Detectores gaseosos y Tracking

Joany Manjarrés (L2IT)

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

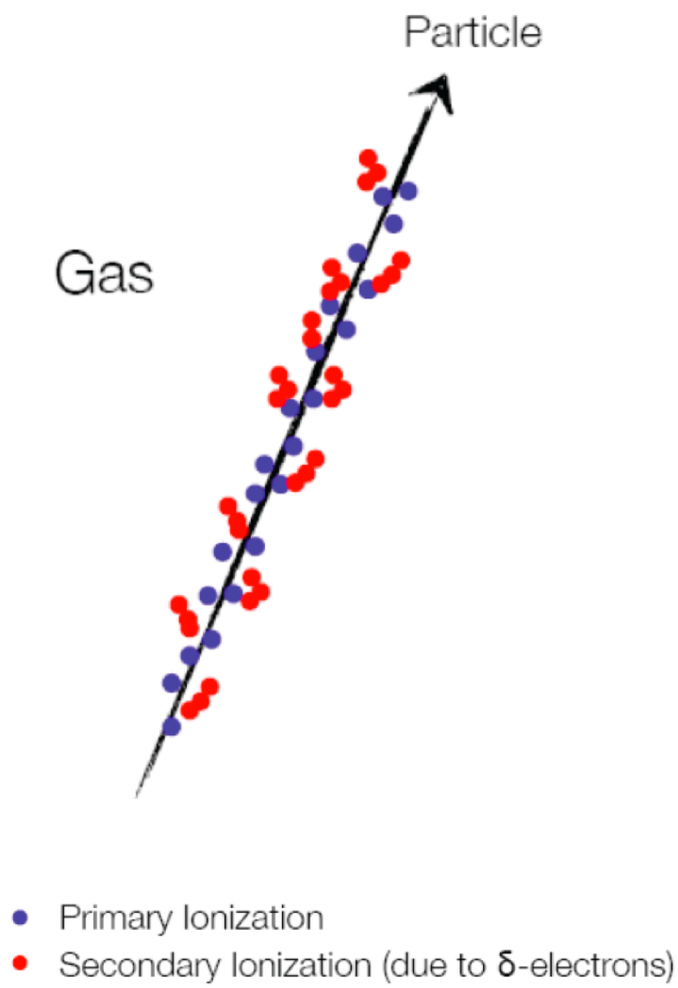
Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

Detectores gaseosos

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

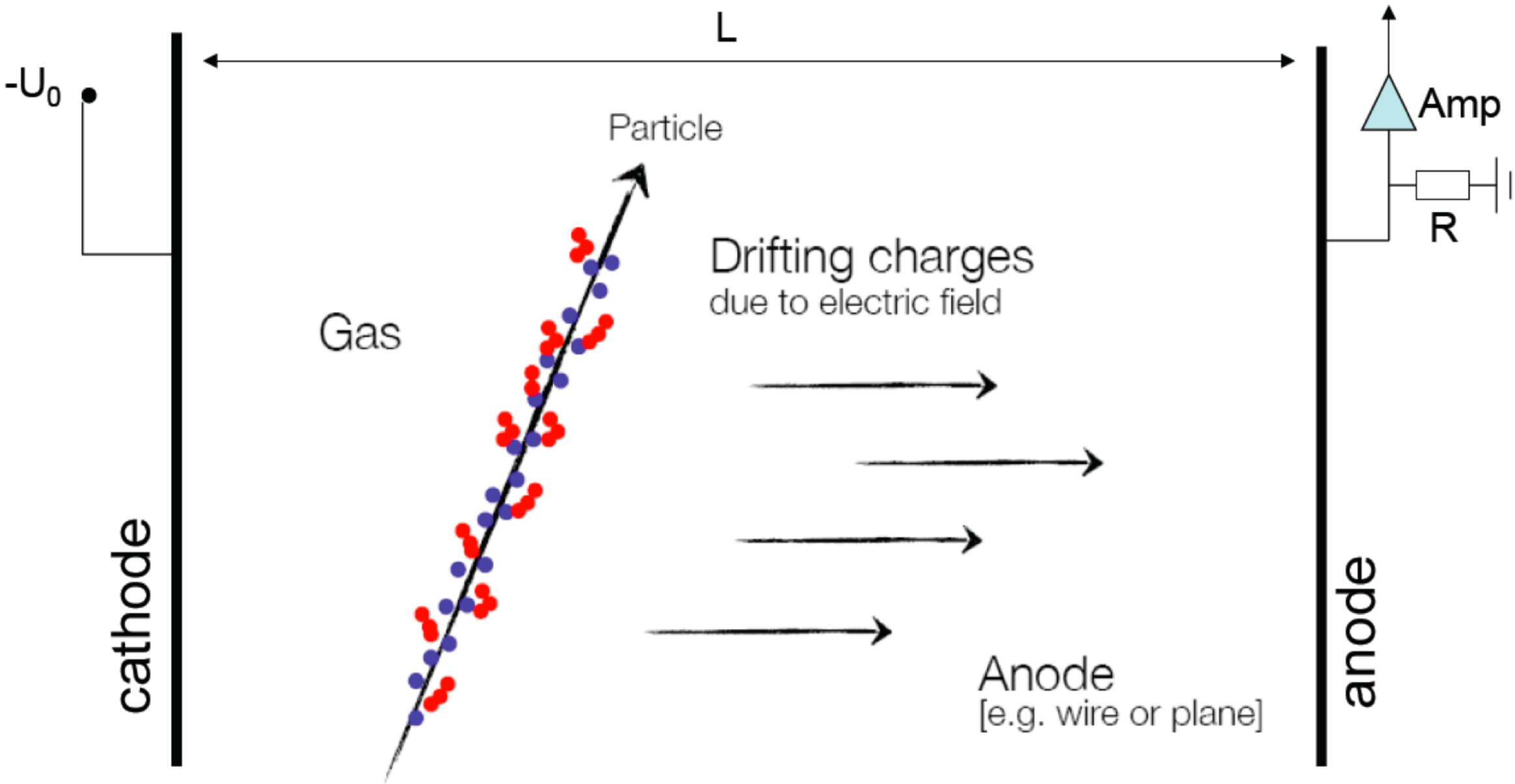
Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

La creación de la señal



- Las partículas cargadas al atravesar la materia dejan átomos excitados, creado 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.

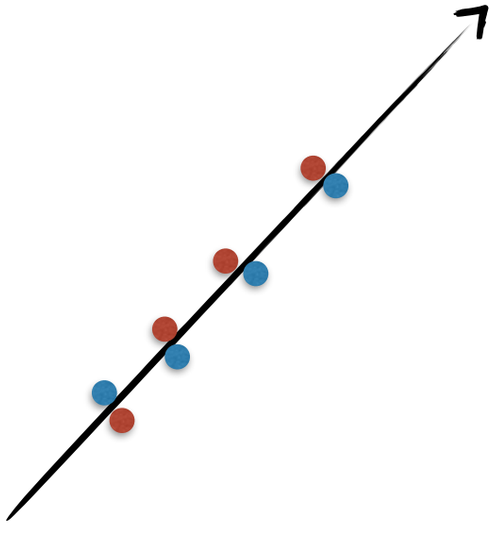
Vista esquemática de un detector



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

Ionización primaria y secundaria

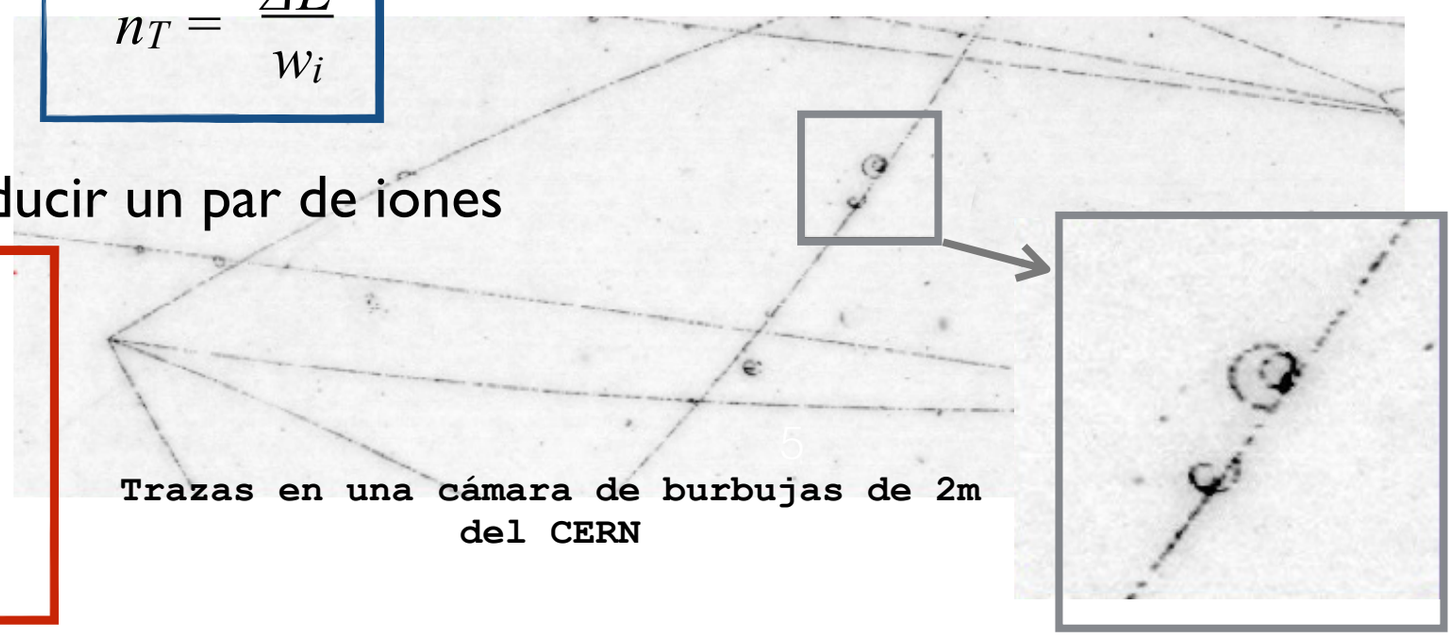
- Las interacciones de Coulomb entre el campo E de la partícula y las moléculas del medio producen pares de iones-electrones.



- Partículas en su mínimo de ionización (MIP) moviéndose en Argón (temperatura y presión normales)
  - $\langle n_P \rangle = 29\ cm^{-1}$ → 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 :

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

  - ΔE : pérdida de energía
  - w_i : energía promedio para producir un par de iones
- Para una MIP en Argón :
  - ΔE = 2.4 keV/cm y w_i = 26 eV
  - n_T ~ 90 pares de iones/cm



Trazas en una cámara de burbujas de 2m del CERN

MIP: es una partícula cuya tasa media de pérdida de energía a través de la materia se aproxima al mínimo. An important property of all minimum ionizing particles is that $\beta\gamma \simeq 3$ is approximately true where and are the usual relativistic kinematic quantities.

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_4H_{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

- Eficiencia

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

- 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

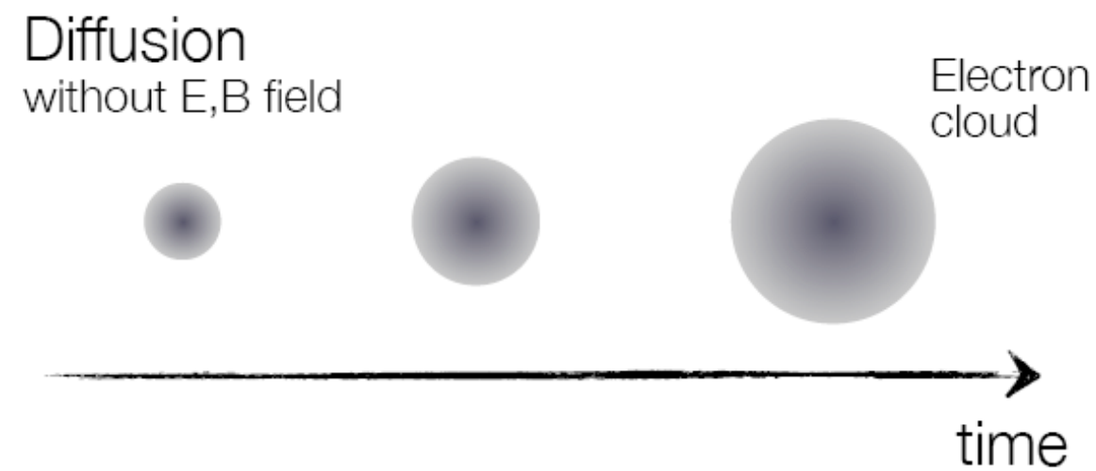
- Otros parámetros importantes son:
  - Recombinación y unión de electrones debido a gases electro-negativos que unen electrones; Ej: O_2, Freon, Cl_2, SF_6 ... → influencia la eficiencia del detector
  - Difusión → Influye en la resolución espacial
  - Movilidad de cargas → Influye en el comportamiento 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

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



- Los pares e-/ion se distribuyen tienen una distribución gaussiana σ (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

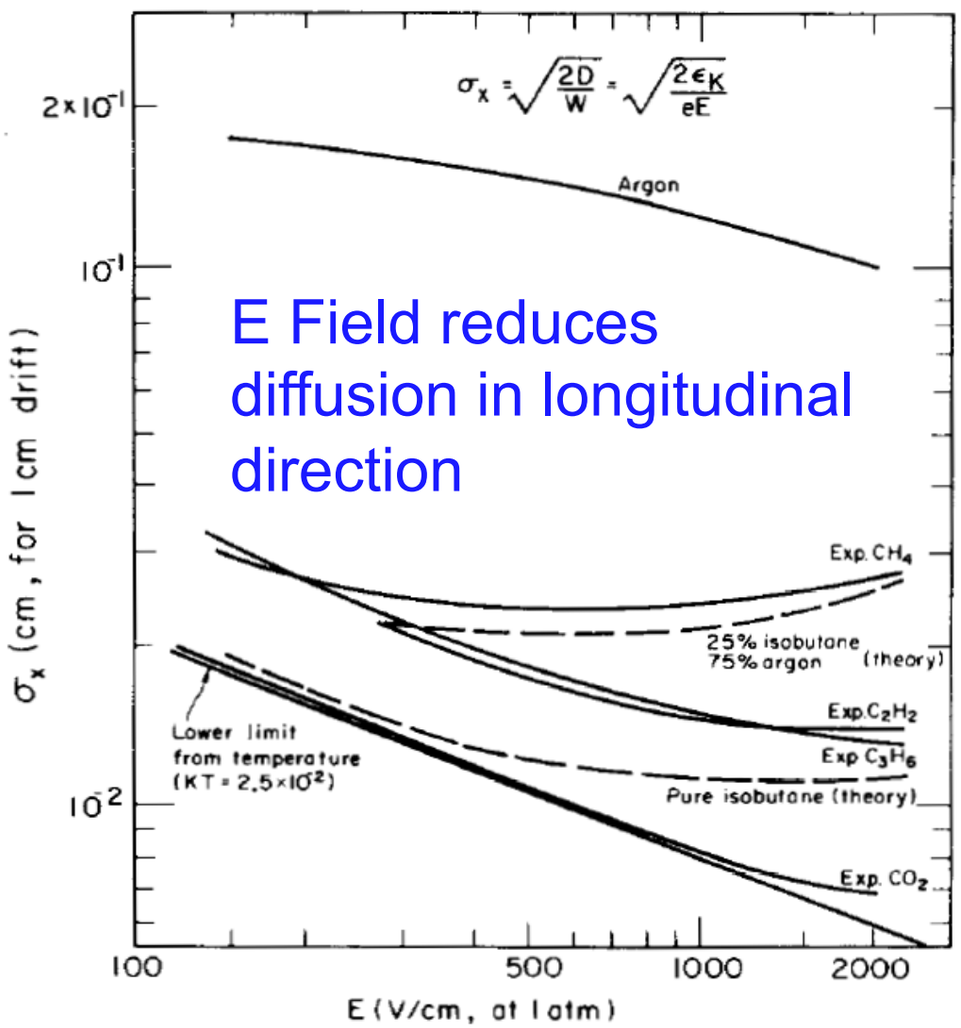
m : la masa de la partícula

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

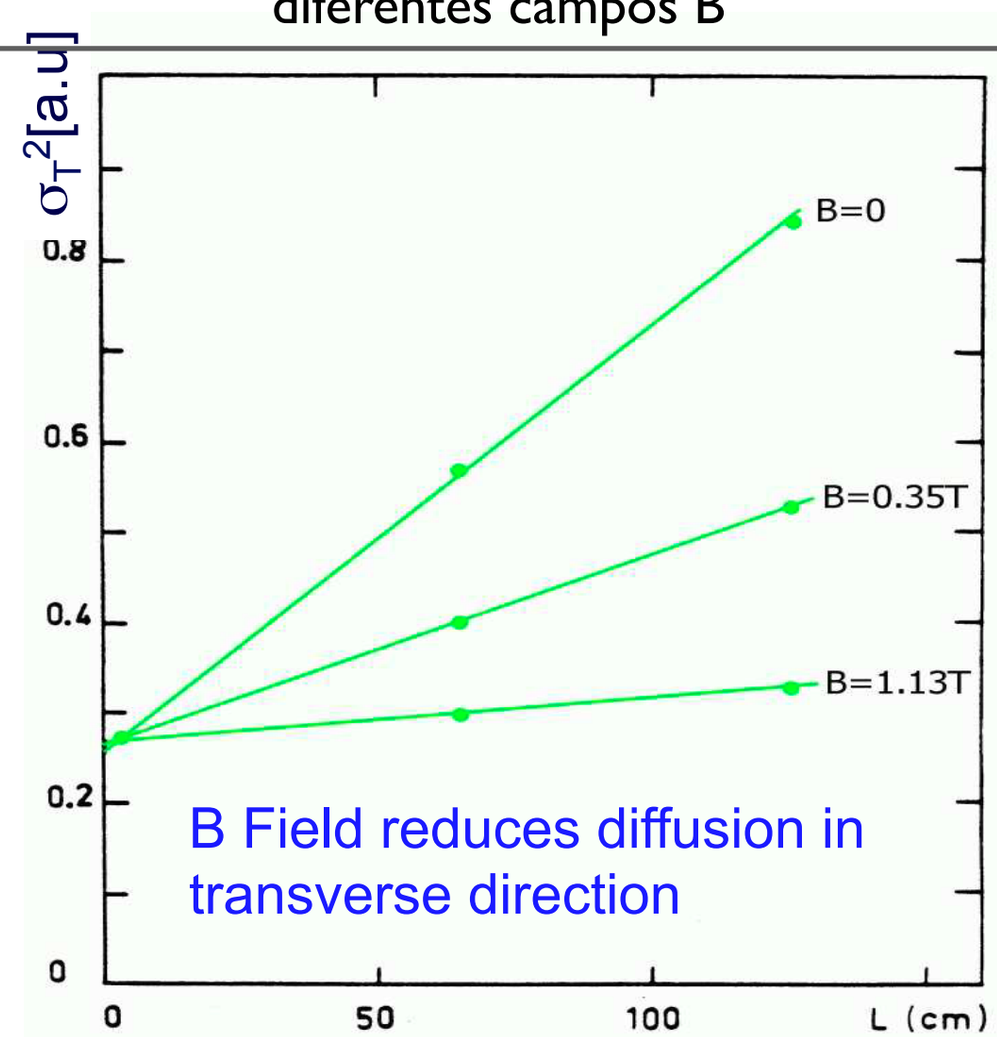
Deriva y difusión en campos E y B

- Si ponemos nuestro detector dentro de un campo eléctrico, la deriva de las partículas cargadas será mucho mas rápida, 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

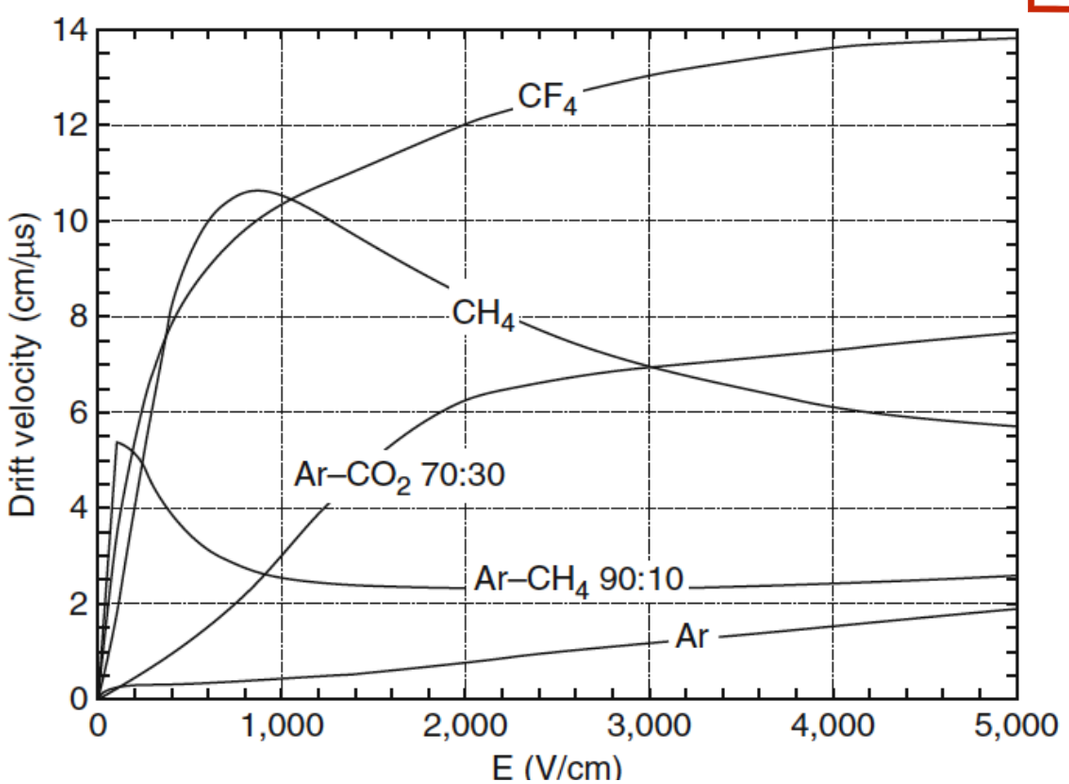
- En un campo E externo, los pares e-/ion adquieren una velocidad de deriva v_D, además del movimiento térmico; en promedio, los pares e-/ion se mueven a lo largo de las líneas de campo del campo eléctrico

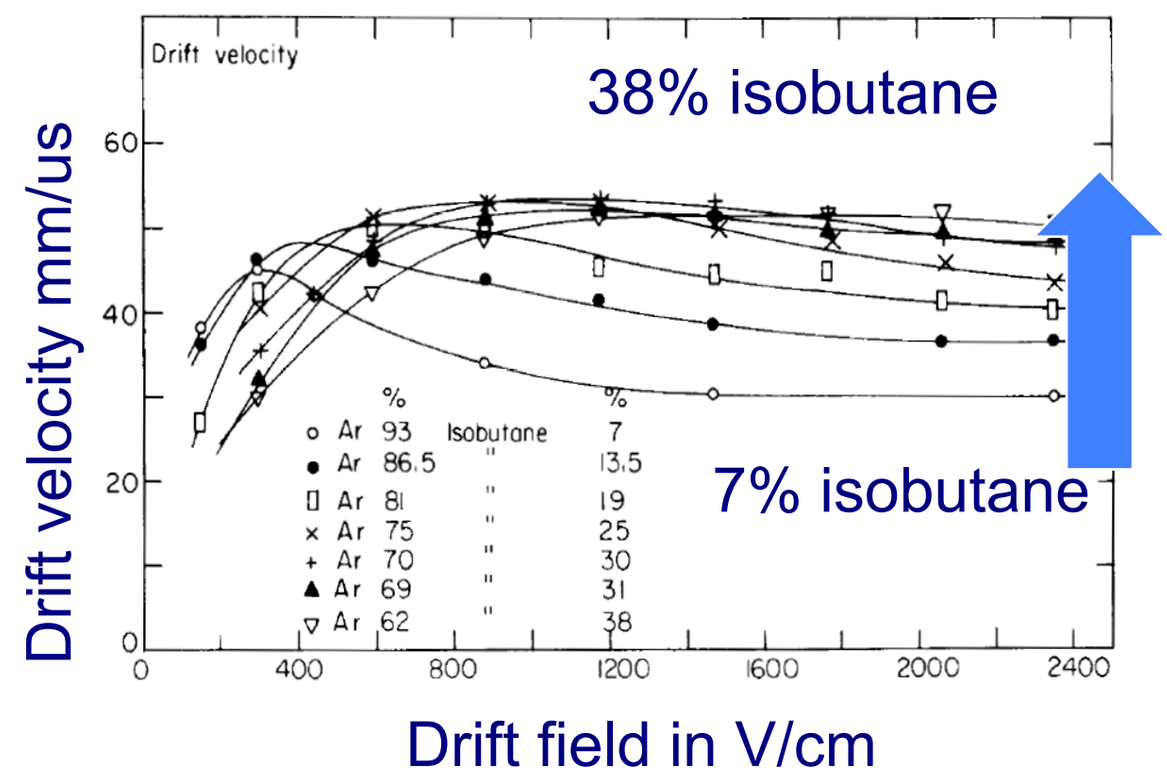
$$\vec{v}_D = \mu_{\pm} \left| \vec{E} \right|$$

- μ *mobility*
- *E Campo eléctrico*

- valores típicos de $\mathbf{v}_D$
  - E~1kV/cm
  - $v_d \approx$cm/ms for ions
  - $v_d \approx$cm/µs for e-

Los electrones se mueven mucho más rápido que los iones!





