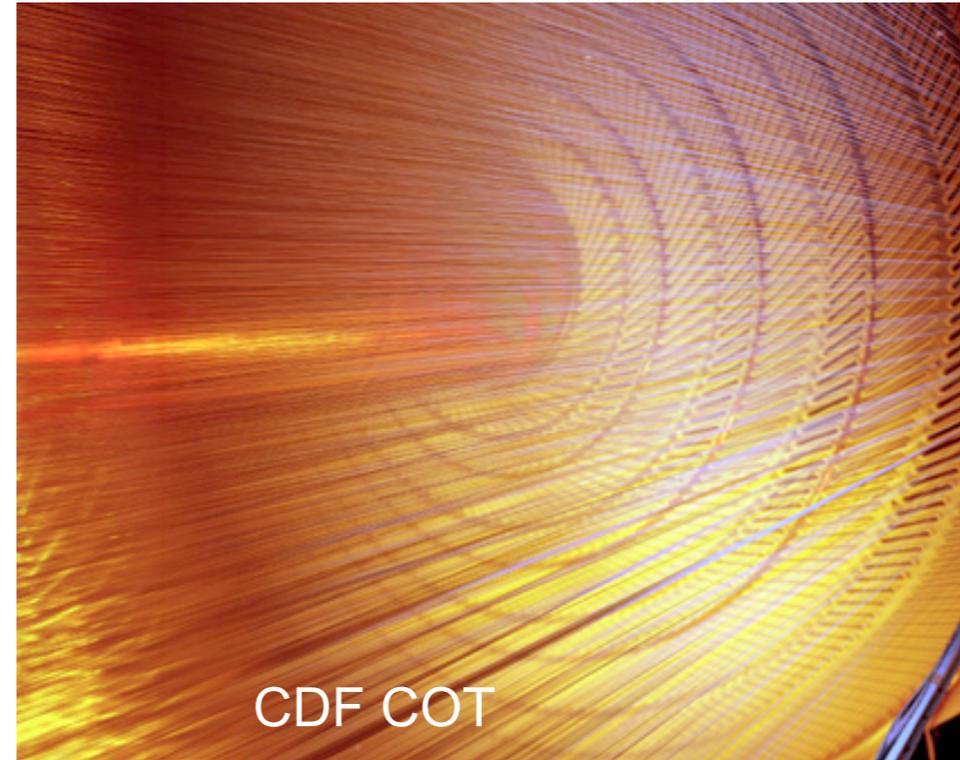
Time Projection Chambers (TPC)

- Permiten la reconstrucción 3-D de un evento :
 - X-Y: usando MWPC y pads de MWPC en las tapas
 - Z: tiempo de deriva (varios metros)
 - Se necesita un campo eléctrico muy uniforme
- Resolución típica
 - $z, y \approx \text{mm}$, $x = 150\text{-}300 \mu\text{m}$
 - $dE/dx \approx 5\text{-}10\%$
- Ventajas:
 - Reconstrucción completa de la traza → Posibles medidas del momento
 - Buena identificación por dE/dx
- Retos al usar estos detectores
 - Tiempo de deriva larga (low rate)
 - Gran volumen (precisión)
 - Grandes voltajes (descargas)
 - Gran volumen de datos
 - Operación difícil a alta velocidad