- Mezclas de CF_4- pueden alcanzar v_D ~ 10 cm^4 μs^{-1}

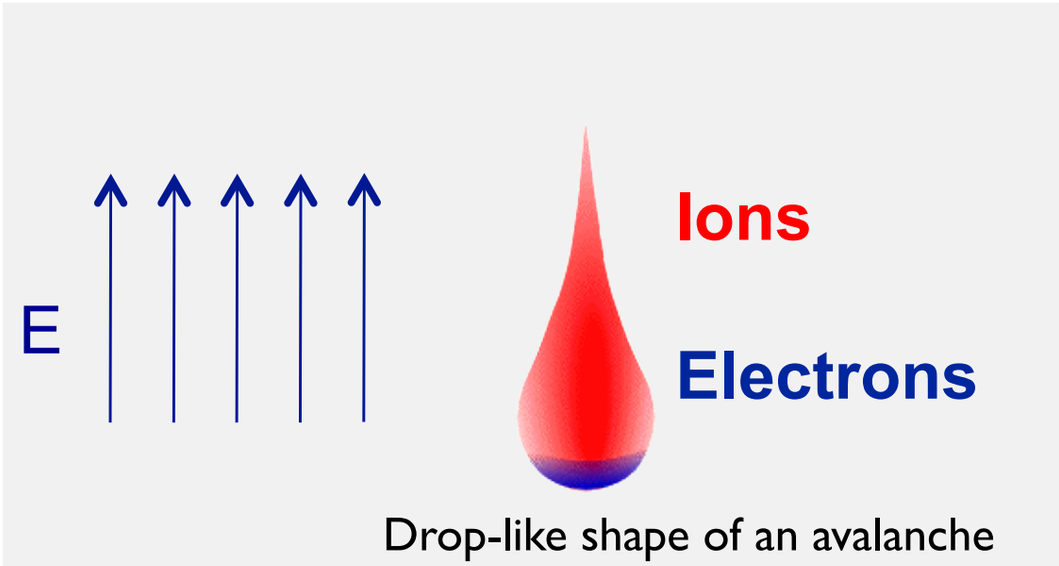
- Dado que el tiempo de recolección es inversamente proporcional a la velocidad de deriva, los efectos de difusión se reducen en gases como el CF_4 que tienen una alta deriva.

Multiplicación en la avalancha

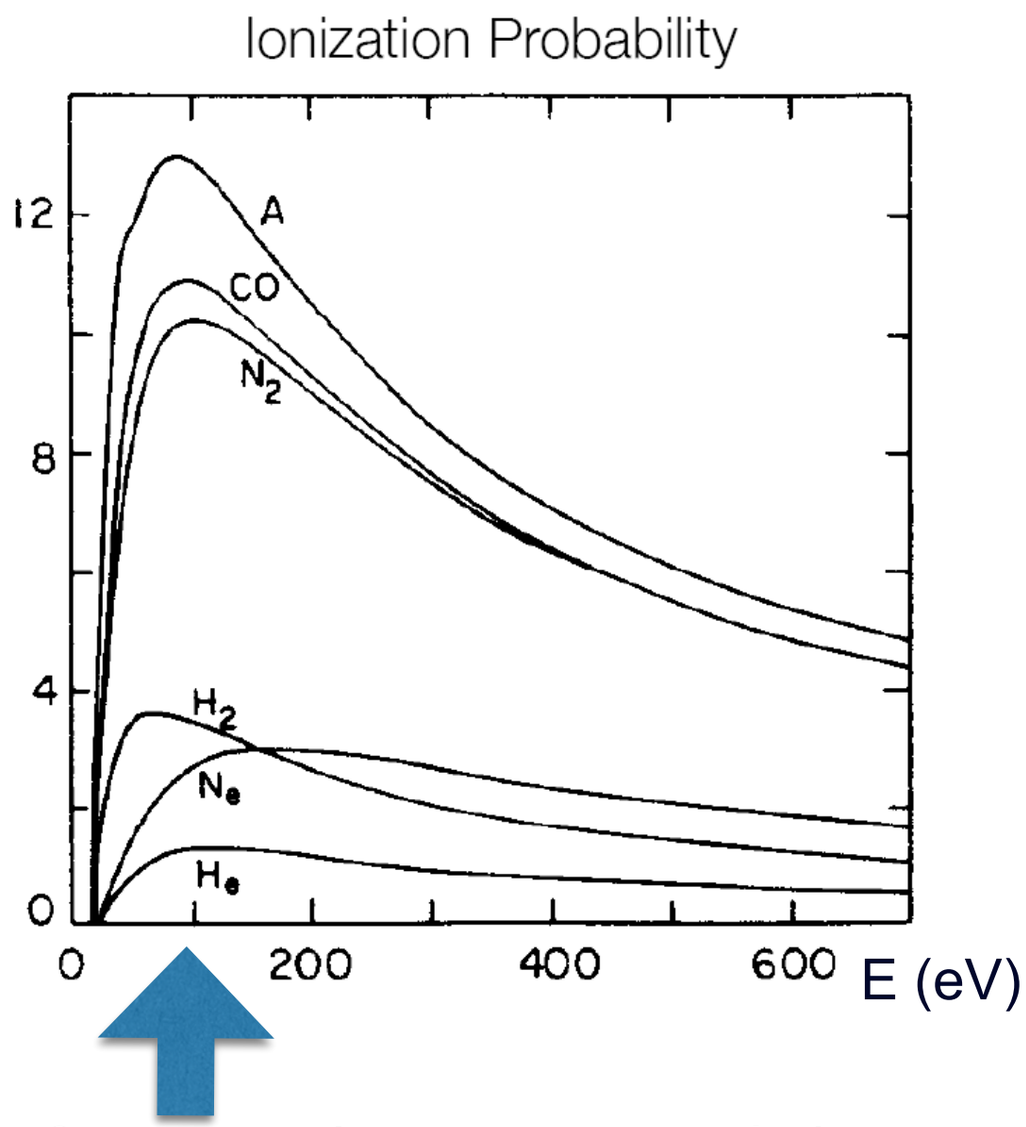
- La señal de ionización primaria es muy pequeña en una capa de gas: en 1 cm de Ar / CO_2 (70:30) a temperatura y presión normales, solo se crean ~100 pares e-/ion → necesario utilizar un mecanismo de "amplificación en el gas" para aumentar la señal
- Campos E grandes → electrones con energía cinética 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:

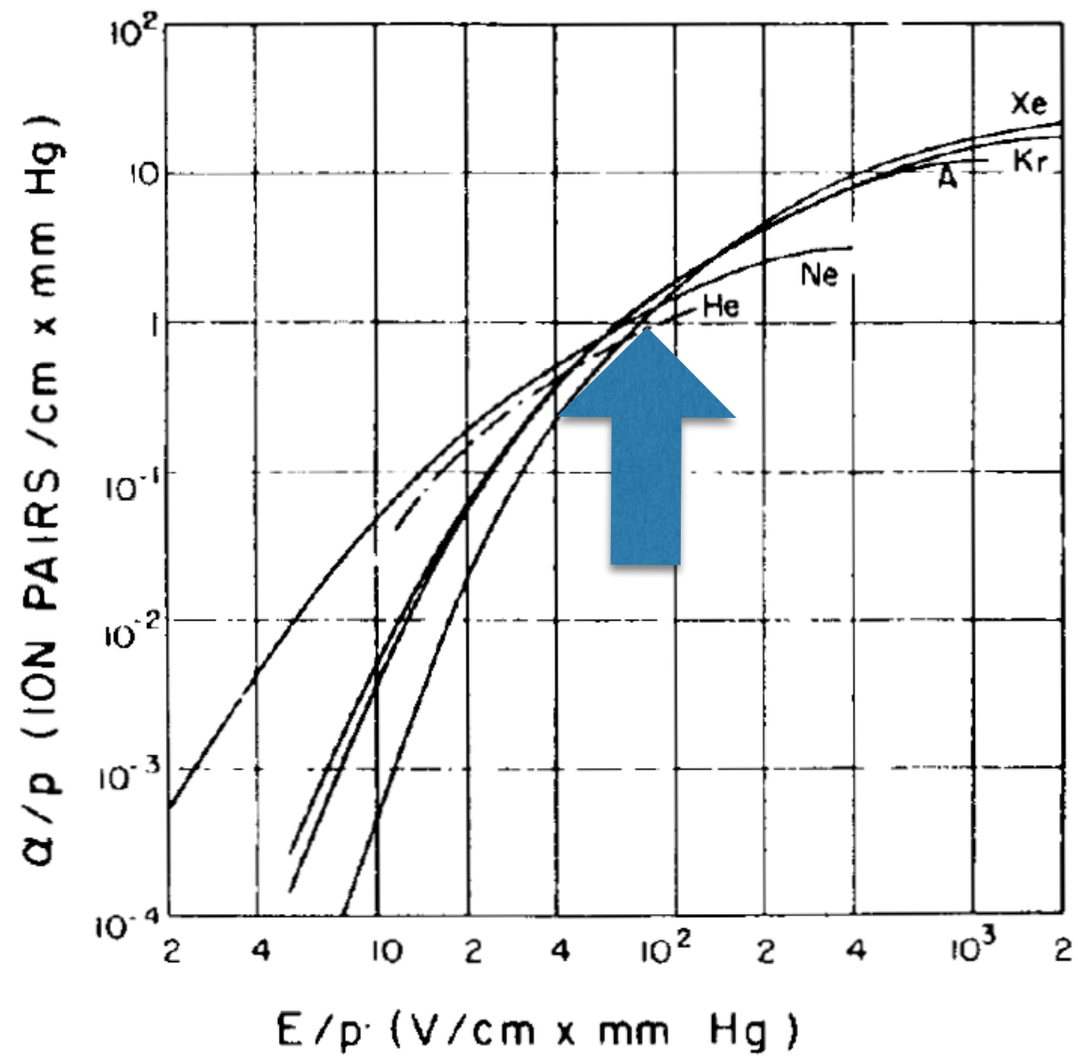
$$G = \frac{n}{n_0} = e^{\alpha x}$$

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



Multiplicación en la avalancha



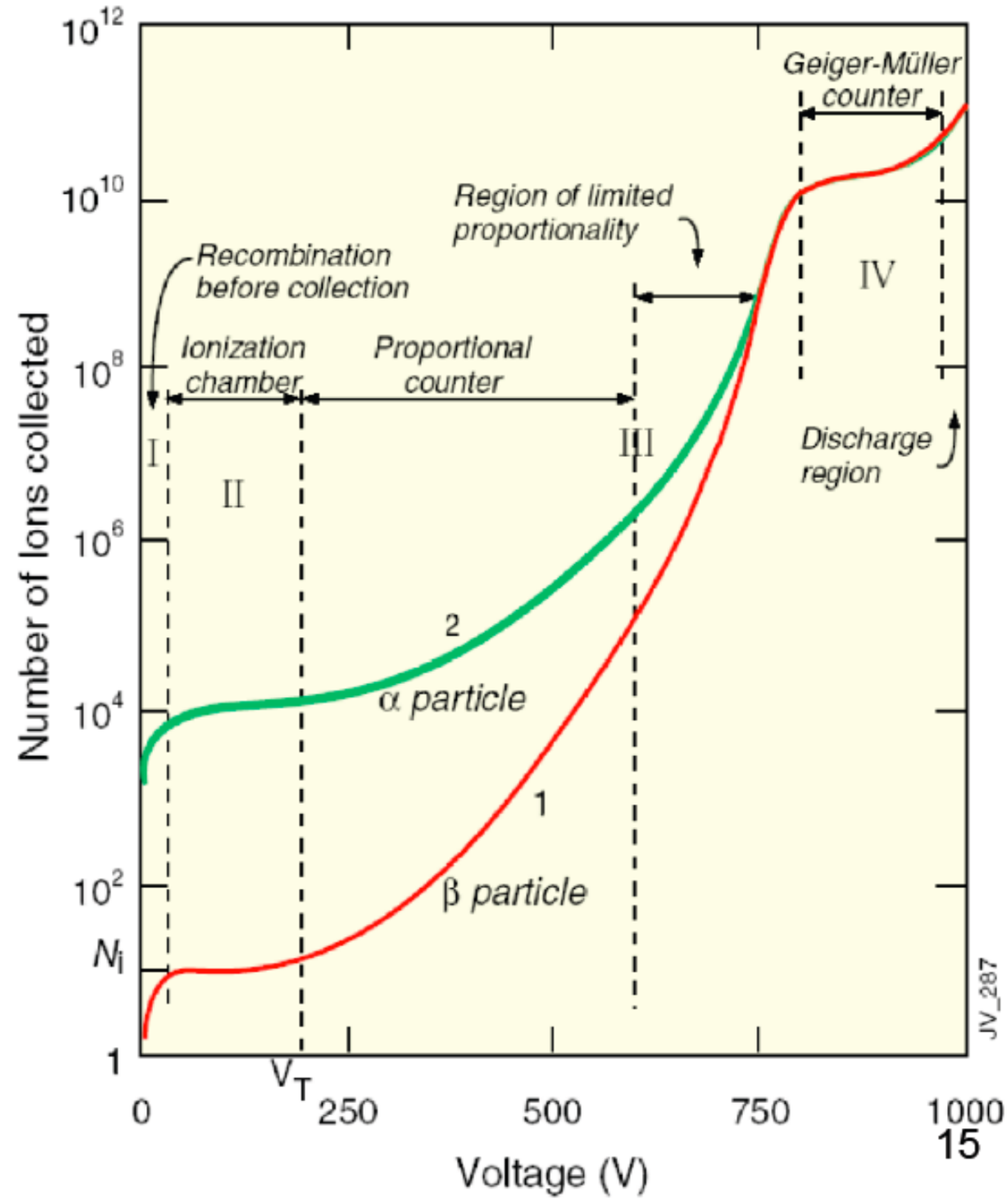


- Se necesita al menos una energía de 75-100 eV para tener una alta probabilidad de ionización (y necesita ganarla en unos pocos μm)

- E=75 kV/cm to reach α=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 ⇒ medición de dE / dx. Las avalanchas secundarias deben apagarse; G ≈10^4-10^5
- **Proporcional limitado (saturado, modo Streamer):** fuerte fotoemisión; Requiere quenchers fuertes. Alta ganancia 10^{10} ⇒ señal grande, electrónica simple
- **Modo Geiger:** emisión masiva de fotones. Todo el ánodo se ve afectado. Descarga detenida por corte HV



Principios de funcionamiento

- ¿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.)

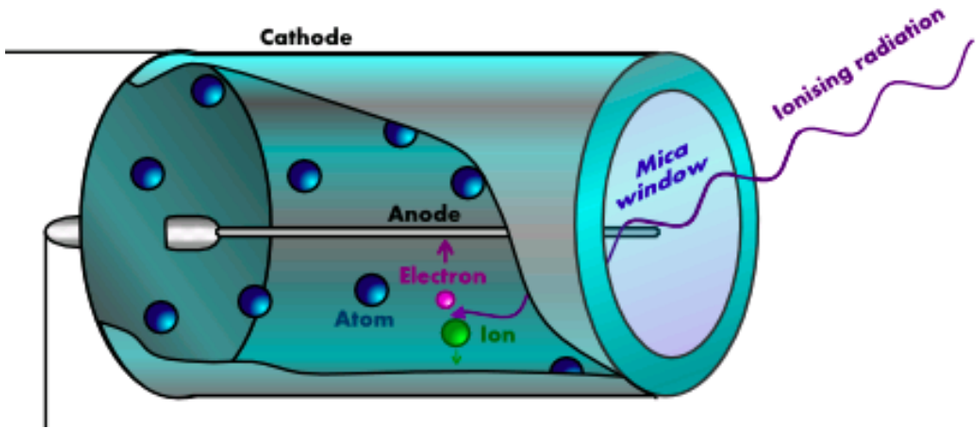
Algunos detectores gaseosos

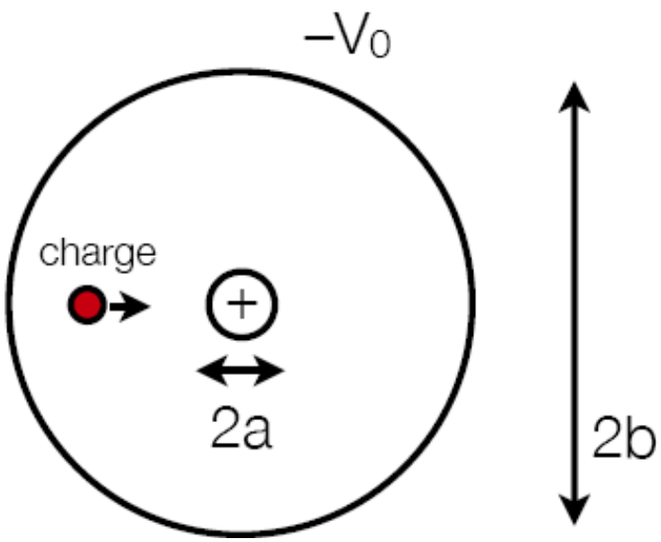
Latin American alliance for
Capacity buildiNG in Advanced physics
LA-CoNGA physics

Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

Contador proporcional

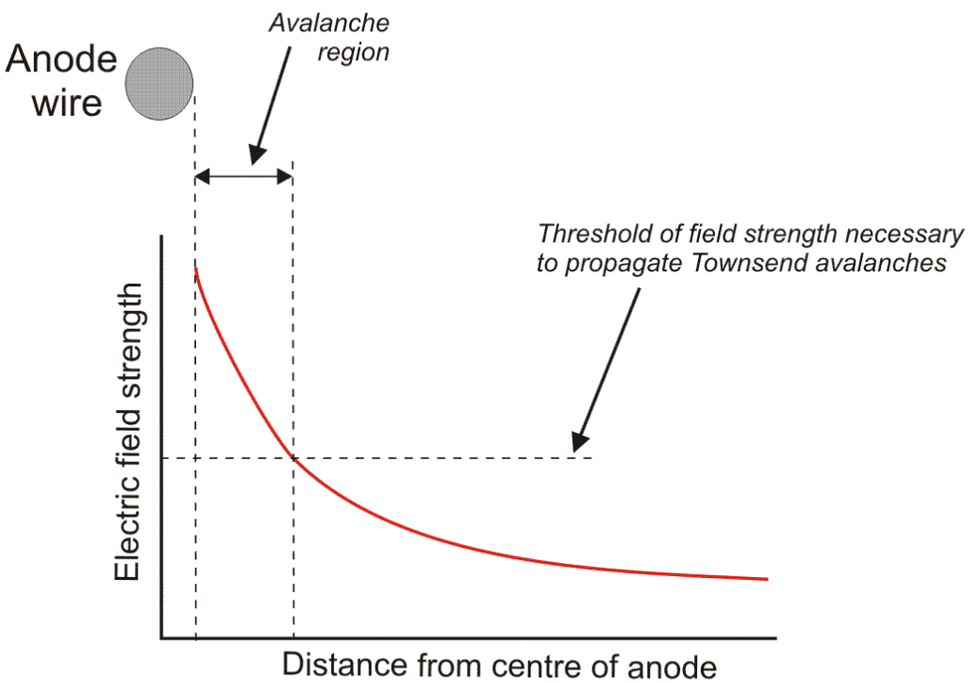
- Contador proporcional cilíndrico:
  - Alambre de ánodo único en un cátodo cilíndrico
  - E ~ 1/r: campo débil lejos del cable
  - los electrones / iones se derivan en el volumen
  - La multiplicación ocurre solo cerca del ánodo





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

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

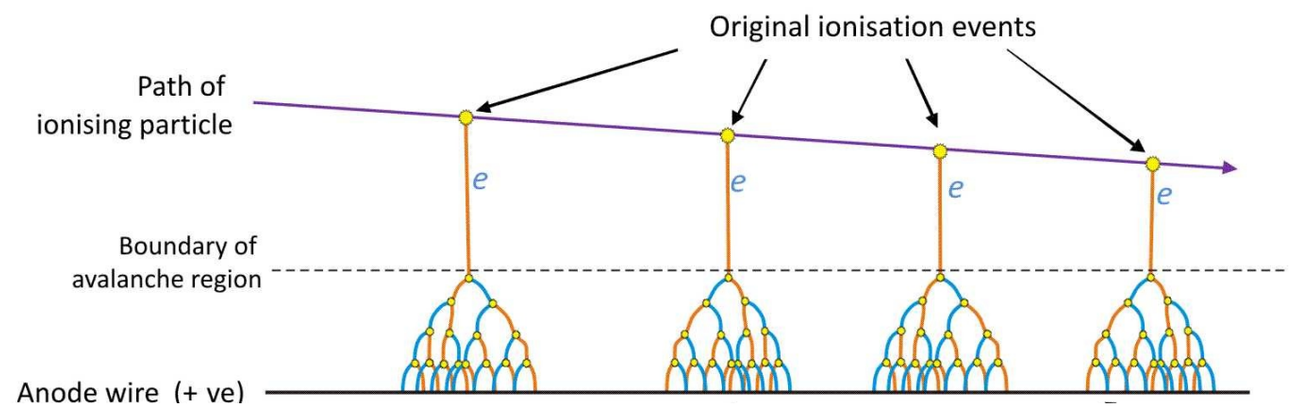


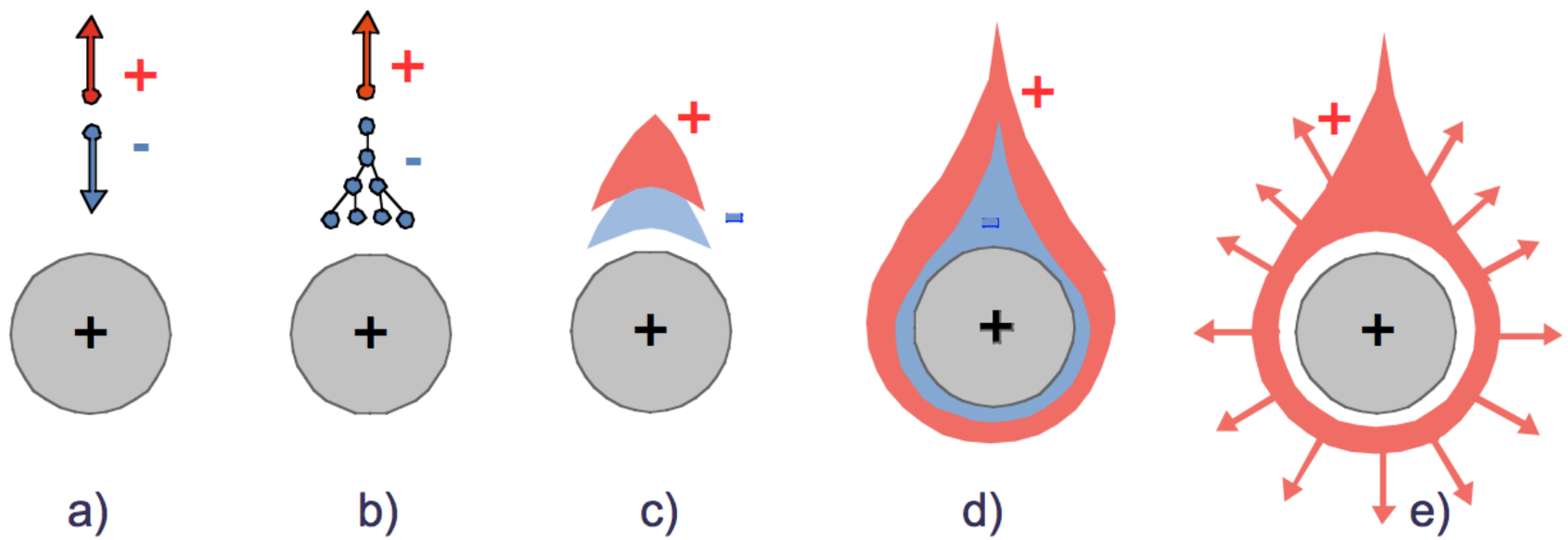
- La energía cinética de los electrones se vuelve muy grande cerca del cable y puede producir ionización secundaria.

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

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.

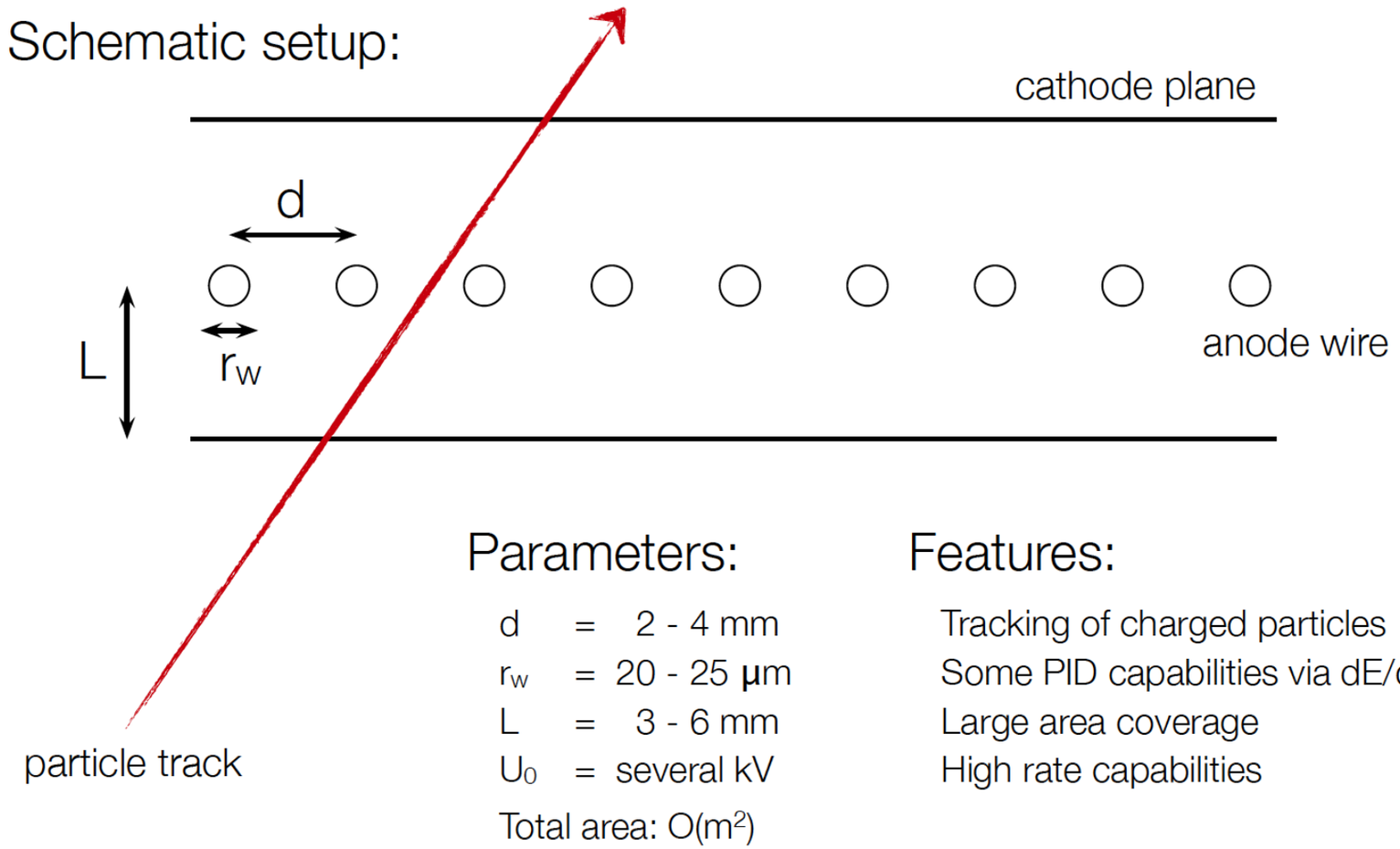
c) los electrones y los iones están sujetos a difusión lateral,

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

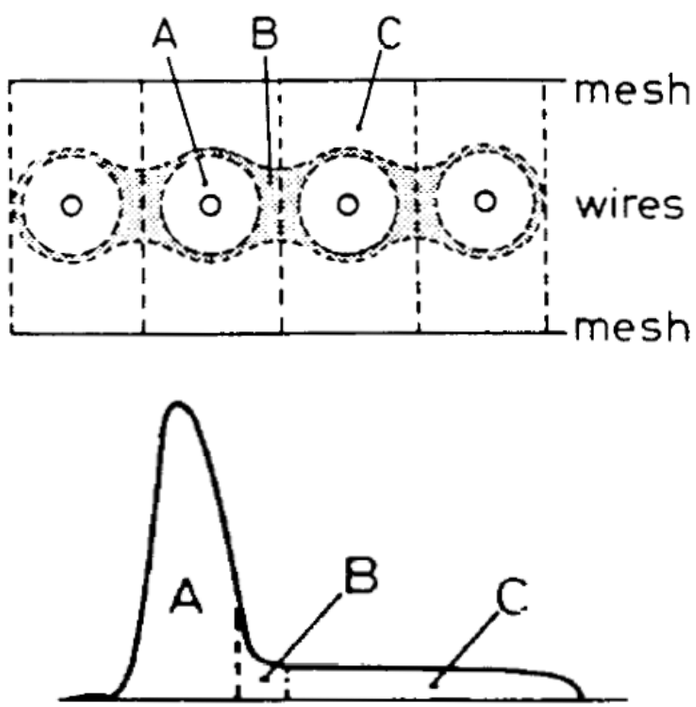
- Charpak desarrolló una cámara proporcional de múltiples cables MWPC (premio Nobel 1992)

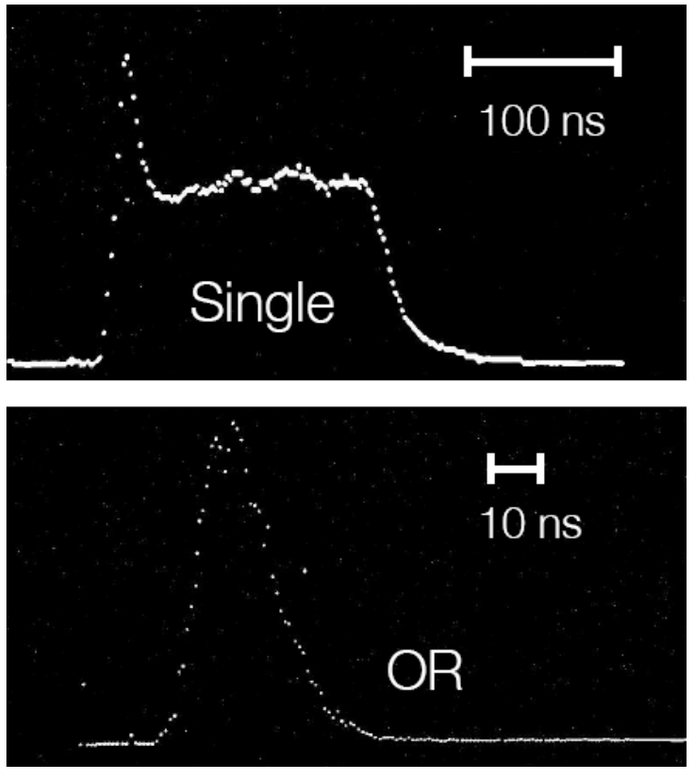


- La cámara permitió un avance enorme en tasa detección. Las cámara de burbujas usadas hasta entonces permitían detectar una o dos partículas por segundo, mientras que las cámaras multihilos permiten 1000 detecciones de partículas por segundo.
- Es una cámara proporcional que tiene la capacidad de medir 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: σ_t =~10 ns]

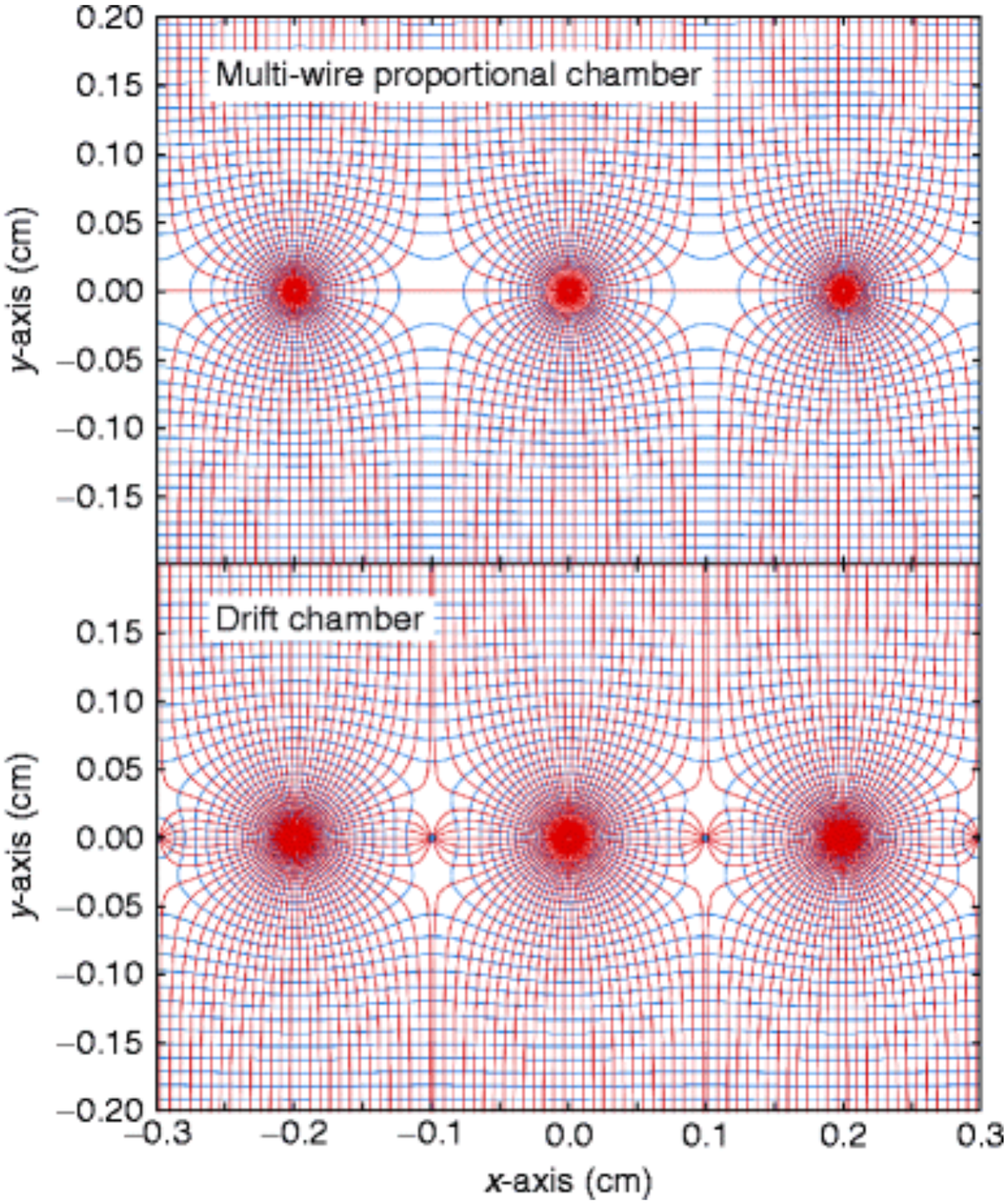




Distribución de los campos

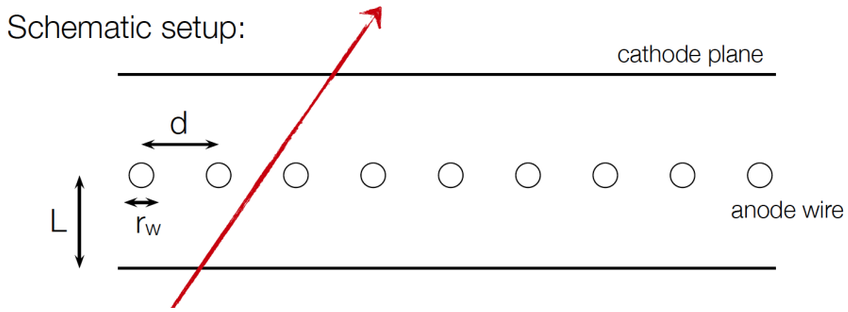
- **MWPC:**
  - La operación es difícil cuando las distancias entre cables son pequeñas.
  - La repulsión electrostática entre alambres de ánodo delgados (10 μm) causa inestabilidad mecánica por encima de una longitud crítica de alambre

- **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.
  - <u>Mejora la linearidad de la relación espacio-deriva-tiempo → resultando en una mejor resolución espacial</u>

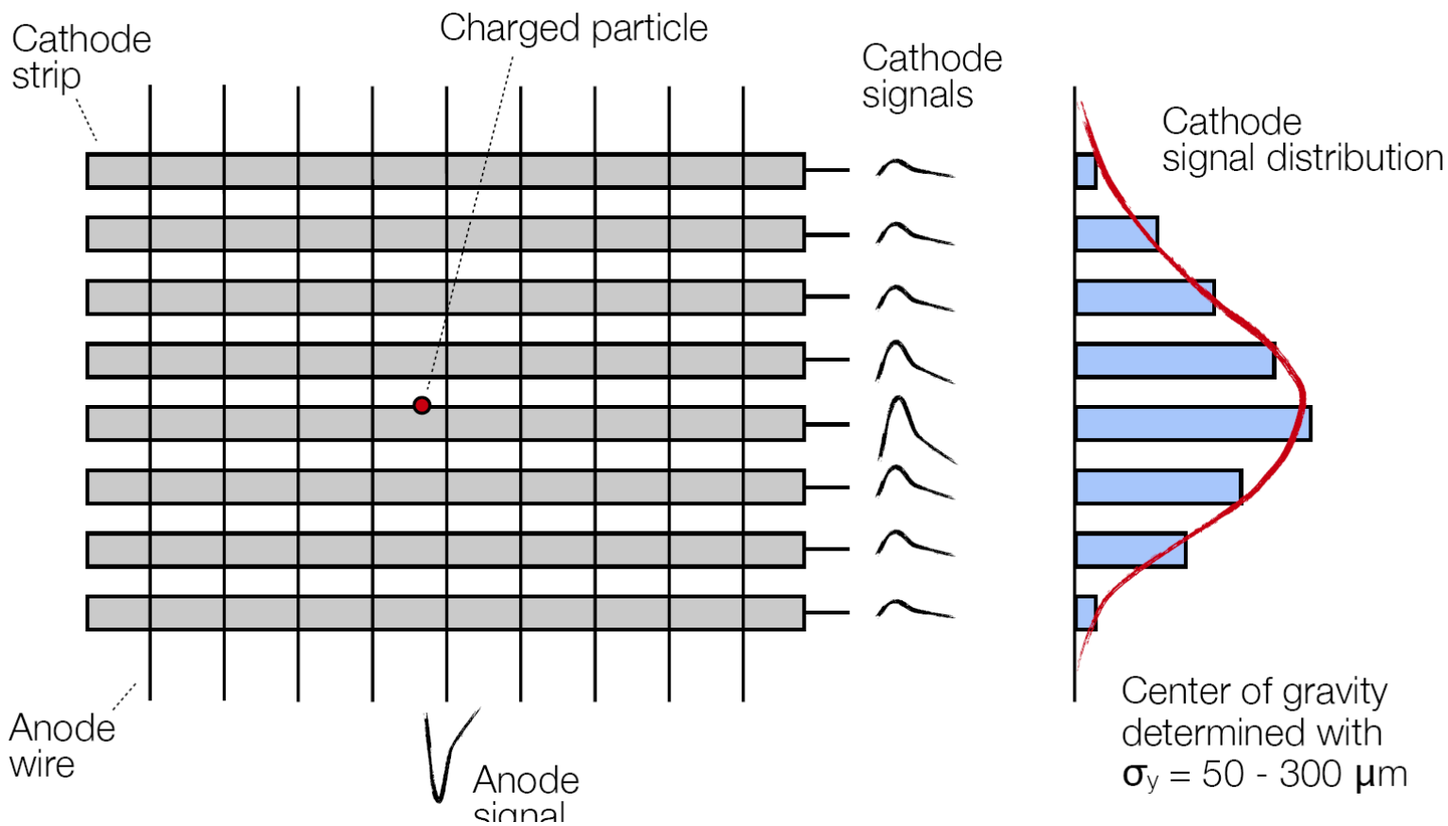


MWPC: Resolución espacial

- Para calcular la posición de la partícula podemos solo información sobre el cable más cercano ➛ $\sigma_x = d/\sqrt{12}$ [d=2-4 mm, $\boldsymbol{\sigma}_x$ ~0.6-1mm]



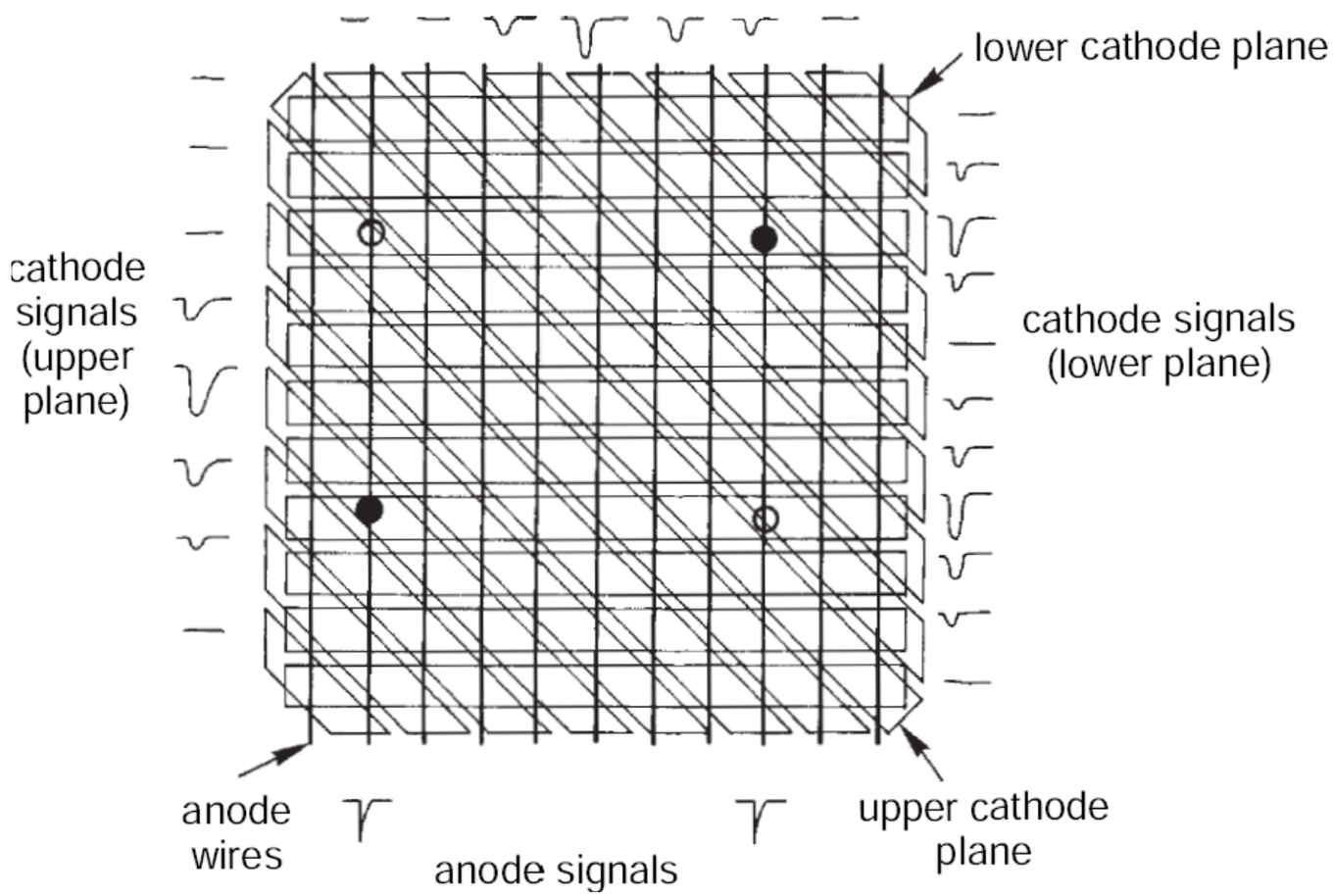
- Algunas mejores incluyen el uso de cátodos segmentados



- 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

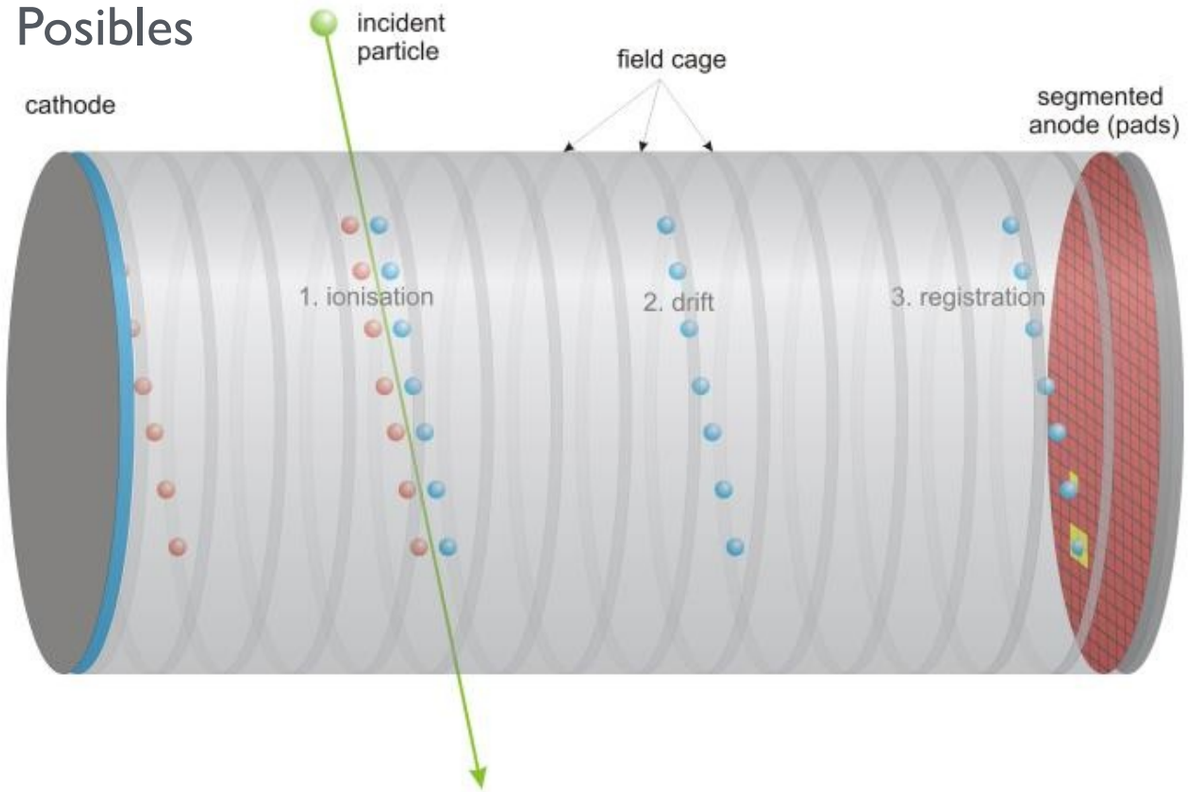
Time Projection Chambers (TPC)