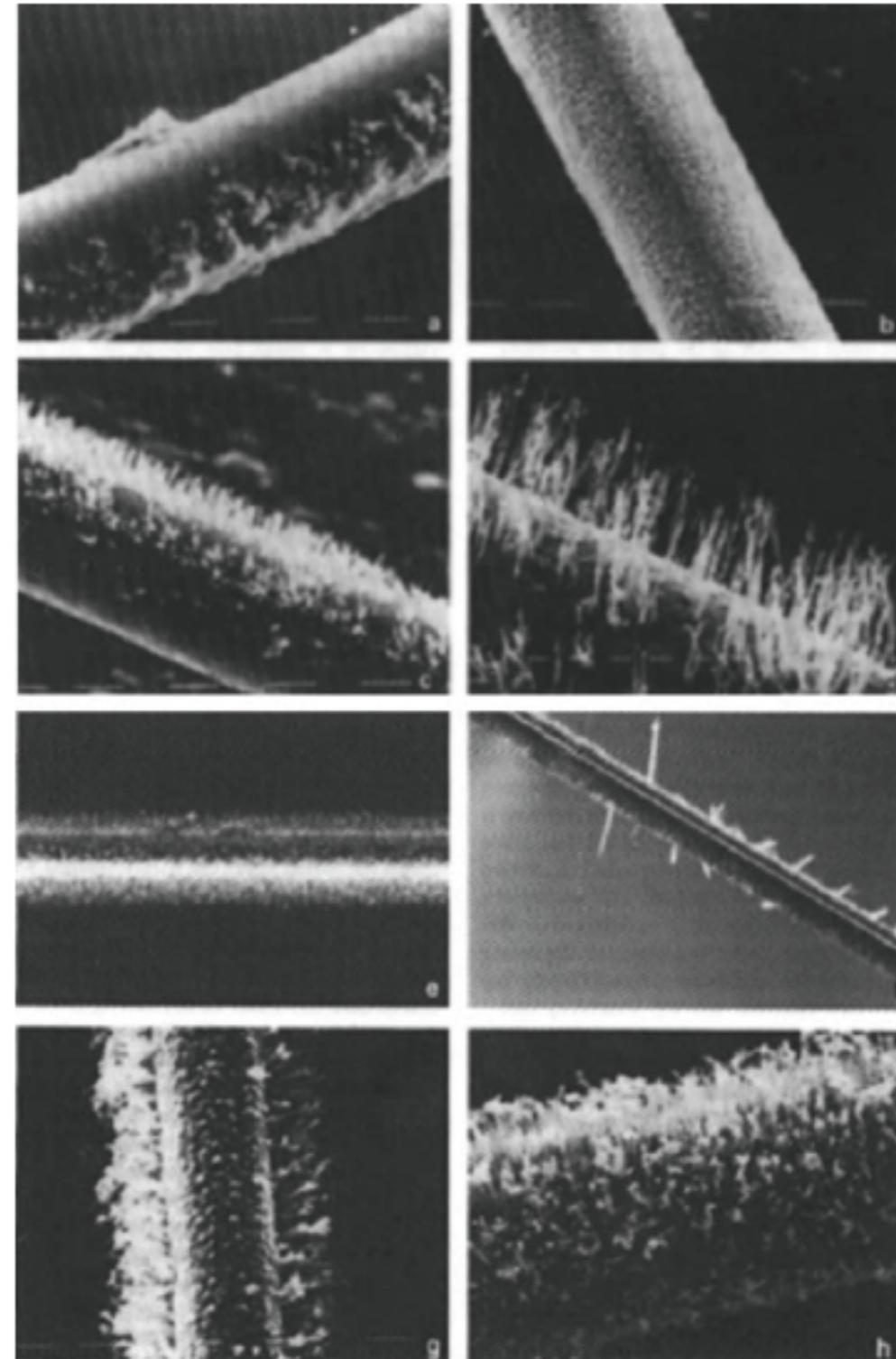
Time Projection Chambers (TPC)





Envejecimiento de los hilos

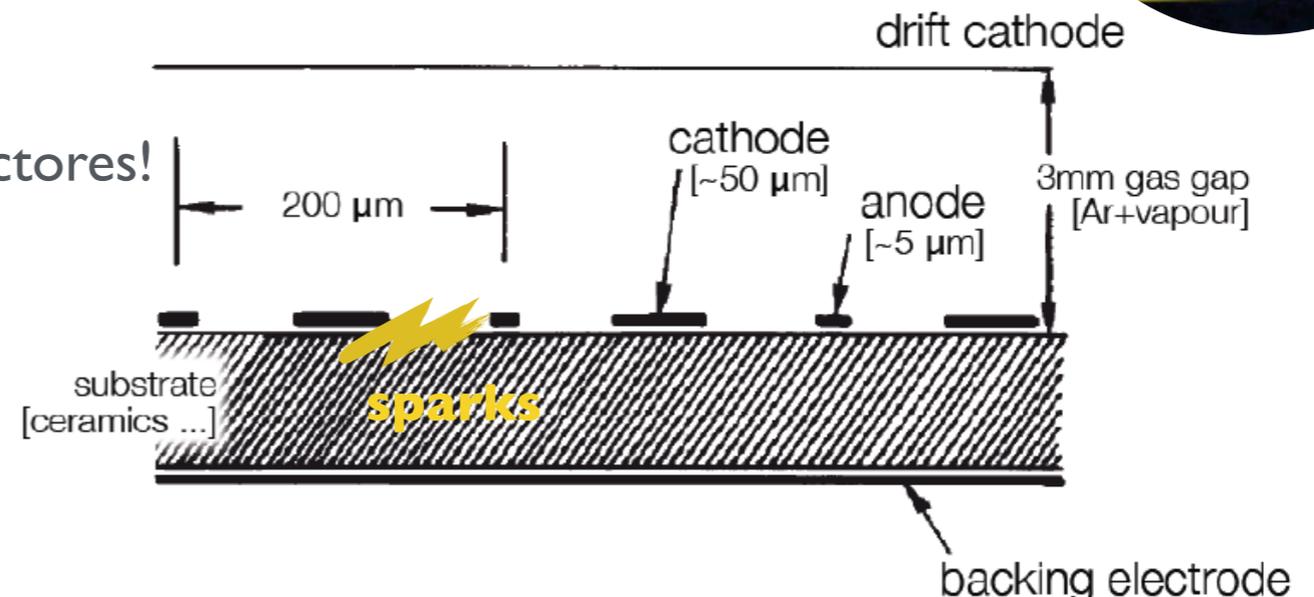
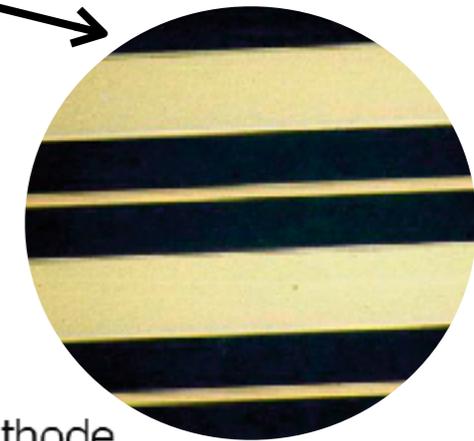
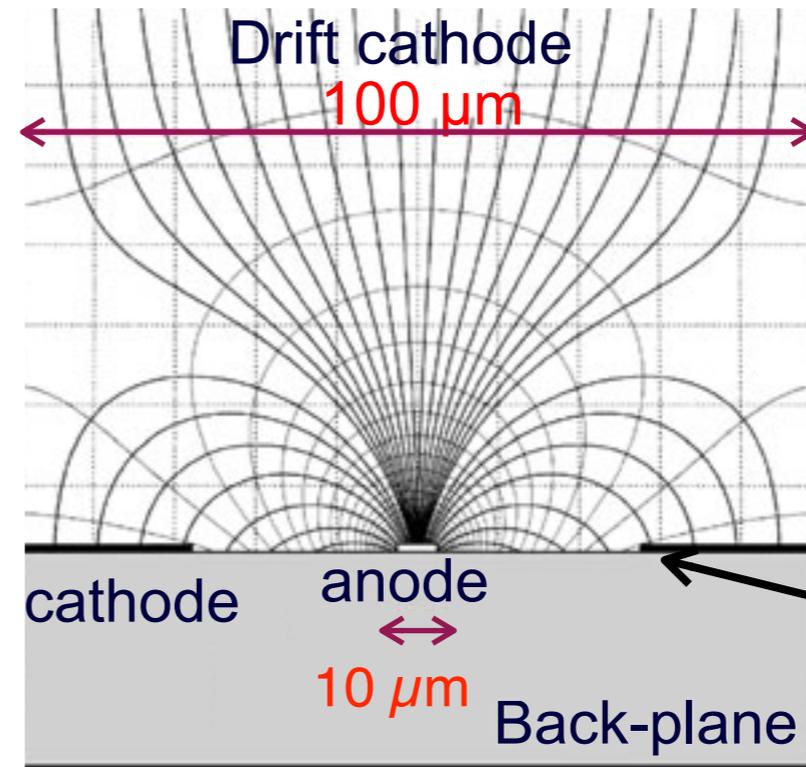
- Consecuencias de las avalanchas de multiplicación
 - Formación de radicales, es decir, fragmentos de moléculas.
 - La polimerización produce largas cadenas de moléculas.
 - Se pueden adherir polímeros a los electrodos.
 - Modificación del campo lo que lleva a la reducción de la amplificación de gas
 - Las chispas y los depósitos de carga grandes pueden eventualmente dañar el detector
- Es muy importante evitar contaminación cuando se construye el detector y en los gases