- 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

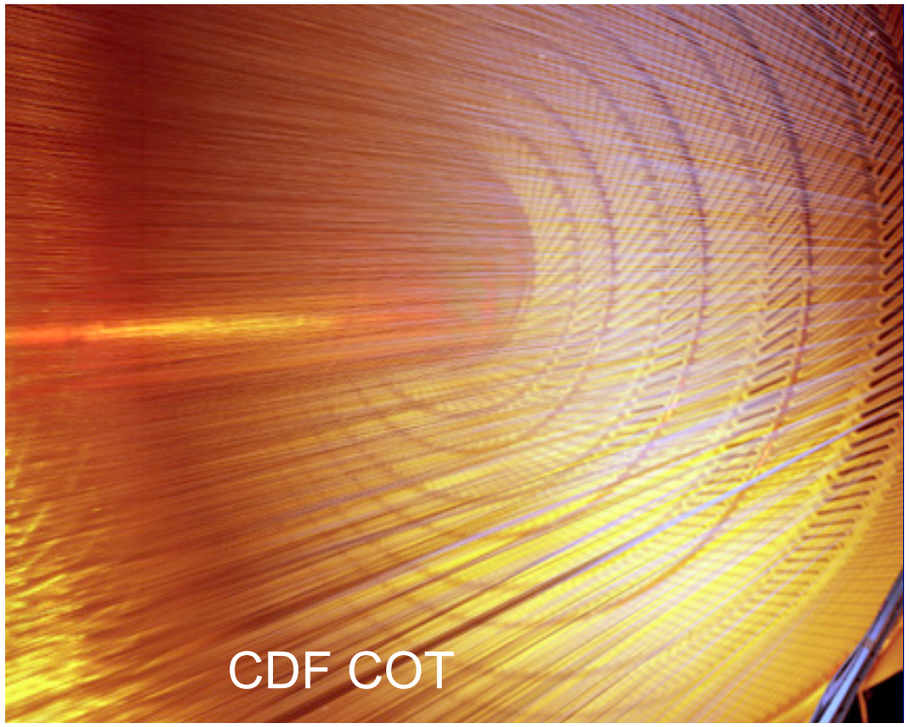
- Resolución tipica
  - z, y ≈mm, x=150-300 μm
  - dE/dx ≈5-10%

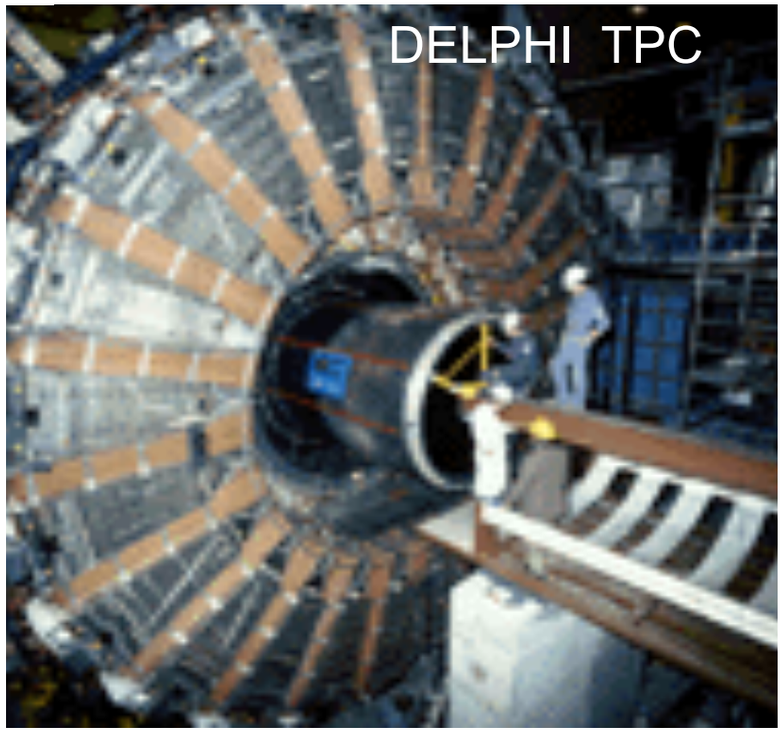
- Ventajas:
  - Reconstruction completa de la traza → Posibles medidas del momento
  - Buena identificación por dE/dx

- 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)

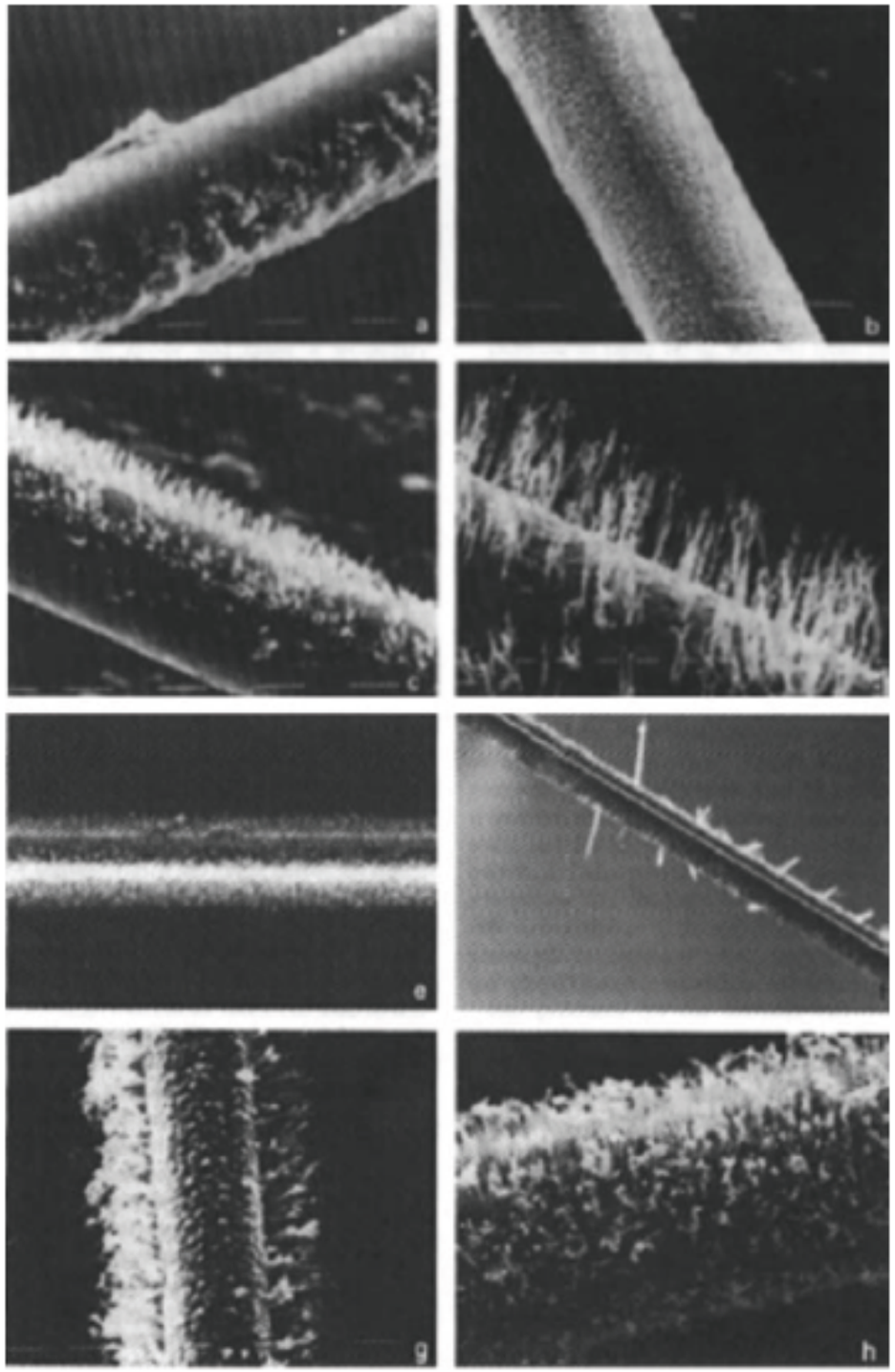




Envejecimiento de los hilos

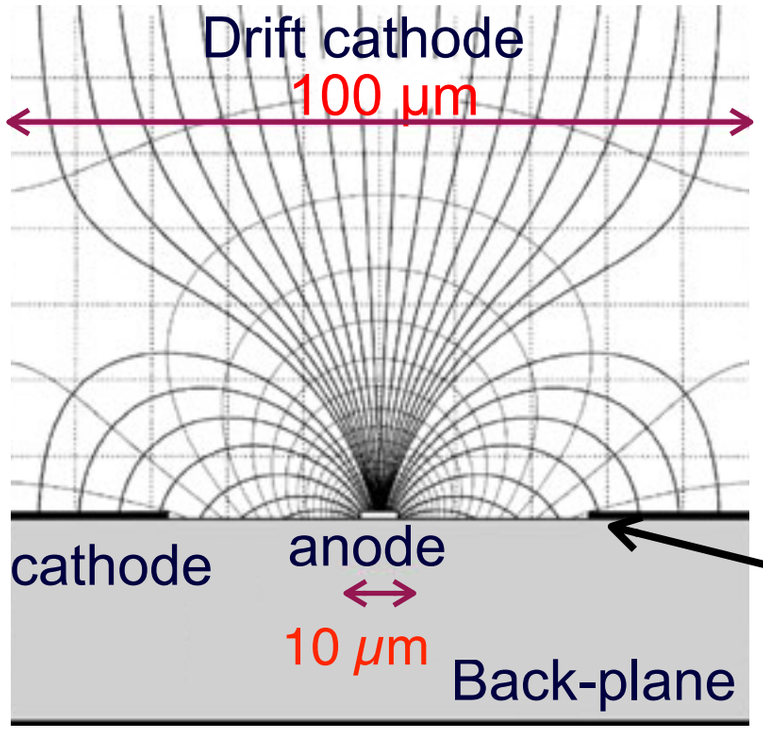
- Consecuencias de las avalanchas de multiplicación
  - Formación de radicales, es decir, fragmentos de moléculas.
  - La polimerización produce largas cadenas de moléculas.
  - Se pueden adherir polímeros a los electrodos.
  - Modificación del campo lo que lleva a la reducción de la amplificación de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

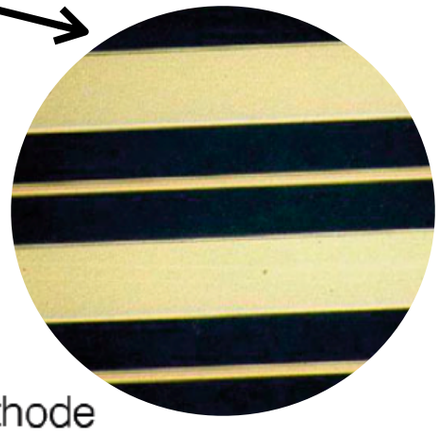
- Es muy importante evitar contaminación cuando se construye el detector y en los gases

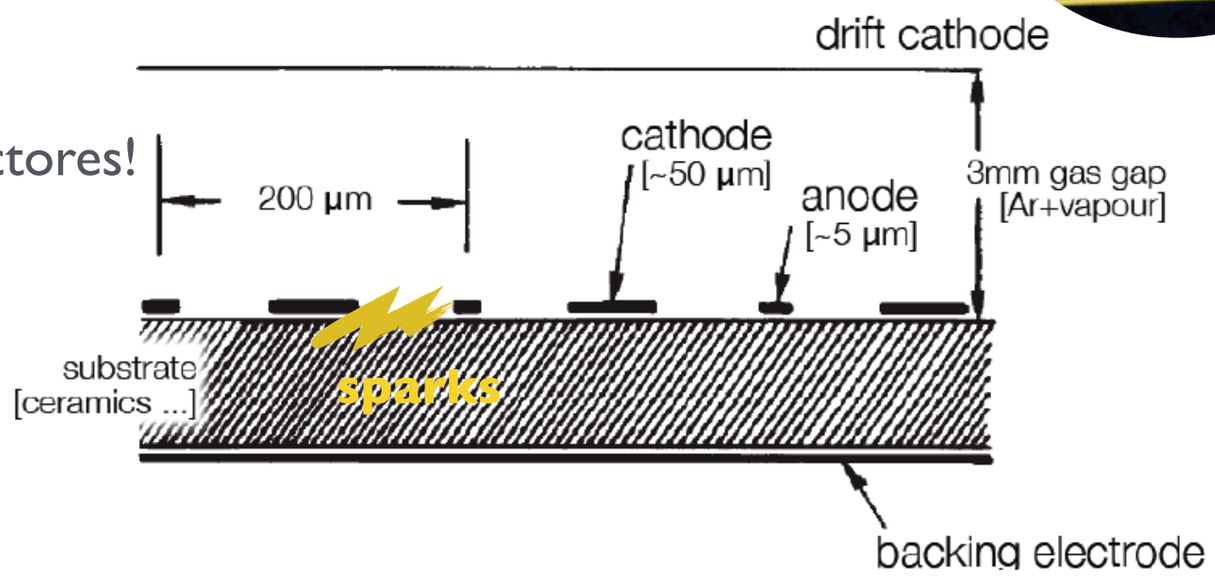


Micro-strips gas chambers (MSGC)

- Se reemplaza los cables con electrodos en una placa de circuito impreso
- Las técnicas de fotolitografía permiten un paso de 100 µm (o incluso mejores!)
  - Mayor granularidad que en cámaras multihilos
  - Capacidad de alta velocidad> 106 Hz / mm^2
  - Excelente resolución espacial (~30µm)
  - Resolución de tiempo en el rango de ns.
- MSGC comenzaron a desarrollarse en los 1990s
  - Uno de los grandes problemas eran las descargas que podían inutilizar los detectores!

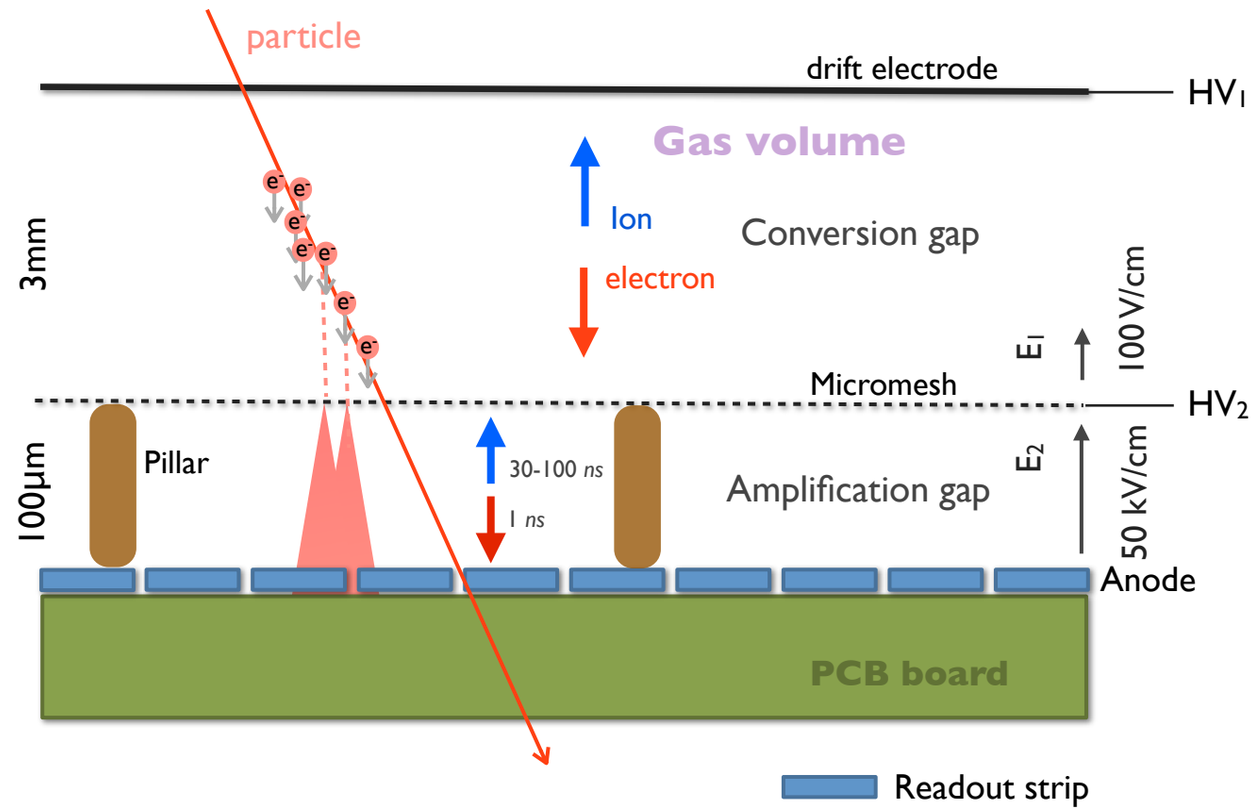




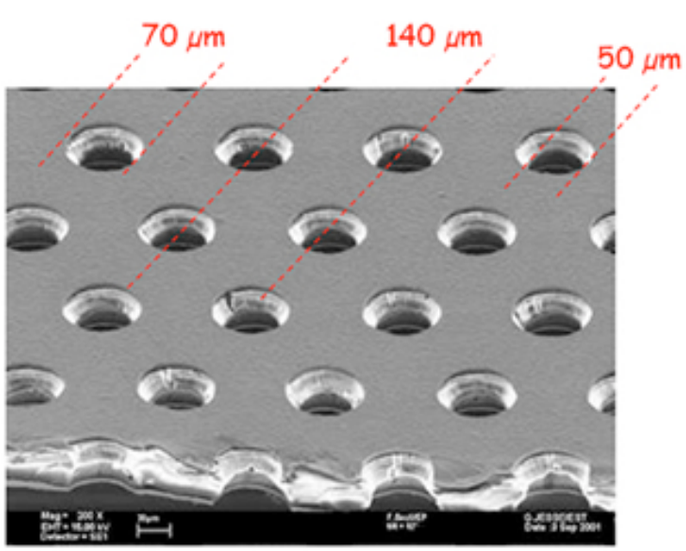


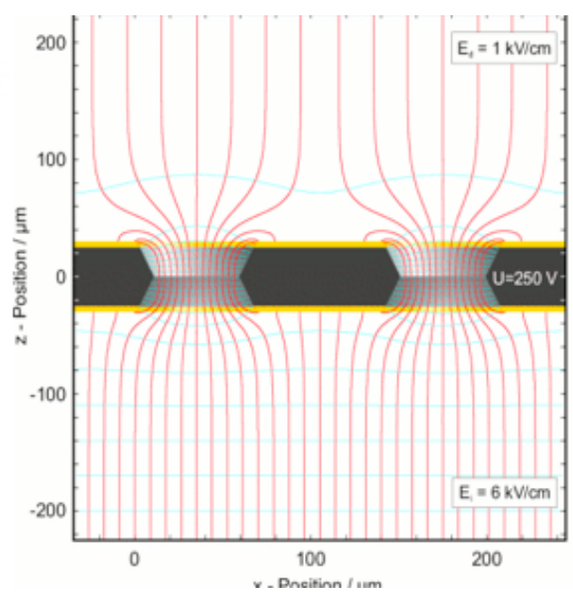
Micromegas y GEMs

- 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



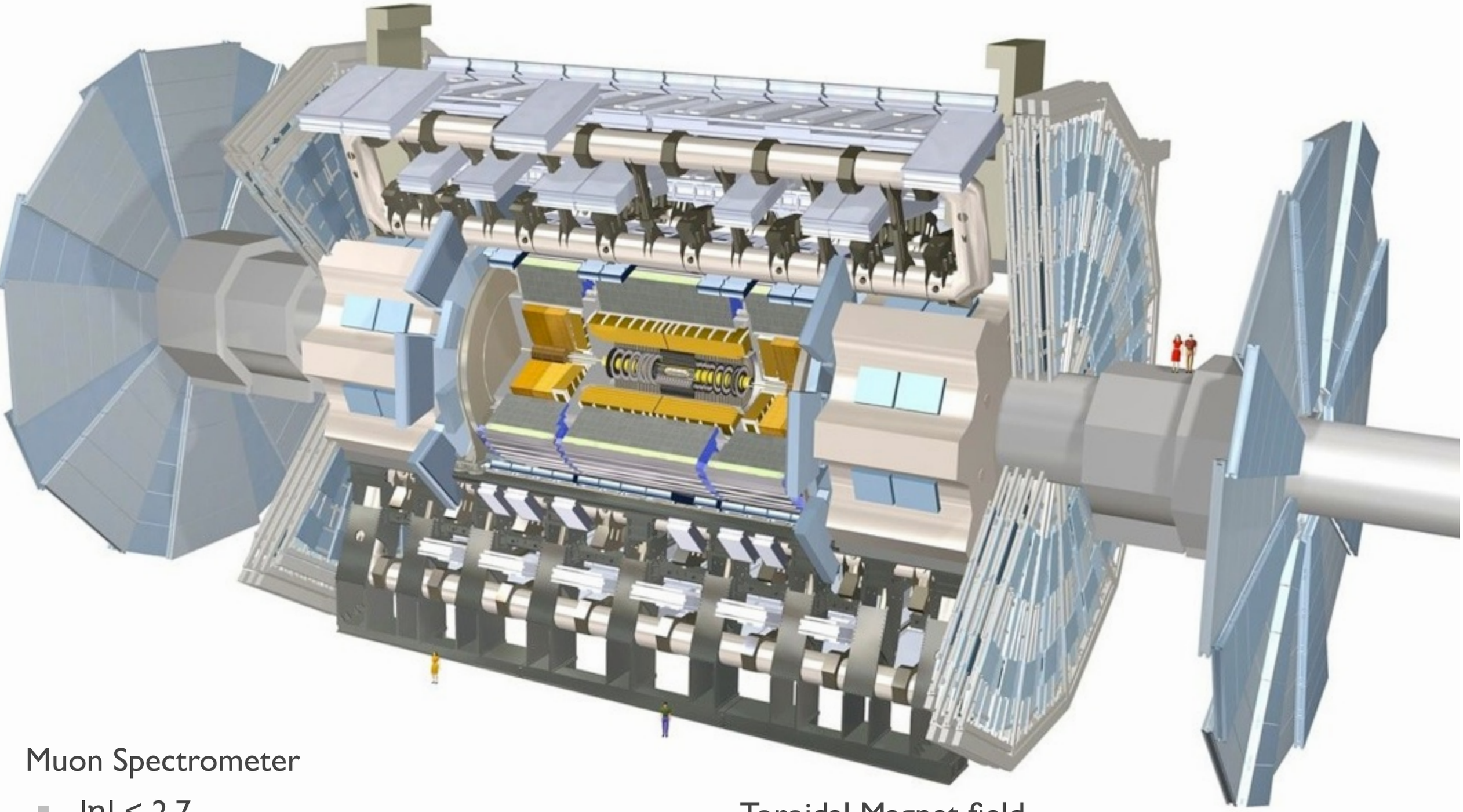


- GEM (Gas Electron Multipliers)
  1. Los electrones de ionización son guiados por un campo de alta deriva de GEM que genera avalancha.
  2. La intensidad del campo eléctrico es del orden de unos 10 kV / cm
  3. Aumento de avalancha de 100 - 1000