Micro-strips gas chambers (MSGGC)

- Se reemplaza los cables con electrodos en una placa de circuito impreso
- Las técnicas de fotolitografía permiten un paso de $100\ \mu\text{m}$ (o incluso mejores!)
 - Mayor granularidad que en cámaras multihilos
 - Capacidad de alta velocidad $> 10^6\ \text{Hz} / \text{mm}^2$
 - Excelente resolución espacial ($\sim 30\ \mu\text{m}$)
 - Resolución de tiempo en el rango de ns.
- MSGGC comenzaron a desarrollarse en los 1990s
 - Uno de los grandes problemas eran las descargas que podían inutilizar los detectores!

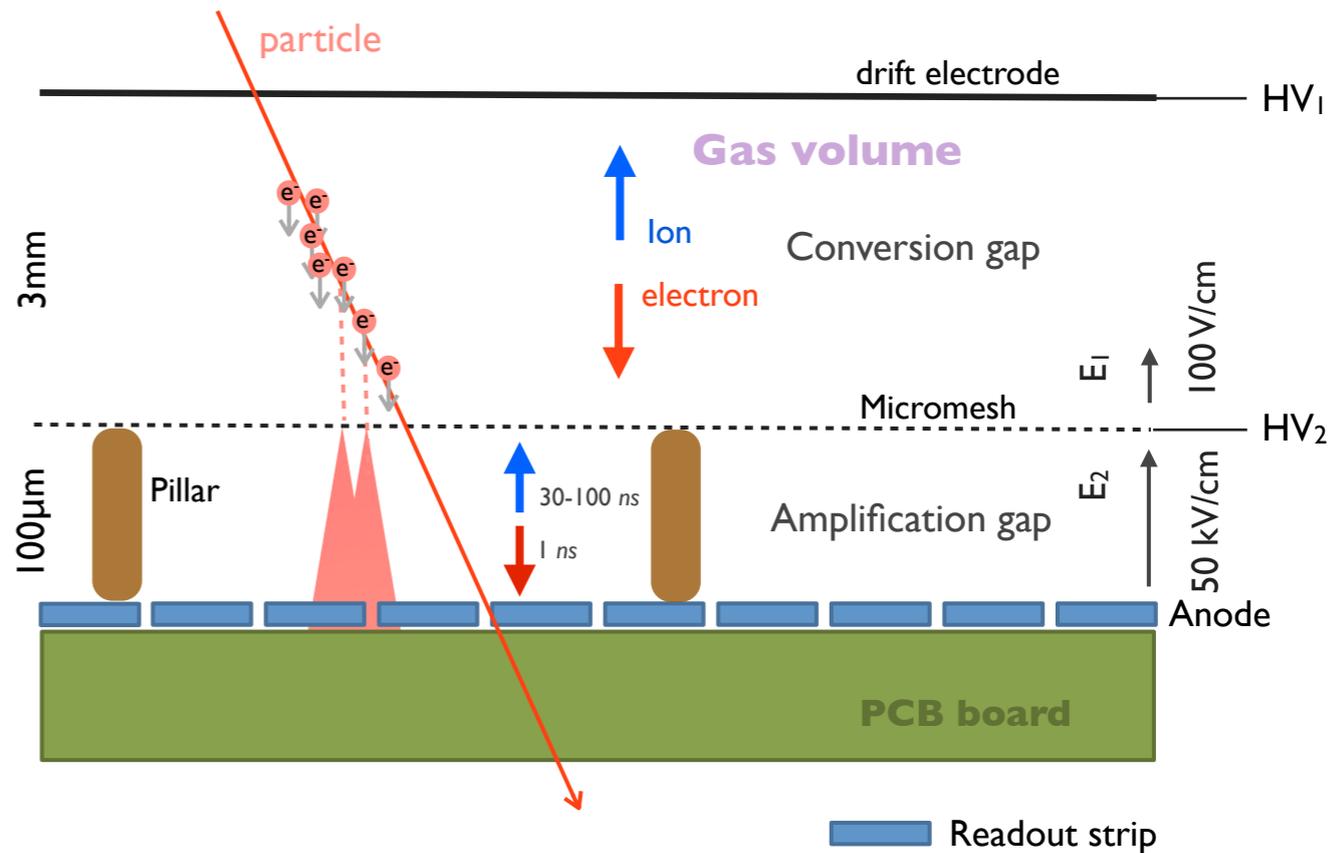




Micromegas y GEMs

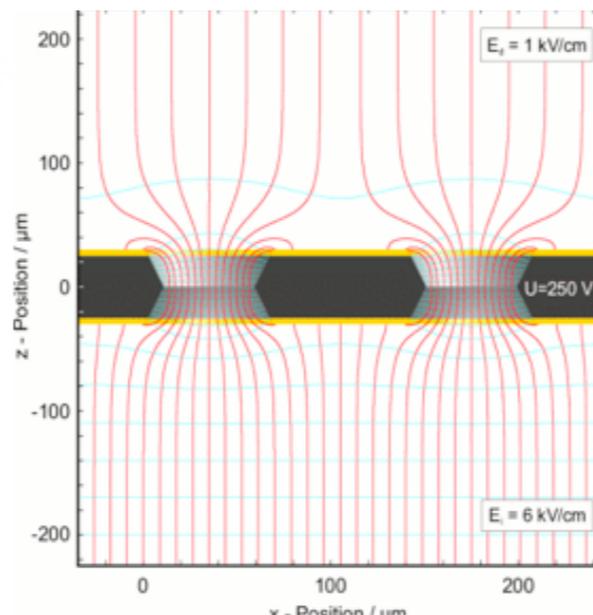
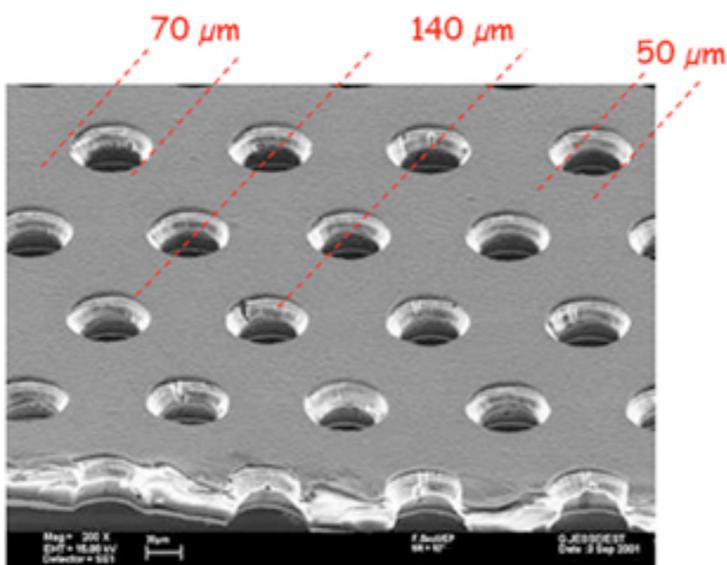
Micromegas:

1. Ionización de gas en la brecha de conversión
 2. Los electrones se mueven a través del micromalla (Micromesh)
 3. Proceso de avalancha en la brecha de amplificación
 4. Los electrones generados se recogen en el plano del ánodo.
 5. Los iones se recogen en el micromalla
- Se necesita un factor de amplificación del orden de 10^4 para muones en su mínimo de ionización.
 - Señal rápida de 100 ns



GEM (Gas Electron Multipliers)

1. Los electrones de ionización son guiados por un campo de alta deriva de GEM que genera avalancha.
2. La intensidad del campo eléctrico es del orden de unos 10 kV / cm
3. Aumento de avalancha de 100 - 1000





¿Cómo escoger el detector (gaseoso) más apropiado?

- ¿Qué tipo de partícula (s) a detectar?
 - m.i.p. (pequeño dE / dx)
 - núcleo lento (dE / dx grande).

- ¿Qué parámetros son críticos / importantes?
 - eficiencia
 - rapidez de respuesta (para la activación de la toma de datos) => ¡importante implicación en la electrónica!
 - Detectores 1D o 2D
 - longitud total de radiación (incluidos servicios, mecánica, etc.)
 - geometría del detector (trapezoidal, rectangular o incluso cilíndrico!)
 - células individuales o tipo "MWPC"?

- Las condiciones de trabajo:
 - ganancia requerida
 - estabilidad de la ganancia? (medición precisa dE / dx)
 - "plateau" de parámetros (HV, fracción de gas, etc.)
 - ¿Ruido de fondo? (elección de material de construcción y gas)
 - campo magnético y / o eléctrico? (Efecto Lorentz)

- Costo:
 - aspectos de producción (¿sala blanca? ¿Construcción industrial?)
 - número de canales necesarios?

- Seguridad:
 - Se pueden usar gases inflamable o no



Hemos visto :

- Formación y detección de la señal.
- El transporte de electrones e iones en el gas (La velocidad de los electrones ~ 100 a $\sim 1000\times$ la velocidad de los iones).
- La avalancha y la multiplicación de la señal
- Las condiciones de trabajo de una cámara de ionización van desde el modo proporcional, luego el modo streamer, luego el modo Geiger-Muller (al aumentar el HV)
- Algunos ejemplos del funcionamiento de los detectores gaseosos (MWPC, cámaras de deriva, TPC y MicroMegs)
- No existe un único detector (gaseoso) universal. Es necesario probar el detector, también simularlo, en condiciones reales para entender/optimizar las condiciones de trabajo.

 <http://laconga.redclara.net>

 contacto@laconga.redclara.net



lacongaphysics



Latin American alliance for
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido, el cual refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.



Referencias

- Summer Student Lecture Programme Course. Prof. D. Bortoletto (University of Oxford (GB)) <https://indico.cern.ch/category/345/>
- D.H. Wilkinson: Ionization Chambers and Counters (Cambridge Univ. Press, 1950)
- S.A. Korff: Electron and Nuclear Counters (Van Nostrand, 1955)
- P. Rice-Evans: Spark, Streamer, Proportional and Drift Chambers (Richelieu, 1974)
- F. Sauli: Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers (CERN 77-09, 1977)
- Th. Ferbel, Editor: Techniques and Concepts of High-energy Physics (Plenum, 1983)
- R.C. Fernow: Introduction to Experimental Particle Physics (Cambridge Univ. Press, 1986)
- W.R. Leo: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments (Springer, 1987)
- G.F. Knoll: Radiation Detection and Measurements, 3d Ed. (Wiley, 2000)
- W. Blum, W. Riegler and L. Rolandi: Particle Detection with Drift Chambers, 2d Ed. (Springer 2008)