¿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

Un ejemplo: El espectrómetro de muones de ATLAS



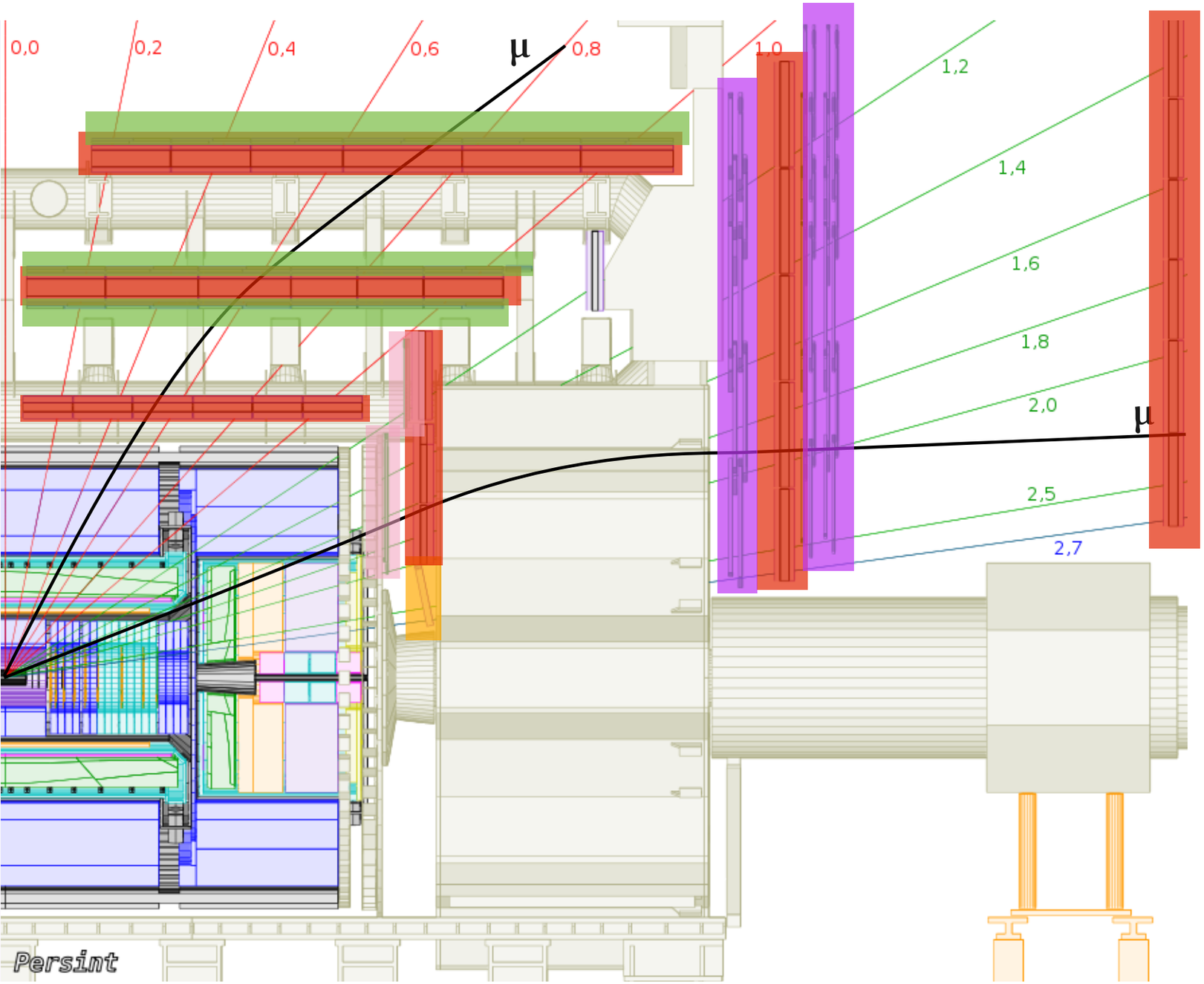
Muon Spectrometer

- $|\eta| < 2.7$
- Muon precision measurement and trigger
- $\sigma/p_T \sim$ from 3 -10 % for 50-1000 GeV muons

Toroidal Magnet field

- Barrel : 2.5 Tm
- End-cap: 6 Tm

Un ejemplo: El espectrómetro de muones de ATLAS



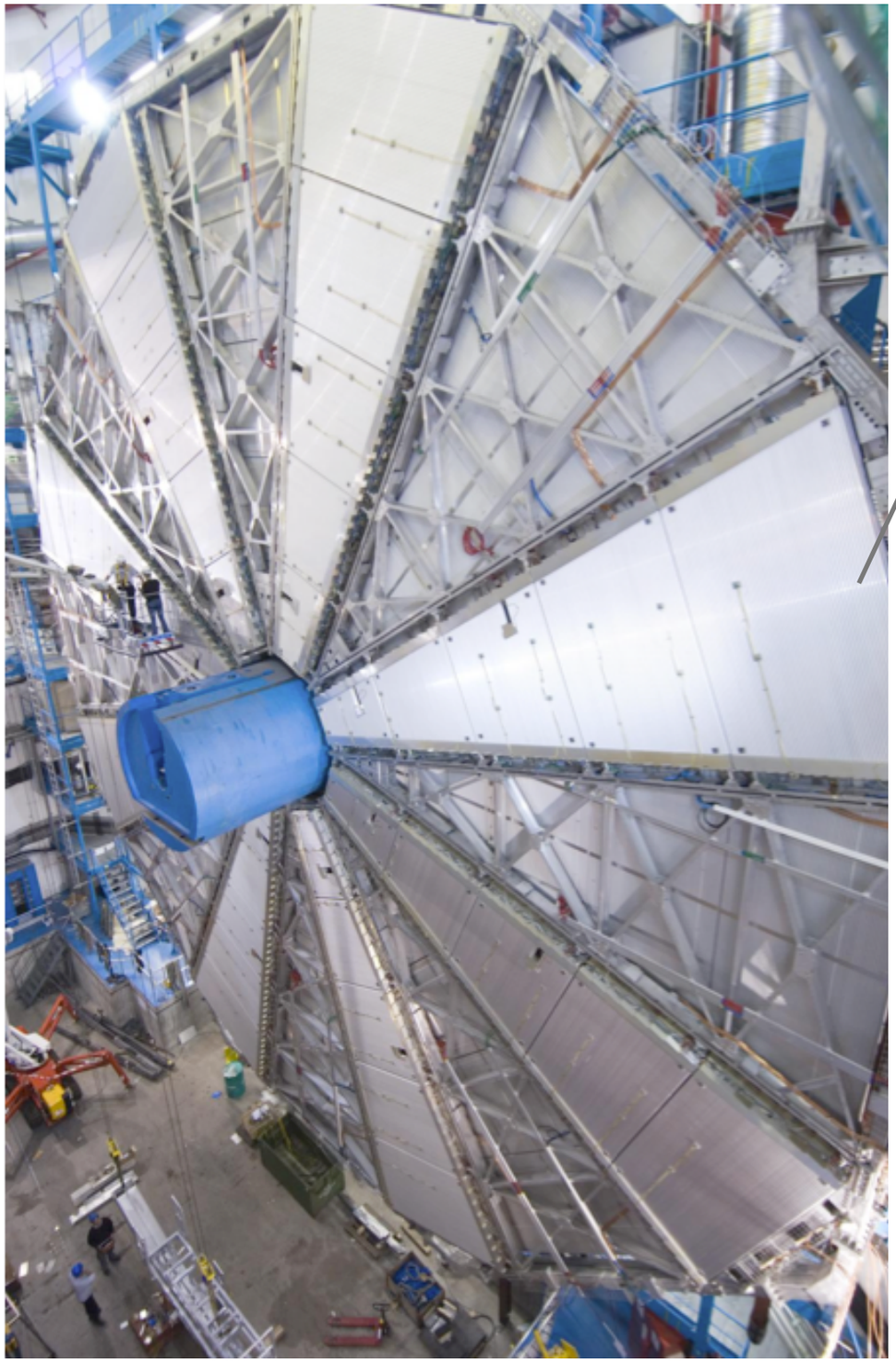
Precision chambers :

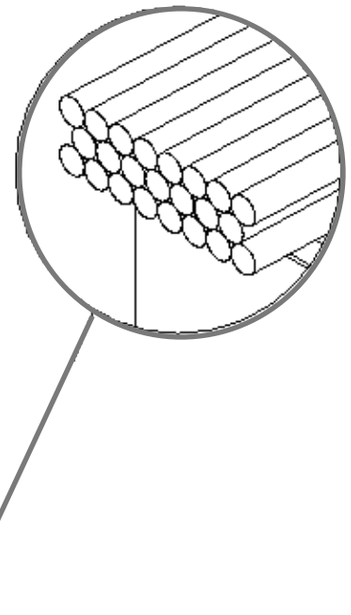
- Monitored Drift Tubes (MDT)
  $|\eta| < 2.7$, ($|\eta| < 2.0$ small wheel)
- Cathode Strip Chambers (CSC)
  $2.0 < |\eta| < 2.7$ (small wheel)

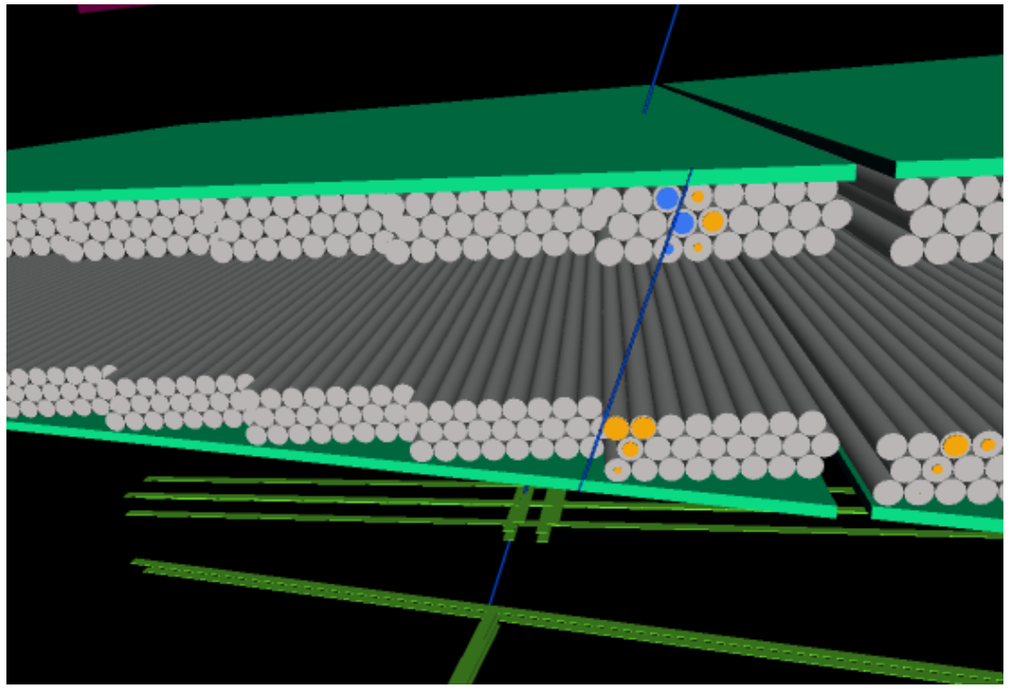
Trigger chambers :

- Resistive Plates Chambers (RPC)
  $|\eta| < 1.05$
- Thin Gap Chambers (TGC)
  $1.05 < |\eta| < 2.7$
  (trigger until $|\eta| < 2.4$)
- Thin Gap Chambers
  (not in trigger)

Un ejemplo: Los tubos de deriva de ATLAS







Tracking

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

Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

Tracking

- ¿Qué es el tracking (o rastreo)?
  - Tracking es la reconstrucción de la trayectoria de partículas cargadas en un detector

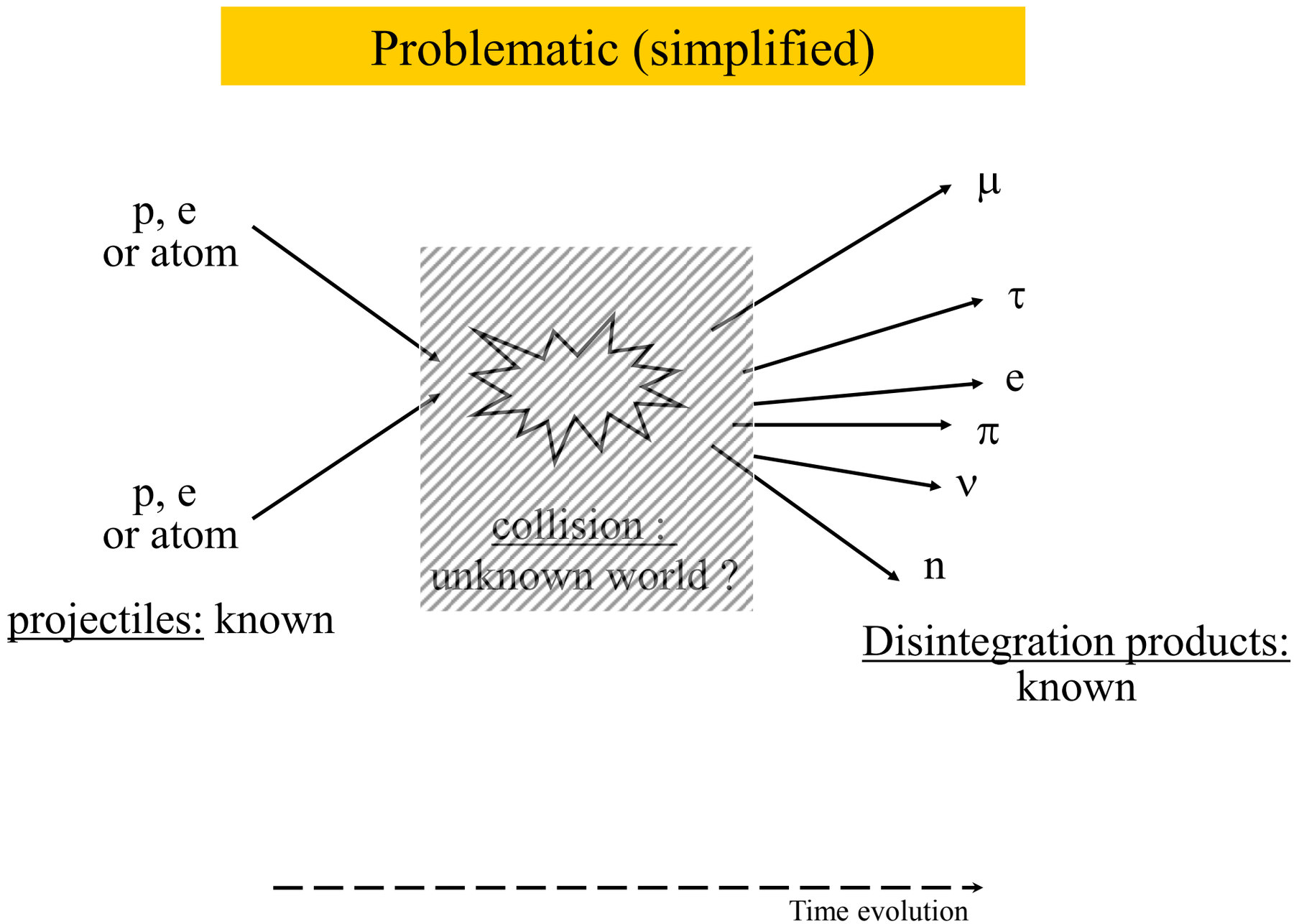
Tracking

- ¿Qué es el tracking (o rastreo)?
  - Tracking es la reconstrucción de la trayectoria de partículas cargadas en un detector
- ¿Para qué nos sirve reconstruir las trayectorias de las partículas?
- ¿Cómo reconstruimos las trayectorias de las partículas?
- ¿Cómo, usando trazas, identificamos partículas, medimos su carga y momentum?

¿Para qué nos sirve reconstruir las trayectorias de las partículas?

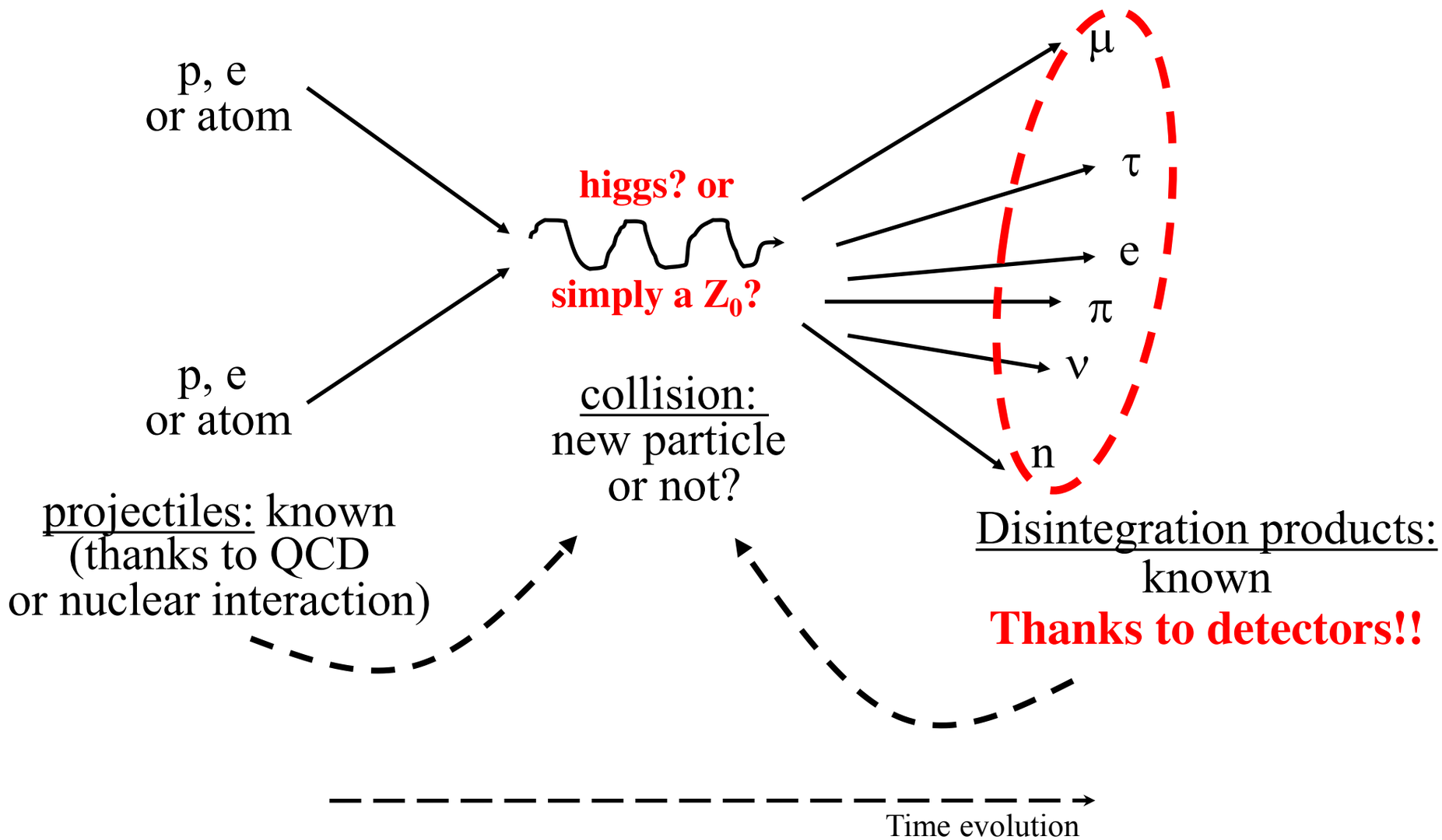
¿Para que reconstruir trazas?

- En un experimento de física queremos conocer las partículas que atraviesan nuestro detector



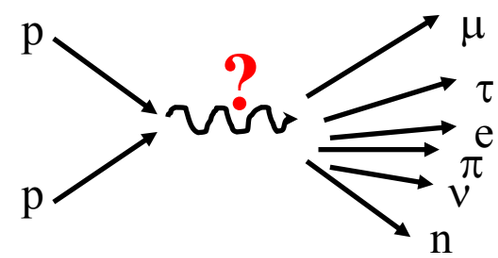
¿Para que reconstruir trazas?

Problematic (simplified)



¿Para que reconstruir trazas?

Goal: test a theory.
Example of an analysis



<u>I would like to find (for example) a Higgs using its decay mode:</u>

$p + p \rightarrow \underset{\text{(higgs)}}{H} \rightarrow Z^0 Z^{0*} \rightarrow e^+ e^- \ \mu^+ \mu^-$ (in real life: $p+p \rightarrow H + \ldots \rightarrow ZZ+\ldots \rightarrow ee\mu\mu+\ldots$)

I should calculate:

$$m_H^2 = (E_{Z^0} + E_{Z^{0*}})^2 - (\vec{p}_{Z^0} + \vec{p}_{Z^{0*}})^2$$

For each Z^0, I should calculate (e.g. for $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$) :

$$m_{Z^0}^2 = (E_{\mu+} + E_{\mu-})^2 - (\vec{p}_{\mu+} + \vec{p}_{\mu-})^2$$

Also for a Higgs decaying in two gamma's : $H \rightarrow \gamma\gamma$
In all cases, we should measure:
$E_{\mu+}$, $E_{\mu-}$, spatial momentum (i.e. tracks with their angular directions)

¿Qué queremos conocer de las partículas?

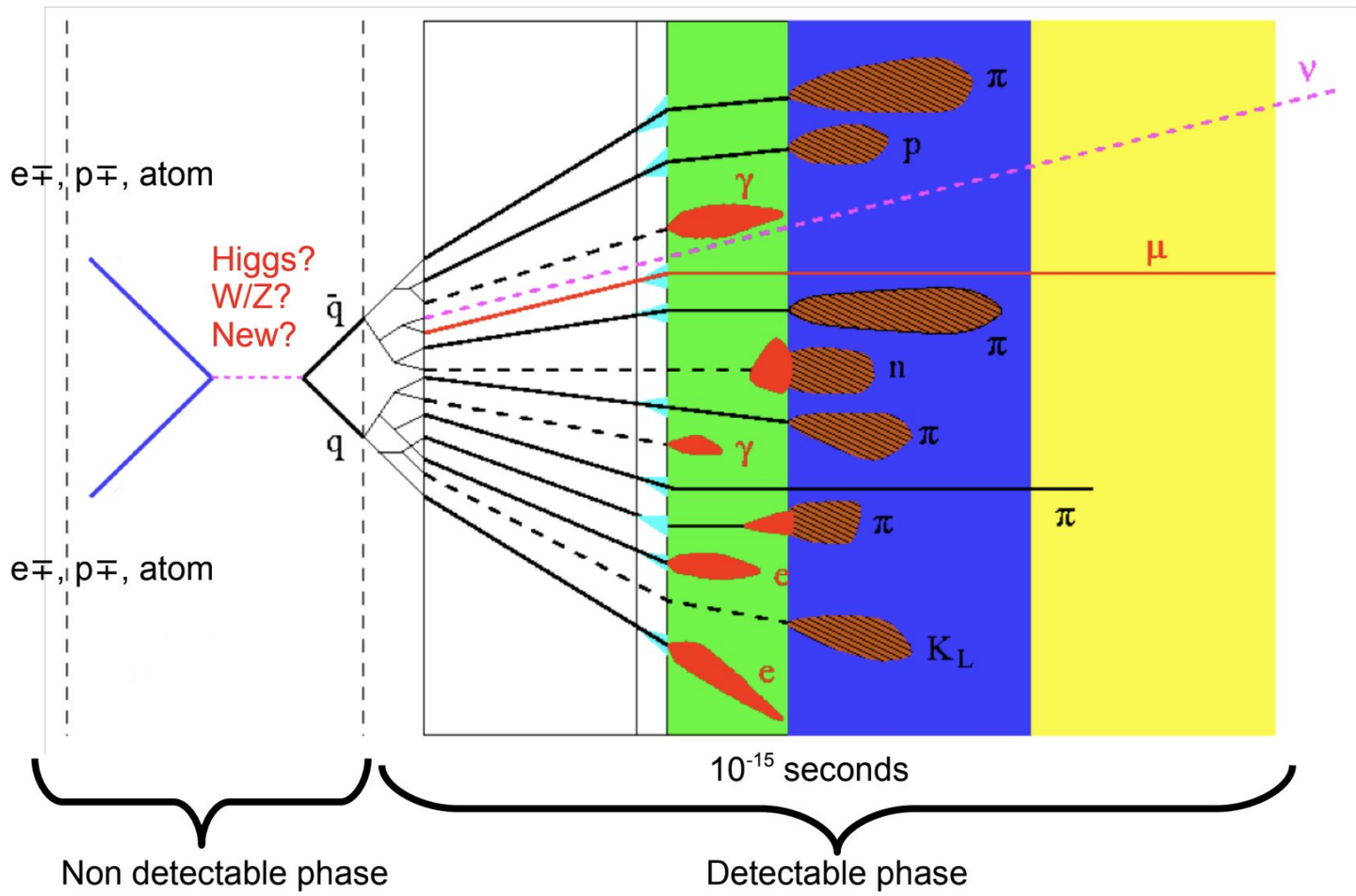
- Para las partículas necesito poder
  - medir la energía de estas partículas
  - medir la posición de las partículas (es decir, saber por donde pasó o si pasó)
  - medir la dirección de estas partículas
  - Identificar estas partículas (carga y masa)

¿Cómo nos ayuda con eso el tracking?

- Tracking nos permite la reconstrucción de la trayectoria de **partículas cargadas estables** en un detector.
- Es una medida no destructiva.
- Usamos campos magnéticos para determinar el momento y la carga de la partícula.

Partículas estables

- Solo podemos medir directamente partículas con tiempo de vida largo



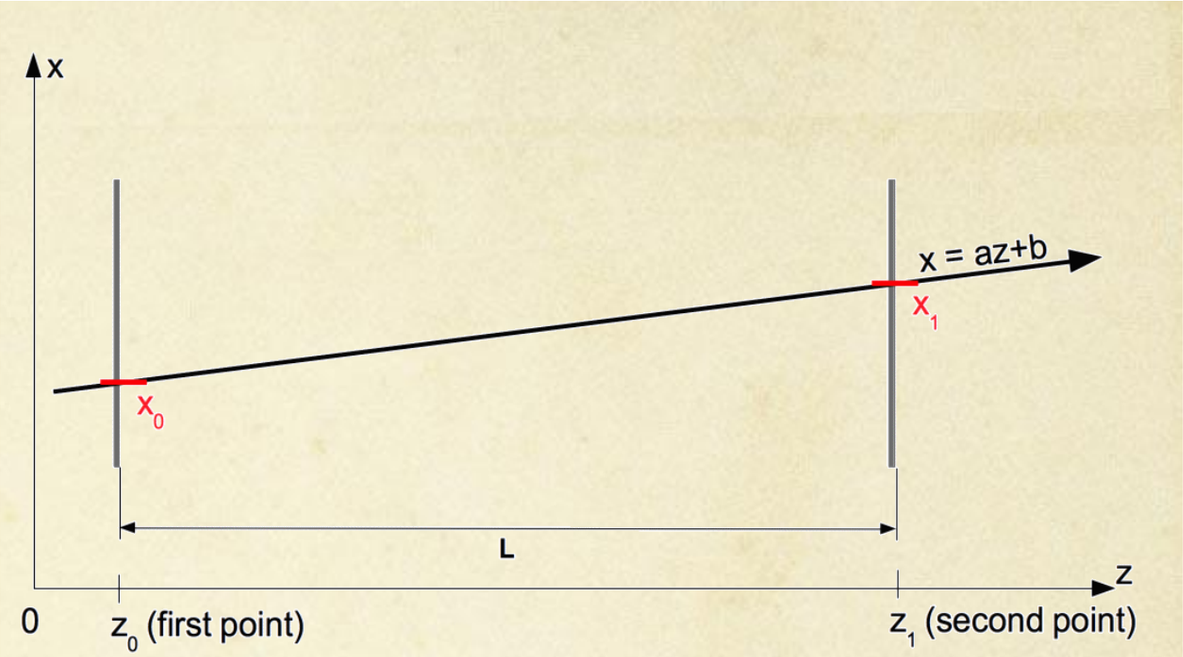
- Partículas inestables:
  - se identifican mediante la reconstrucción de las partículas estables que salen a partir de su desintegración.
- Partículas estables:
  - atraviesan el detector, y no se desintegran dentro de éste.
  - partículas cargadas: $\pi^{\pm}$, $k^{\pm}$, muones, electrones y protones (y sus antipartículas).
  - partículas neutrales: fotones, neutrones, k^0.

¿Cómo reconstruimos las trayectorias de las partículas?

Tracking version v. 1.0

Hipótesis:

- Dos sensores
  - posiciones perfectas
  - infinitamente delgado
- 1 partícula viajando en linea recta
  - 2 parámetros (a,b)



$$a = \frac{x_1 - x_0}{z_1 - z_0} \text{ , } b = \frac{x_0 z_1 - x_1 z_0}{z_1 - z_0}$$

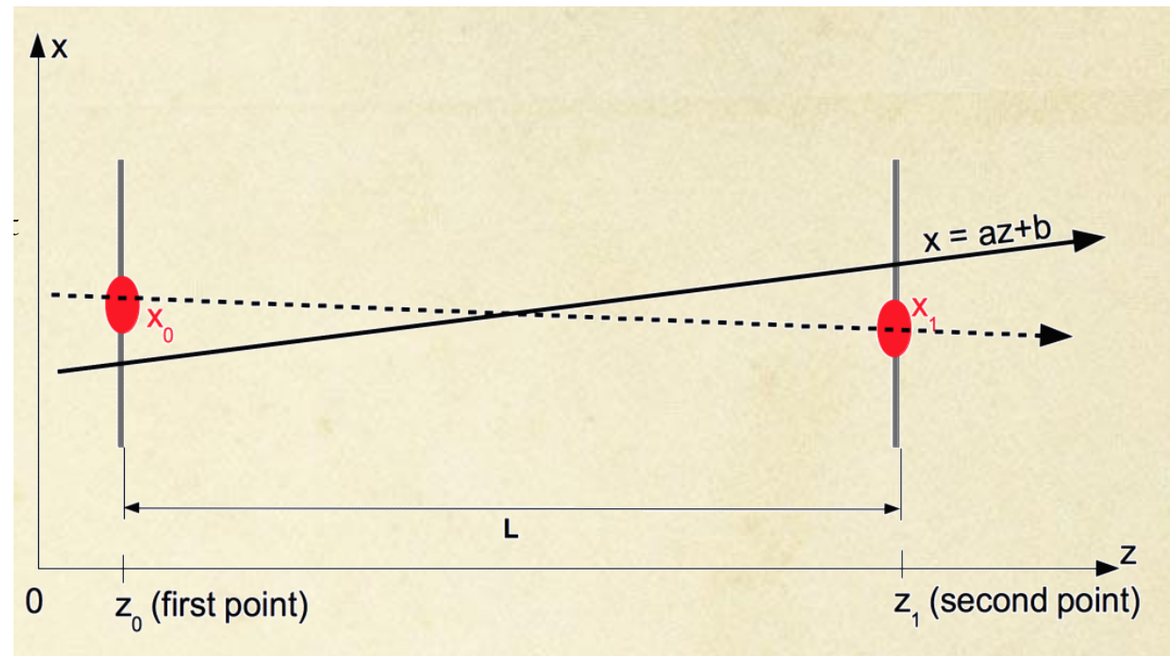
Estimación de los parámetros de la traza

- Asumiendo que la traza es una linea recta
- No hay error!

Tracking version v. 1.1

Hipótesis:

- Dos sensores
  - posiciones con INCERTITUDES S_{det}
  - infinitamente delgado
- 1 partícula viajando en linea recta
  - 2 parámetros (a,b)



Estimación de los parámetros de la traza

- Asumiendo que la traza es una linea recta
- Incertitudes de la propagación de errores

$$a = \frac{x_1 - x_0}{z_1 - z_0}, \quad b = \frac{x_0 z_1 - x_1 z_0}{z_1 - z_0}$$

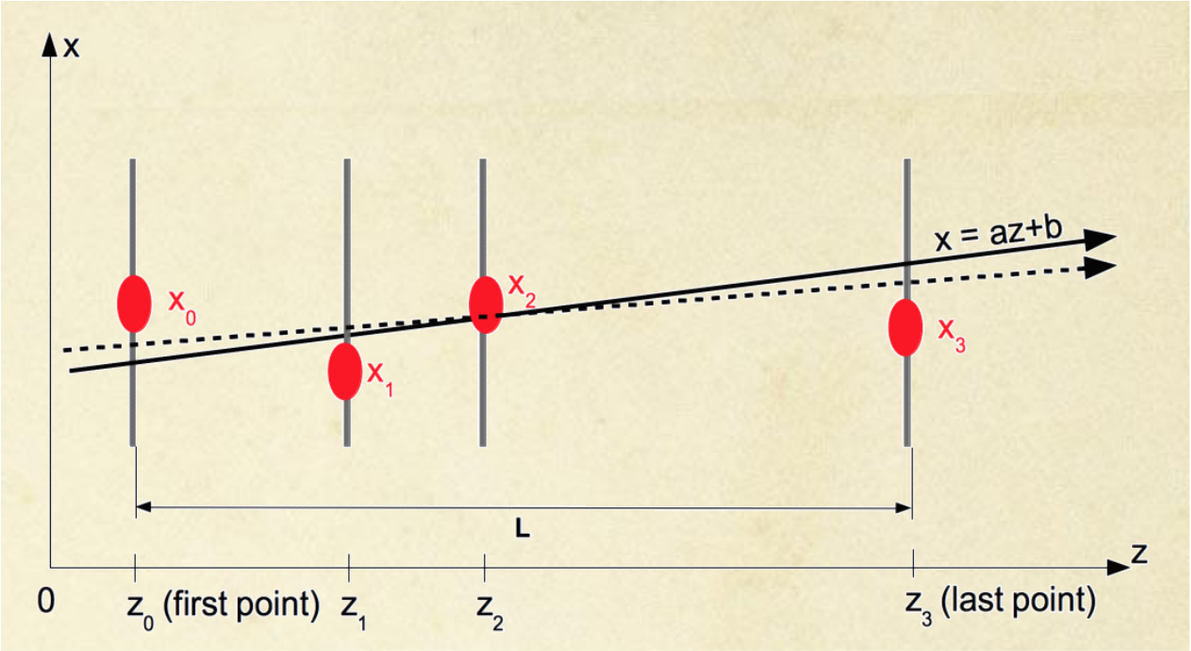
$$s_a = \frac{\sqrt{2}}{z_1 - z_0} s_{det}, \quad s_b = \frac{\sqrt{z_1^2 + z_0^2}}{z_1 - z_0} s_{det}$$

$$\mathrm{cov}_{a,b} = -\frac{\sqrt{z_1 + z_0}}{z_1 - z_0} s_{det}$$

Tracking version v. 1.1

Hipótesis:

- MAS de dos sensores
  - posiciones con INCERTITUDES S_{det}
  - infinitamente delgado
- 1 partícula viajando en linea recta
  - 2 parámetros (a,b)



Estimación de los parámetros de la traza

- Asumiendo que la traza es una linea recta
  - Necesitamos un fit de mínimos cuadrados
  - Necesitamos la matriz de covarianza de las medidas (en este caso es diagonal)
- Incertidumbres por propagación de errores

$$a = \frac{S_1 S_{xz} - S_x S_z}{S_1 S_{z^2} - (S_z)^2}, \quad b = \frac{S_x S_{z^2} - S_z S_{xz}}{S_1 S_{z^2} - (S_z)^2}$$

$$s_a^2 = \frac{S_1}{S_1 S_{z^2} - (S_z)^2}, \quad s_b^2 = \frac{S_{z^2}}{S_1 S_{z^2} - (S_z)^2}$$

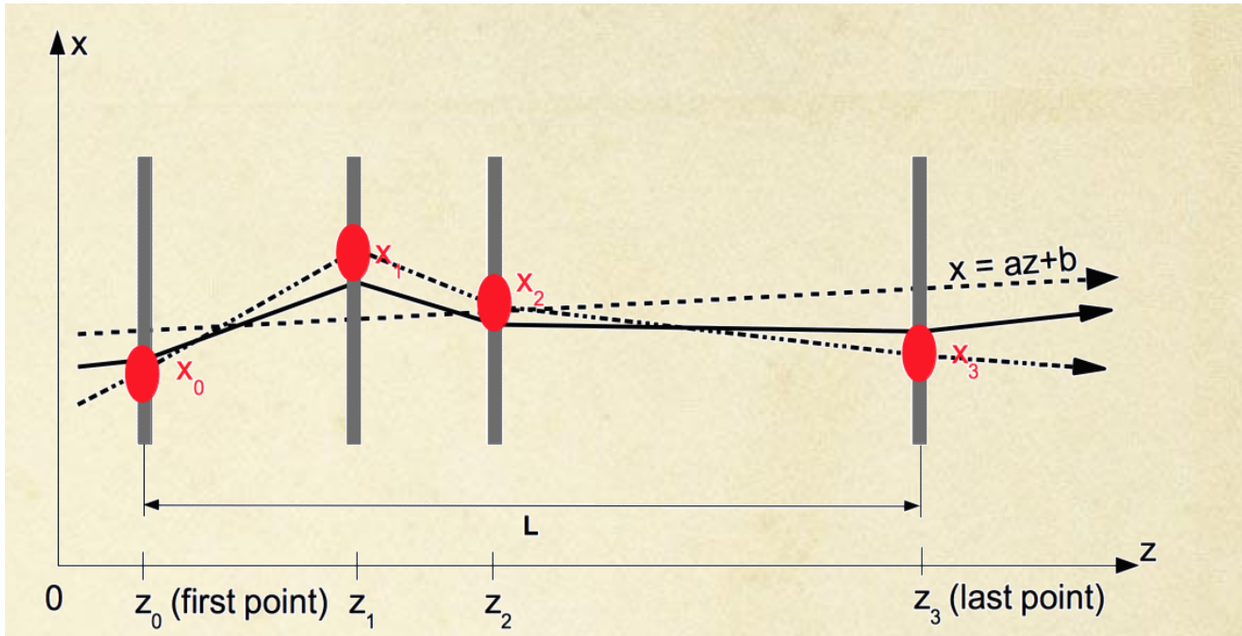
$$\mathrm{cov}_{a,b} = \frac{-S_z}{S_1 S_{z^2} - (S_z)^2}$$

➡ Tanto la medida como las incertidumbres mejoran

Tracking version v. 2.0

Hipótesis:

- Más de dos sensores
  - posiciones con INCERTITUDES S_{det}
  - Detector con algo de grosor (efectos físicos)
- 1 partícula viajando en linea recta
  - 2 parámetros (a,b)



$$a = \frac{S_1 S_{xz} - S_x S_z}{S_1 S_{z^2} - (S_z)^2}, \quad b = \frac{S_x S_{z^2} - S_z S_{xz}}{S_1 S_{z^2} - (S_z)^2}$$

Estimación de los parámetros de la traza

- Asumiendo que la traza es una linea recta
  - Necesitamos un fit de mínimos cuadrados
  - Necesitamos la matriz de covarianza de las mediciones (en este caso tiene términos no diagonales)
- Incertidumbres por propagación de errores

➡ Ahora las incertitudes crecen!

Expresión de la matriz covariante compleja
- correlación entre sensores
- Varias implementaciones posibles

Tracking version RELOADED

Hipótesis:

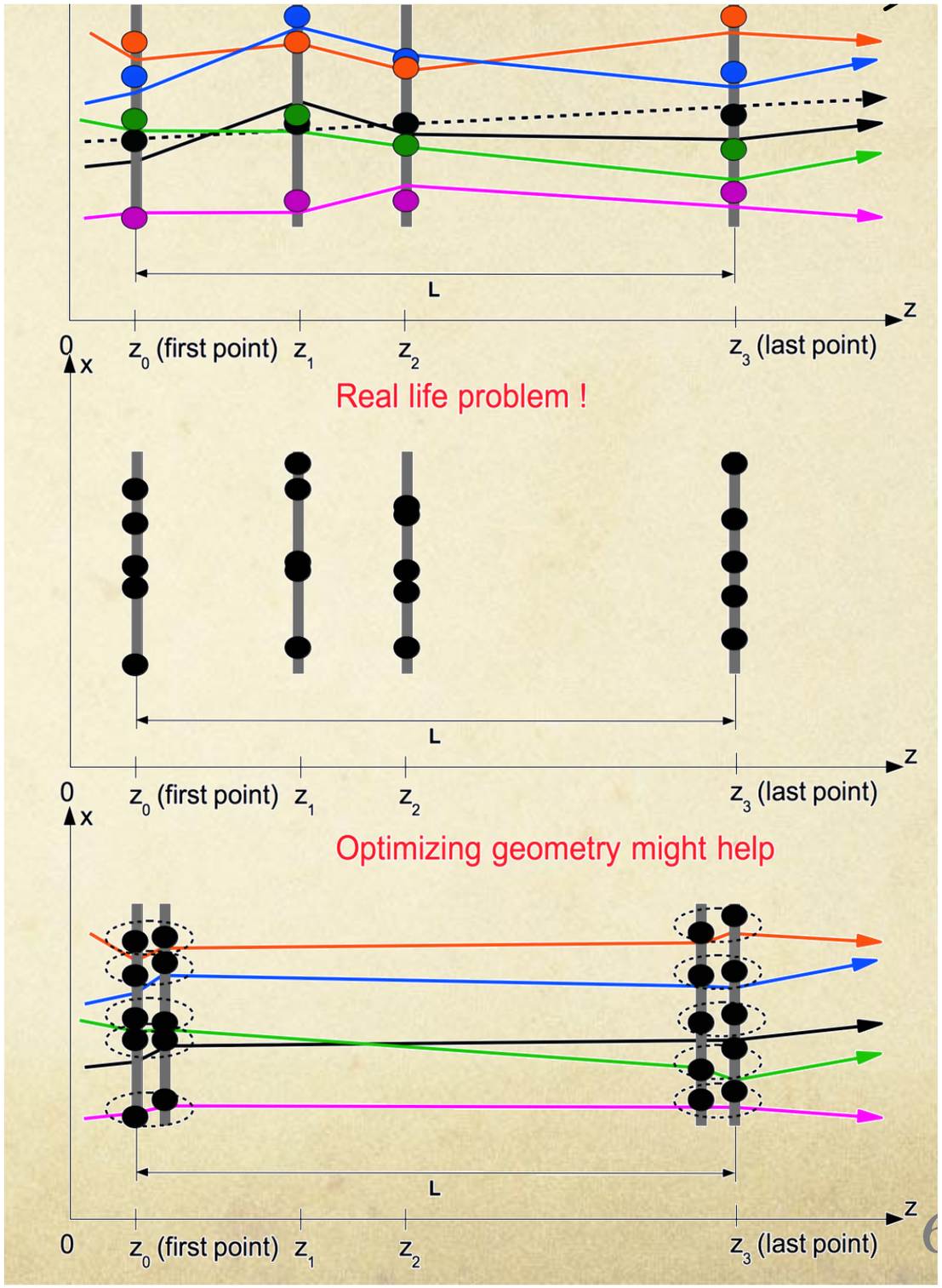
- Más de dos sensores
  - posiciones con incertitudes S_{det}
  - detector con algo de grosor
- MUCHAS partículas viajando en linea recta
  - 2 parámetros (a,b) por traza!
  - dirección de la traza puede cambiar

Nuevo paso = Encontrar la traza

- Saber cuales hits pertenecen a una traza
- Depende de la geometria

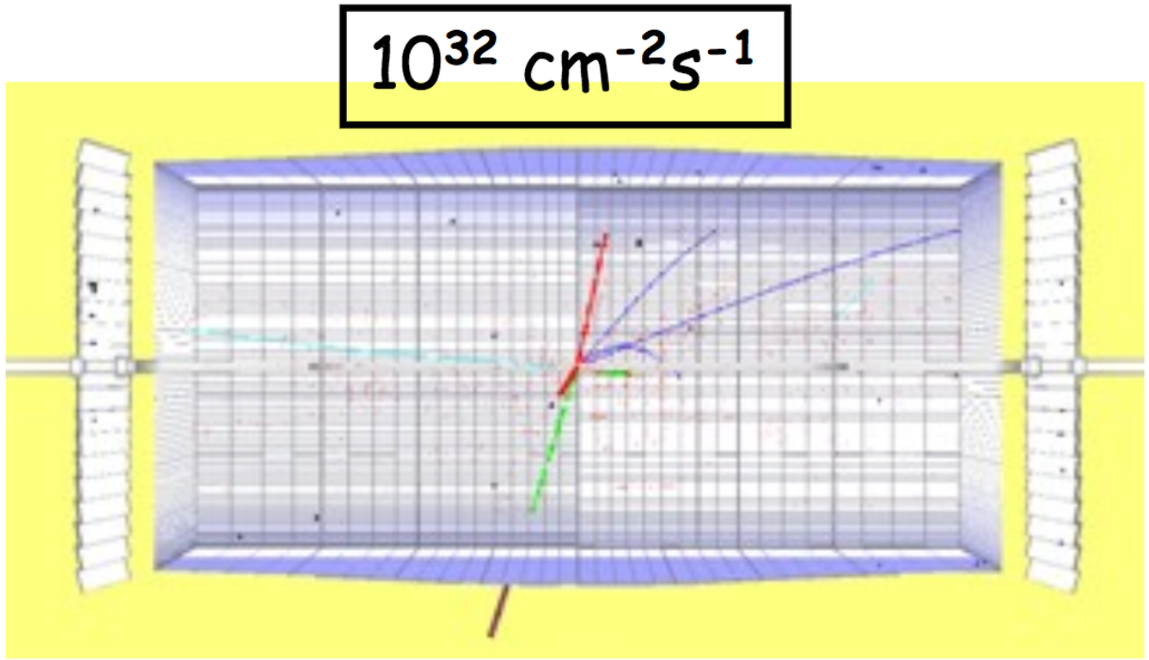
Estimación de los parámetros de la traza

- Después de conseguir los hits
- Los errores están correlacionados



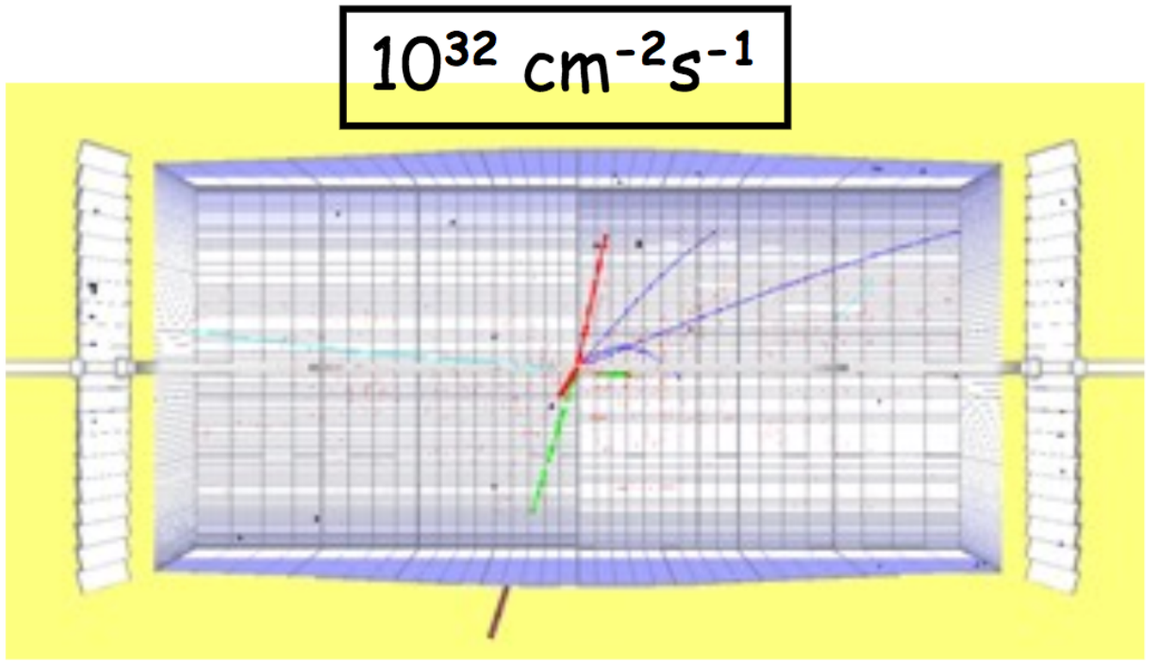
Tracking en el LHC

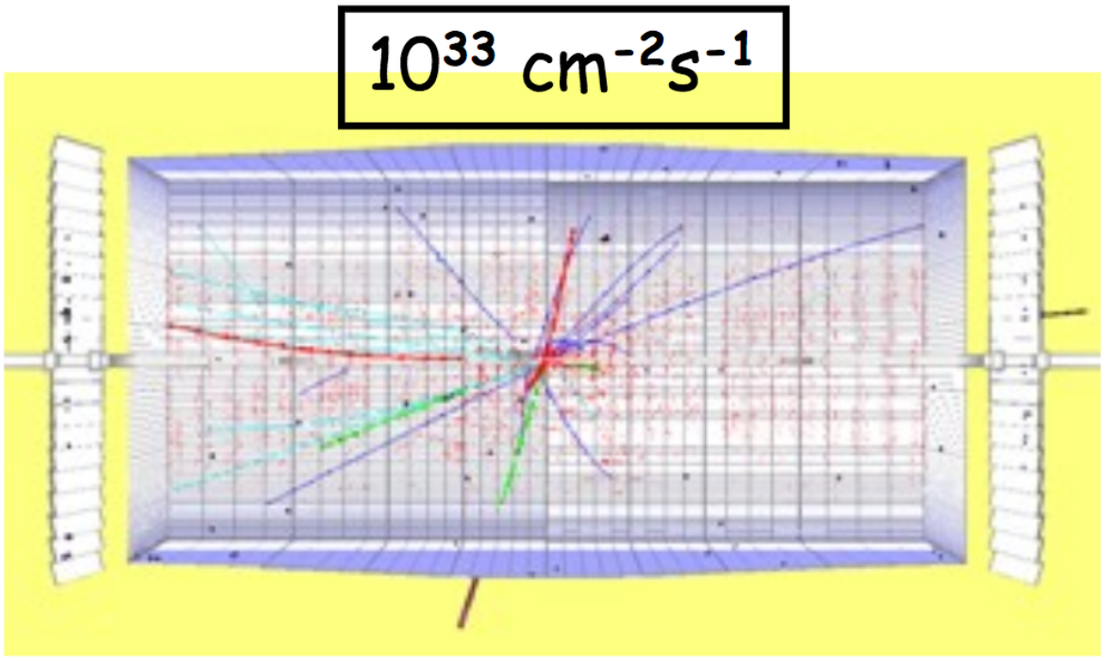
Simulación de un H→ZZ→μμee con masa de M_H=300 GeV en el detector CMS y diferentes luminosidades



Tracking en el LHC

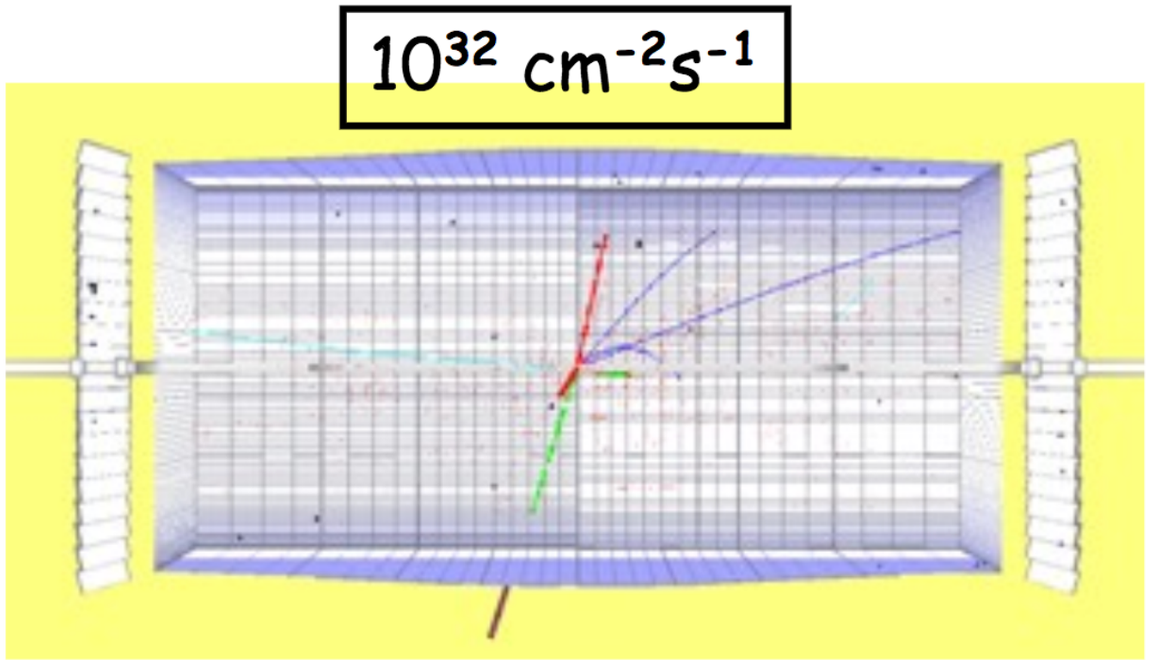
Simulación de un H→ZZ→μμee con masa de M_H=300 GeV en el detector CMS y diferentes luminosidades

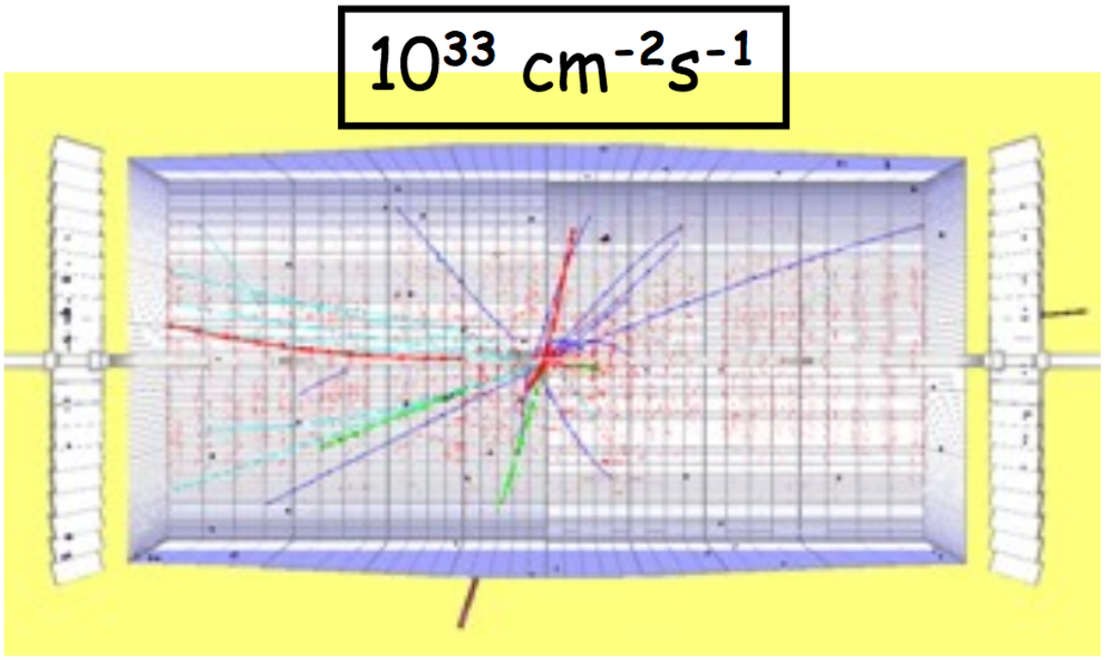


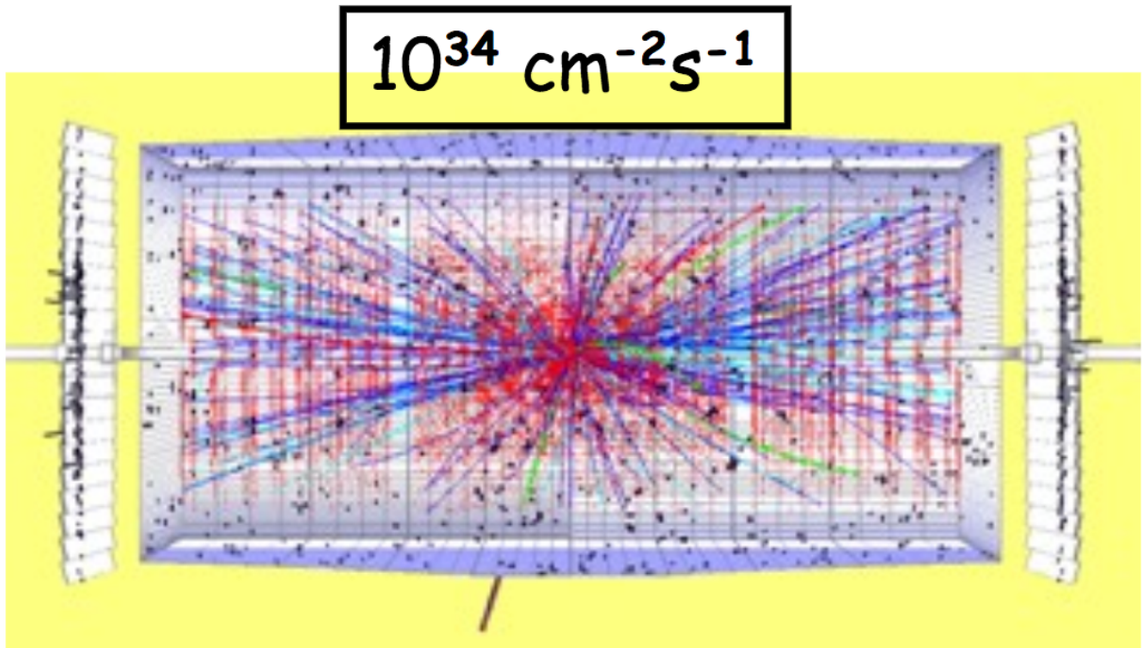


Tracking en el LHC

Simulación de un H→ZZ→μμee con masa de M_H=300 GeV en el detector CMS y diferentes luminosidades

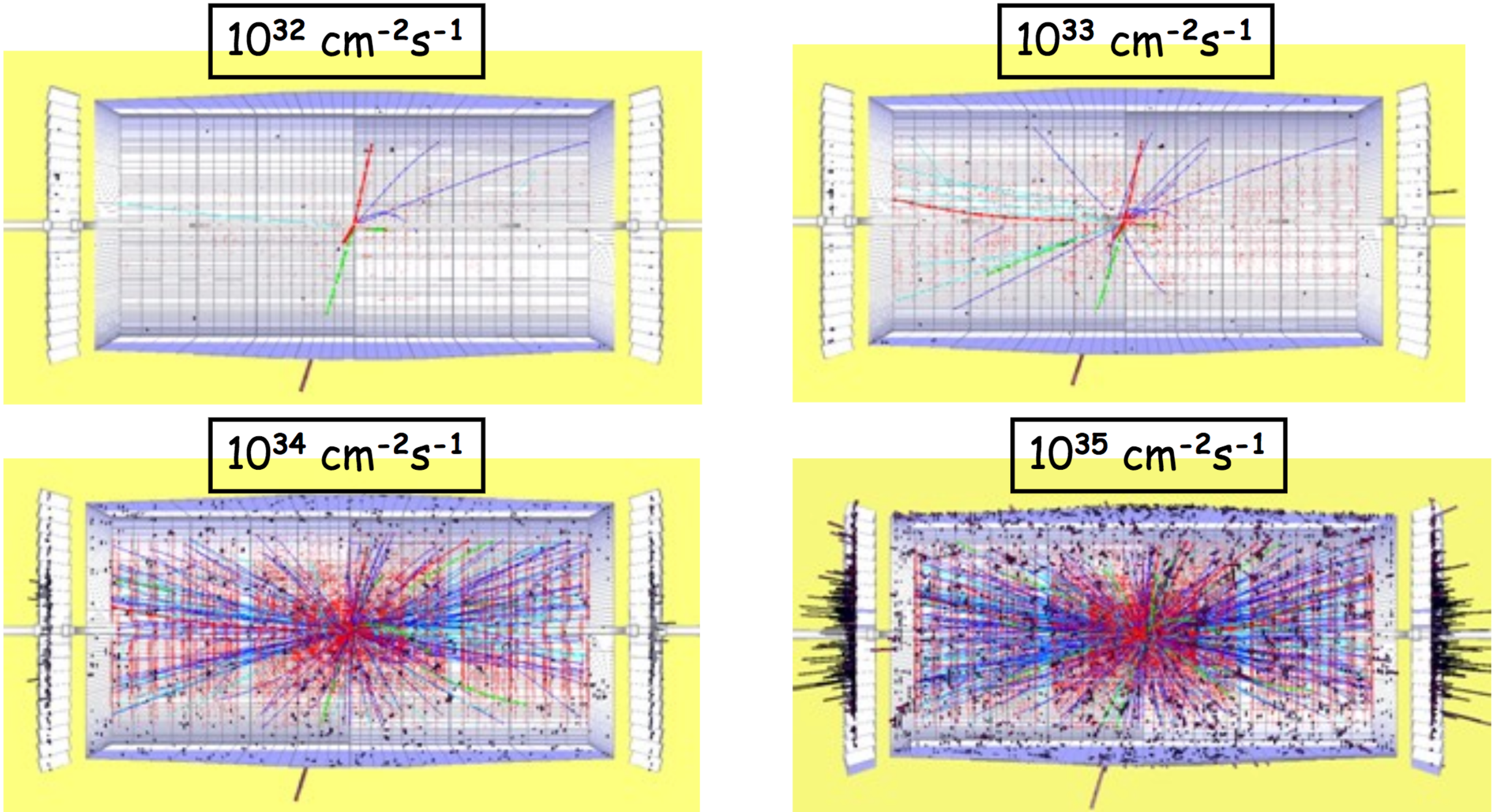






Tracking en el LHC

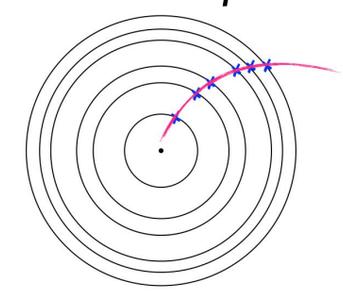
Simulación de un H→ZZ→μμee con masa de M_H=300 GeV en el detector CMS y diferentes luminosidades

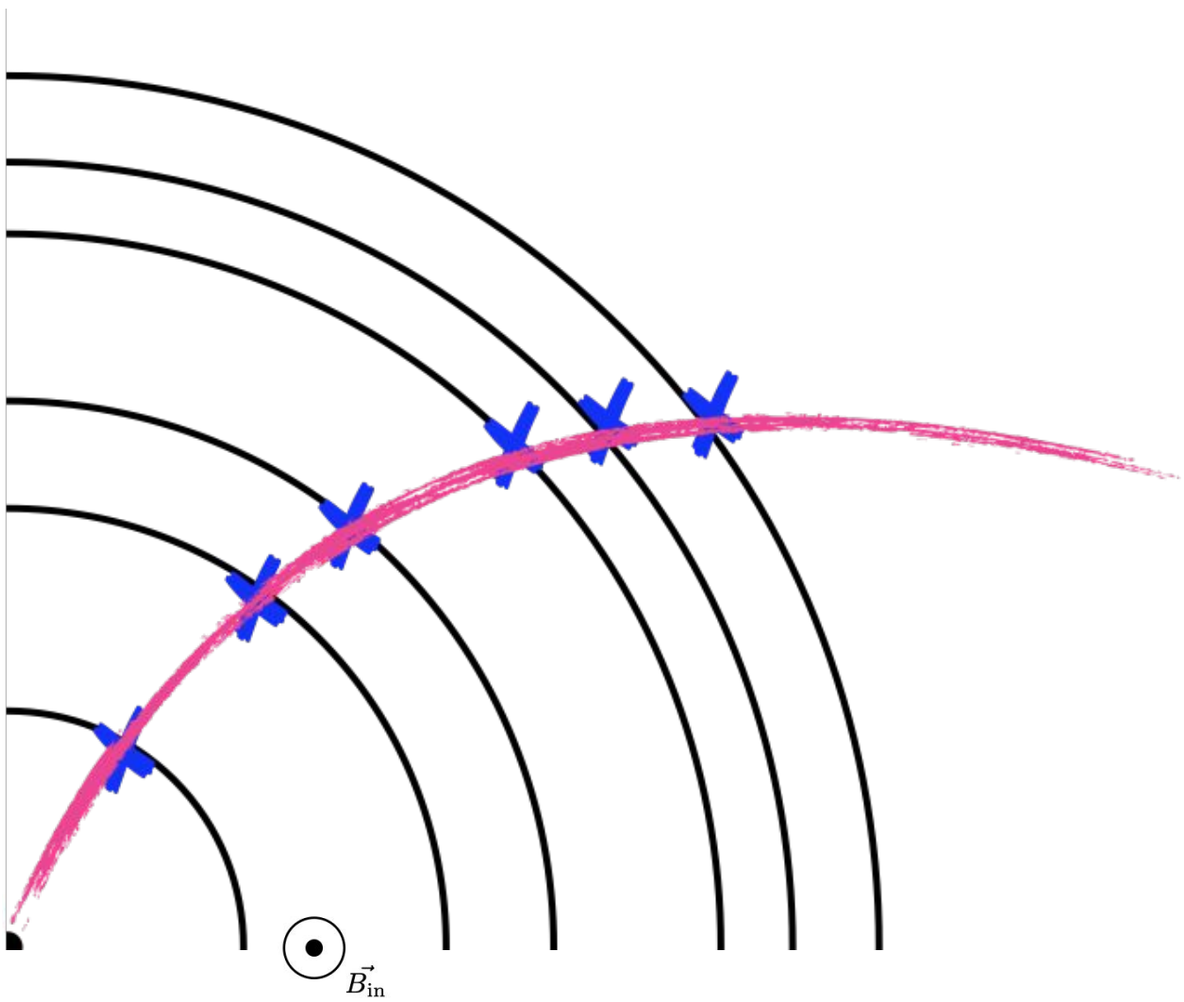


¿Cómo se generan los hits ?

- ¿Qué procesos de interacción de la partícula-materia debemos considerar?

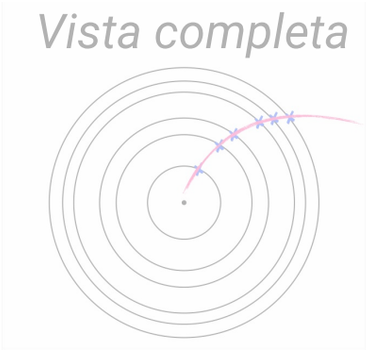
Vista completa



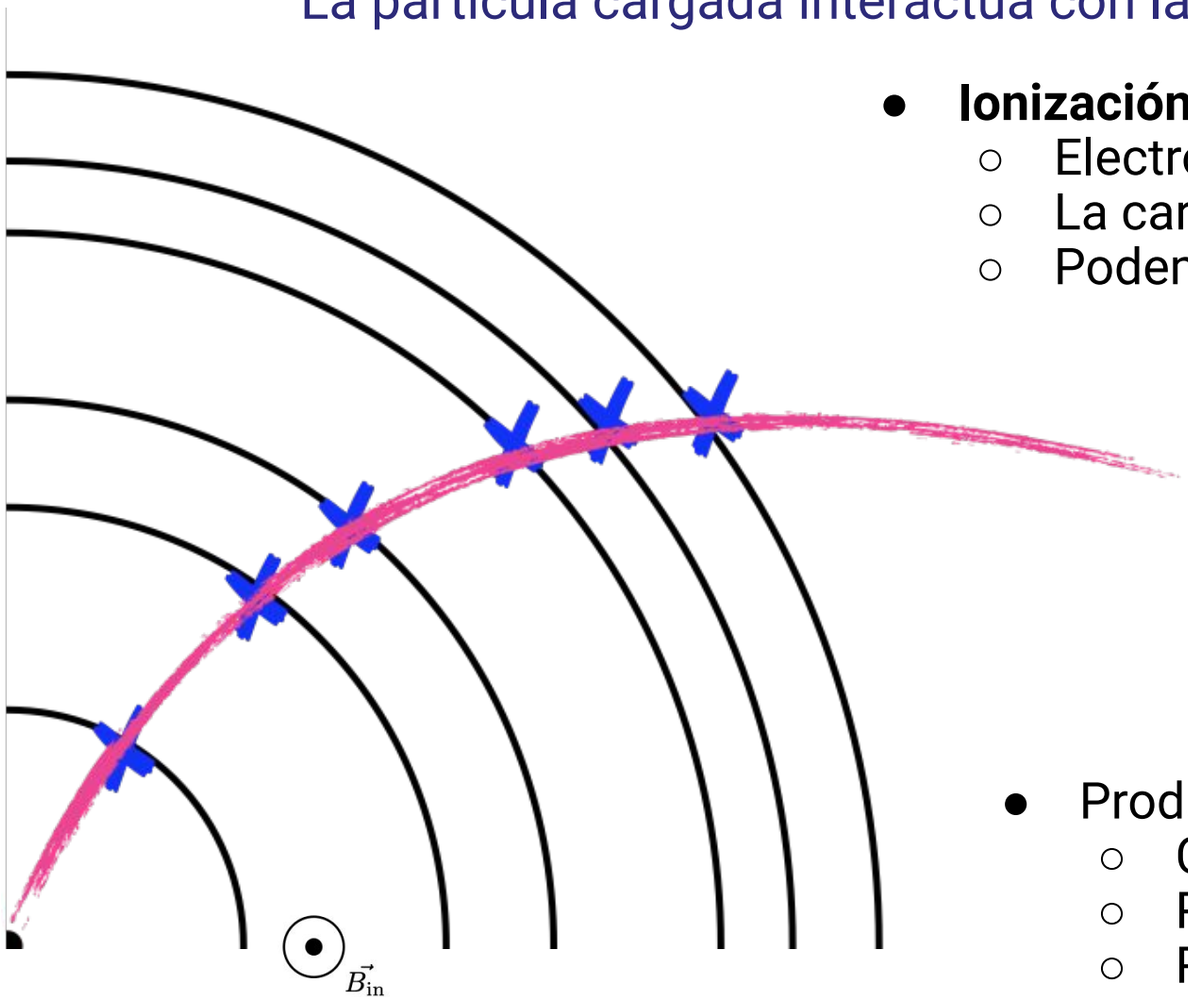


¿Cómo se generan los hits ?

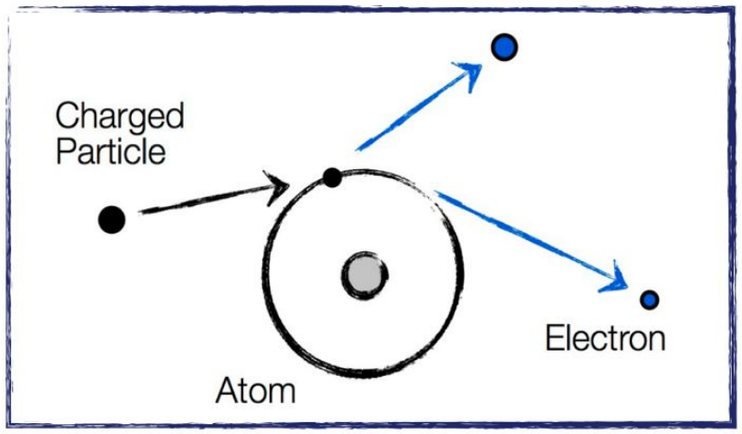
- ¿Qué procesos de interacción de la partícula-materia debemos considerar?



La partícula cargada interactúa con la materia

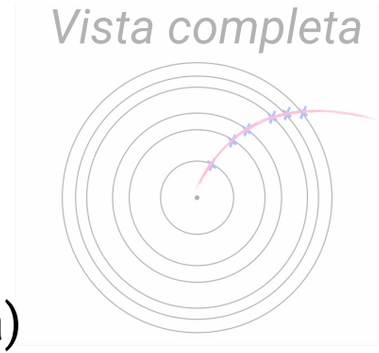


- **Ionización** (principal):
  - Electrones son arrancados del átomo.
  - La carga puede ser detectada.
  - Podemos medir por donde pasó la partícula (*hit*).



- Producción de **luz**:
  - Centelladores,
  - Radiation Cherenkov,
  - Radiación de transición.

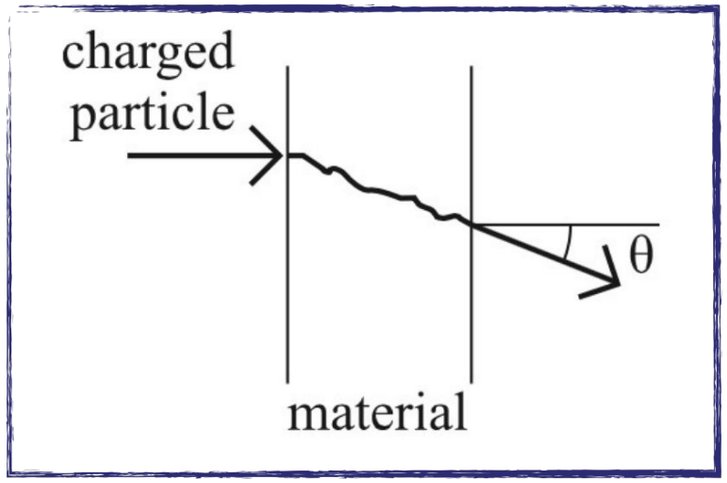
¿Cómo se generan los hits ?



- ¿Qué procesos de interacción de la partícula-materia debemos considerar?

  La partícula cargada es afectada por la interacción con la materia.

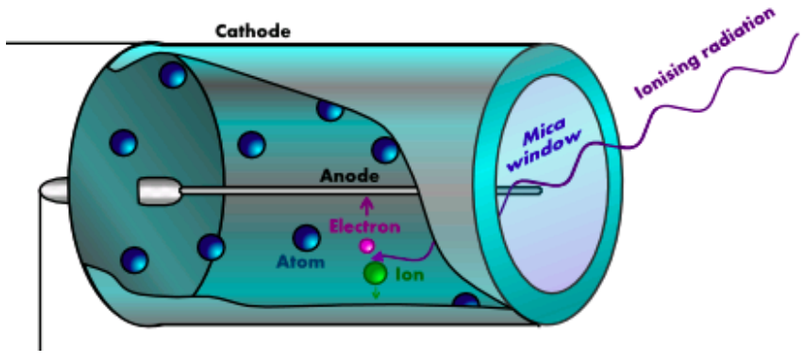
  - **Multiple Coulomb Scattering** (dispersión múltiple):
    - deflección en un ángulo relativamente pequeño (sin pérdida de energía)
    - Afecta la resolución de la medición de trayectorias.



  - **Bremsstrahlung**
    - Afecta partículas ligeras: son aceleradas en la cercanía del núcleo, resultando en la emisión de un fotón (pérdida catastrófica de energía).

¿Cómo se generan los hits ?

- Existen 3 tecnologías de detectores principalmente usadas para *tracking*.
  - Detectores gaseosos.
    - Proceso de ionización en el gas (pares electrón-ion),
    - se requiere una amplificación de la señal.

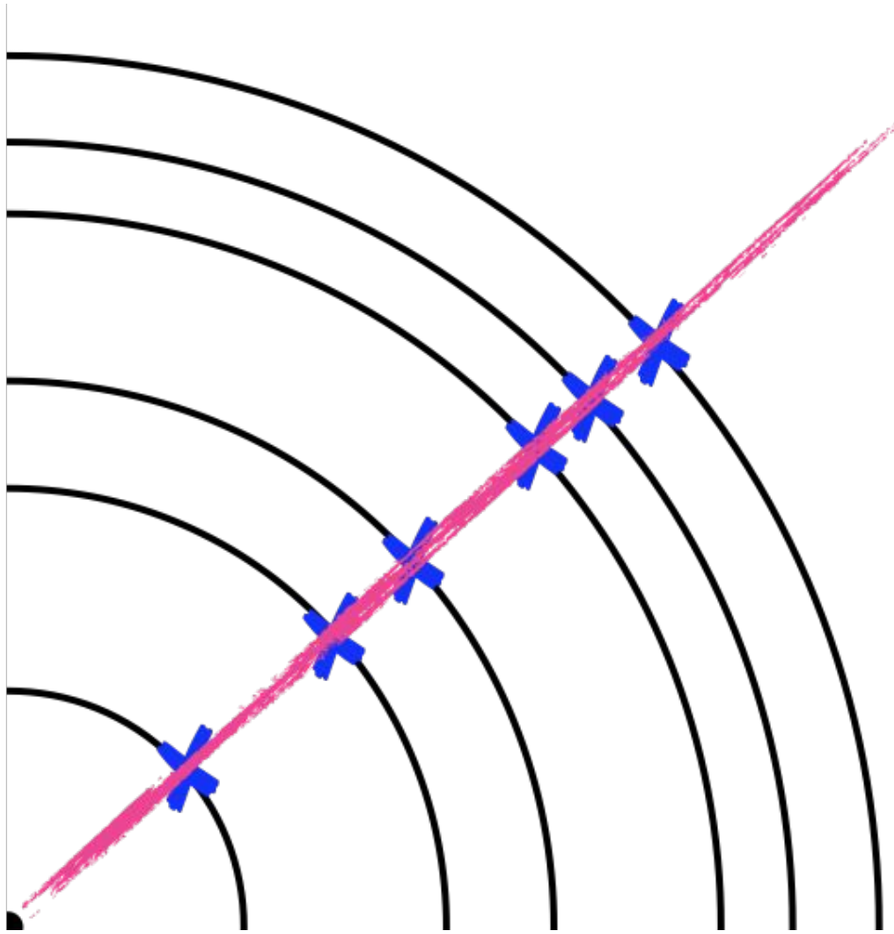


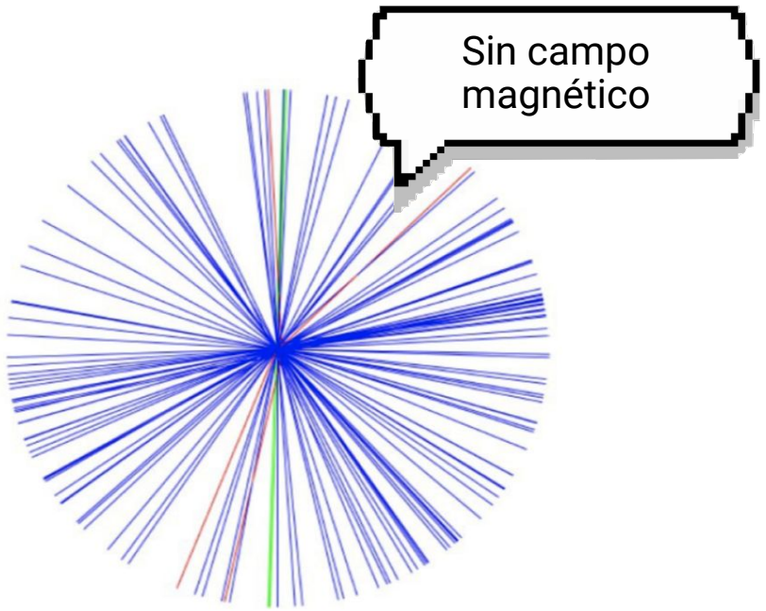
  - Detectores de silicón.
    - Creación de pares electrón-hueco en materiales de estado sólido,
    - no se requiere amplificación.
  - Trackers de fibras centelladoras.
    - luz centelladora se detecta con detectores de fotones (e.g. PMT).

¿Cómo identificamos partículas, medimos su carga y momentum usando trazas?

Partículas cargadas

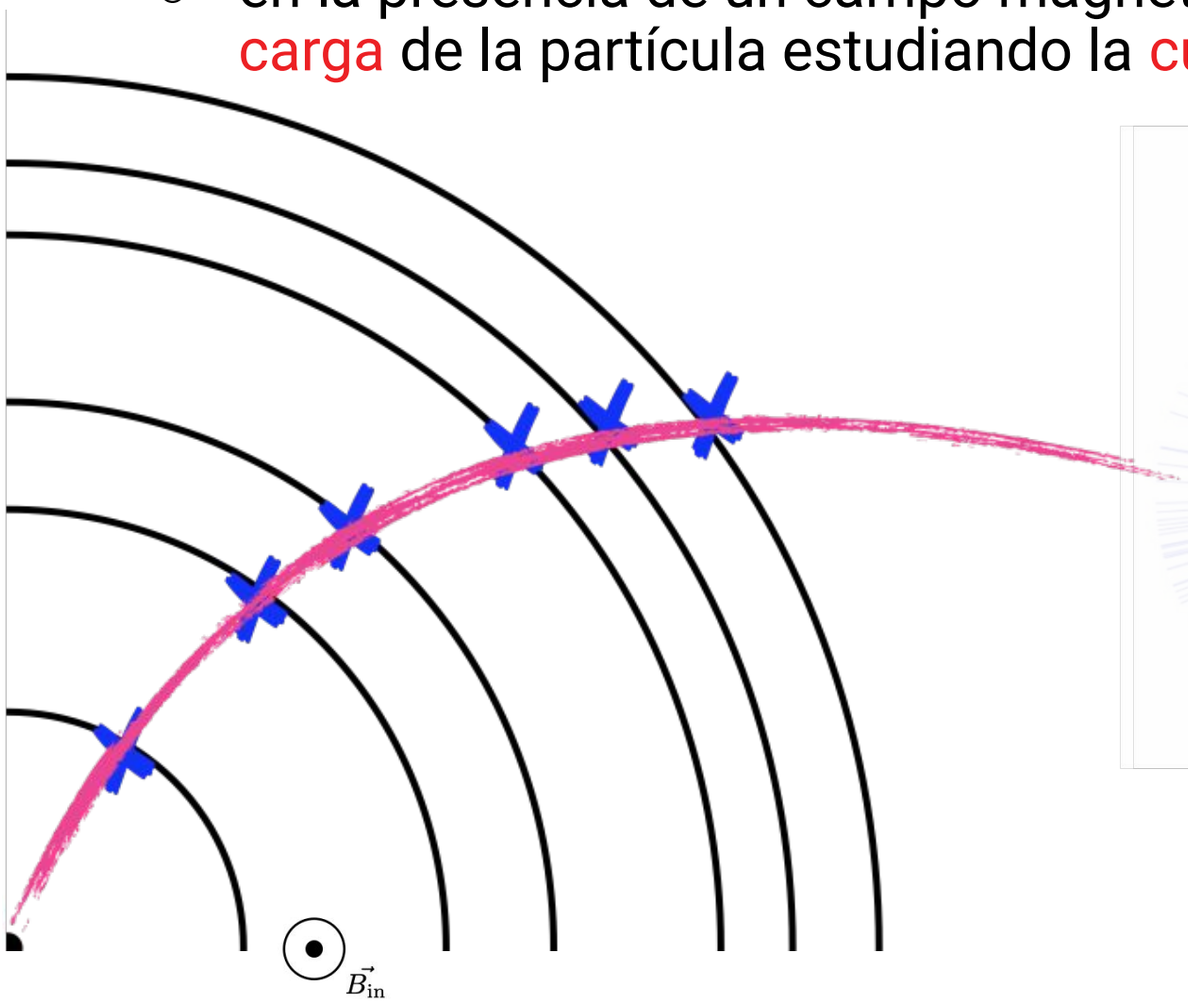
- Partículas cargadas atravesando un detector de ionización.
  - sin campo magnético.

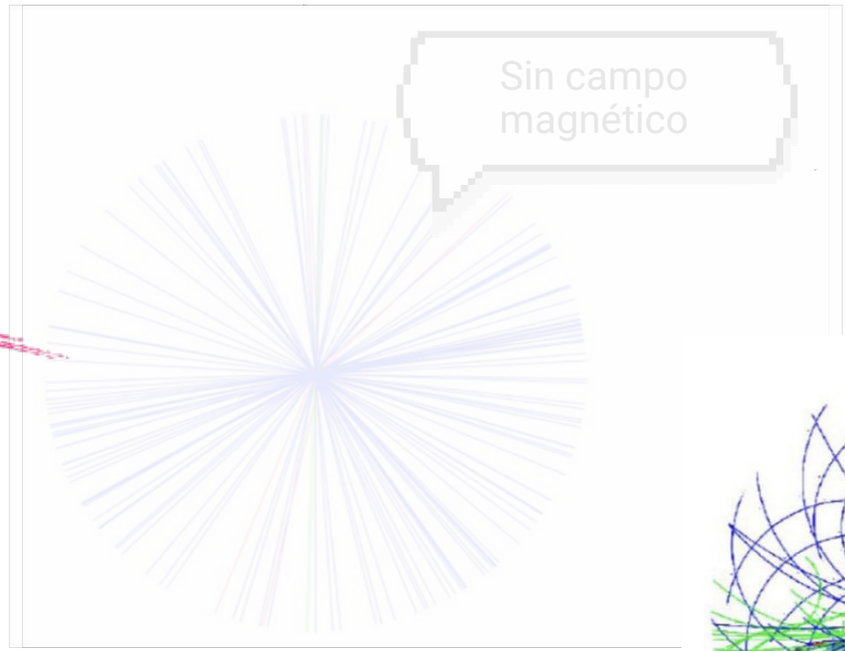


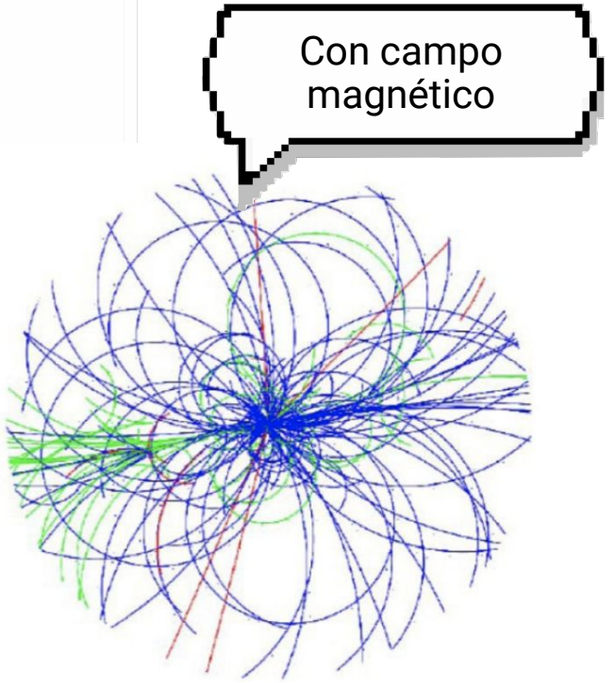


Partículas cargadas en un campo magnético

- Partículas cargadas atravesando un detector de ionización.
  - en la presencia de un campo magnético podemos identificar el momento y la carga de la partícula estudiando la curvatura de la trayectoria.







Partículas cargadas en un campo magnético

- En un campo magnético el movimiento de una partícula cargada está determinado por la fuerza de Lorentz.

$$\boxed{\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B}}$$

- Las fuerzas magnéticas no cambian la energía de las partículas.

$$m_0\gamma\frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B}$$

$$m_0\gamma\frac{d^2\vec{r}}{dt} = e\frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{B}$$

- Además, podemos expresar estas ecuaciones en función de la longitud del camino (en lugar de en función del tiempo):

$$ds = vdt$$

$$m_0\gamma v\frac{d^2\vec{r}}{ds^2} = e\frac{d\vec{r}}{ds} \times \vec{B}$$

- *Llegamos a la ecuación de movimiento de una partícula cargada en un campo magnético:*

$$\boxed{\frac{d^2\vec{r}}{ds^2} = \frac{e}{p}\frac{d\vec{r}}{ds} \times \vec{B}}$$

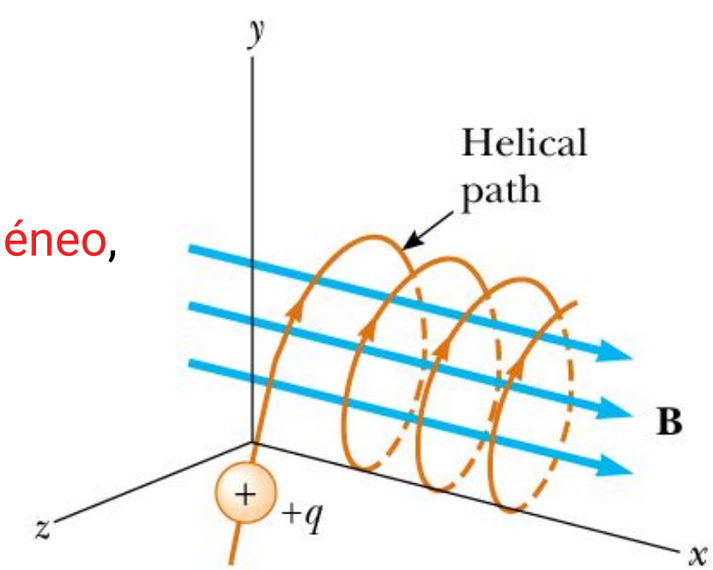
Partículas cargadas en un campo magnético

- *Ecuación de movimiento de una partícula cargada en un campo magnético:*

$$\boxed{\frac{d^2\vec{r}}{ds^2} = \frac{e}{p}\frac{d\vec{r}}{ds} \times \vec{B}}$$

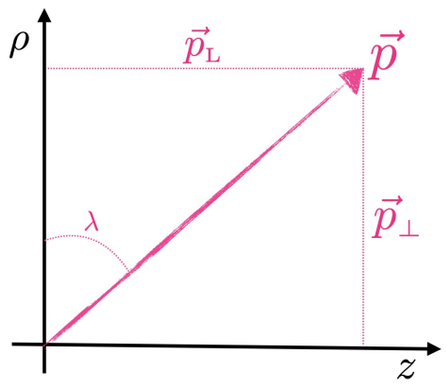
- En presencia de un campo magnético no homogéneo, $\vec{B}(s)$ varía a lo largo de la trayectoria. Para encontrar dicha trayectoria, $\vec{r}(s)$, tenemos que resolver la ecuación diferencial.

- En el caso de un campo magnético homogéneo, la trayectoria es dada por una hélice.



Partículas cargadas en un campo magnético

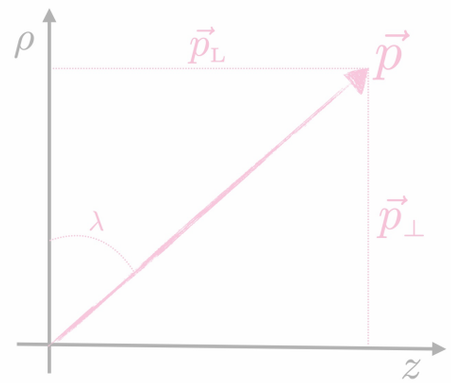
- Momento de la partícula se puede proyectar en dos direcciones:



$$p_{\perp} = p cos\lambda$$

Partículas cargadas en un campo magnético

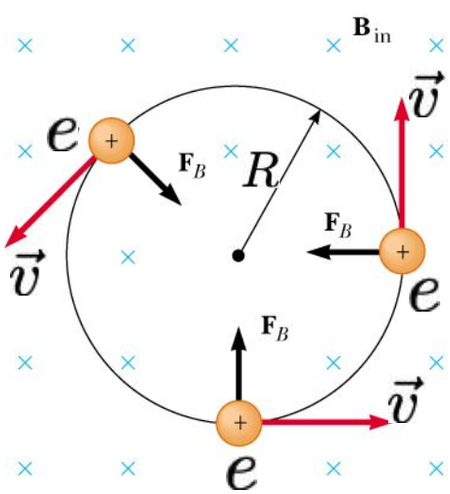
- Momento de la partícula se puede proyectar en dos direcciones:



$$p_\perp = p cos\lambda$$

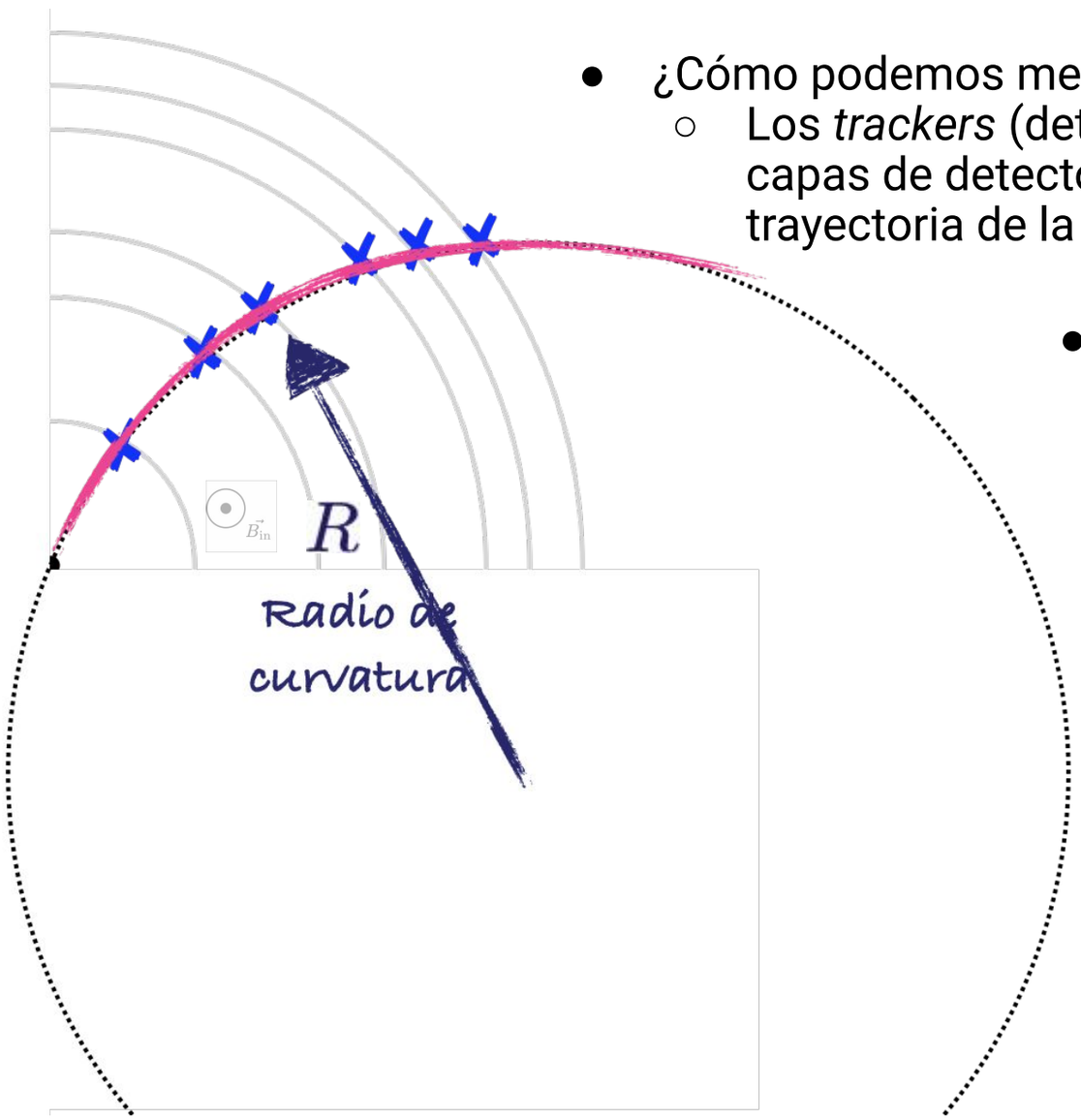
- Una partícula de carga e viajando de forma transversal al campo magnético con velocidad v, va a experimentar una fuerza Bev, perpendicular a su trayectoria de movimiento.

$$\vec{F}_B = e\vec{v} \times \vec{B}$$

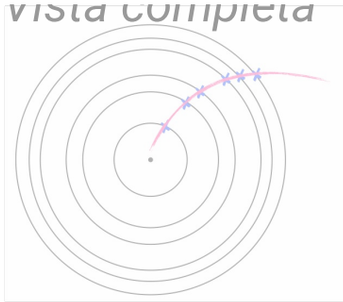


- La partícula seguirá una trayectoria circular de radio R.
- La aceleración de la partícula en esta trayectoria circular es: $a = v^2/R$
- El movimiento de la partícula puede ser descrito por: $$\boxed{Bev = \frac{mv^2}{R}}$$
- Y componente perpendicular del momento: $p_\perp = mv = (Be)R$
  - en unidades de física de partículas: $p = 0.3BR$ (p en [GeV/c]; B en [Tesla], Ren [metros])

Partículas cargadas en un campo magnético



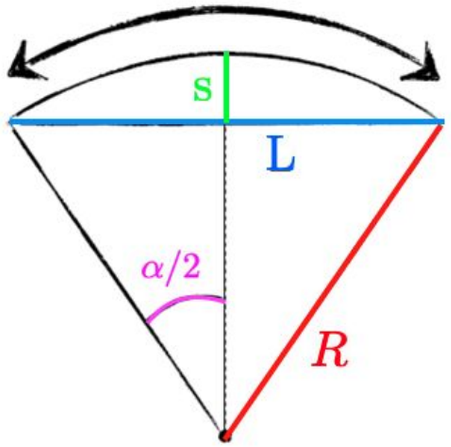
- ¿Cómo podemos medir la curvatura de la trayectoria?
  - Los *trackers* (detectores de trayectorias) están diseñados por capas de detectores/sensores sucesivos. Así podemos medir la trayectoria de la partícula en este detector.



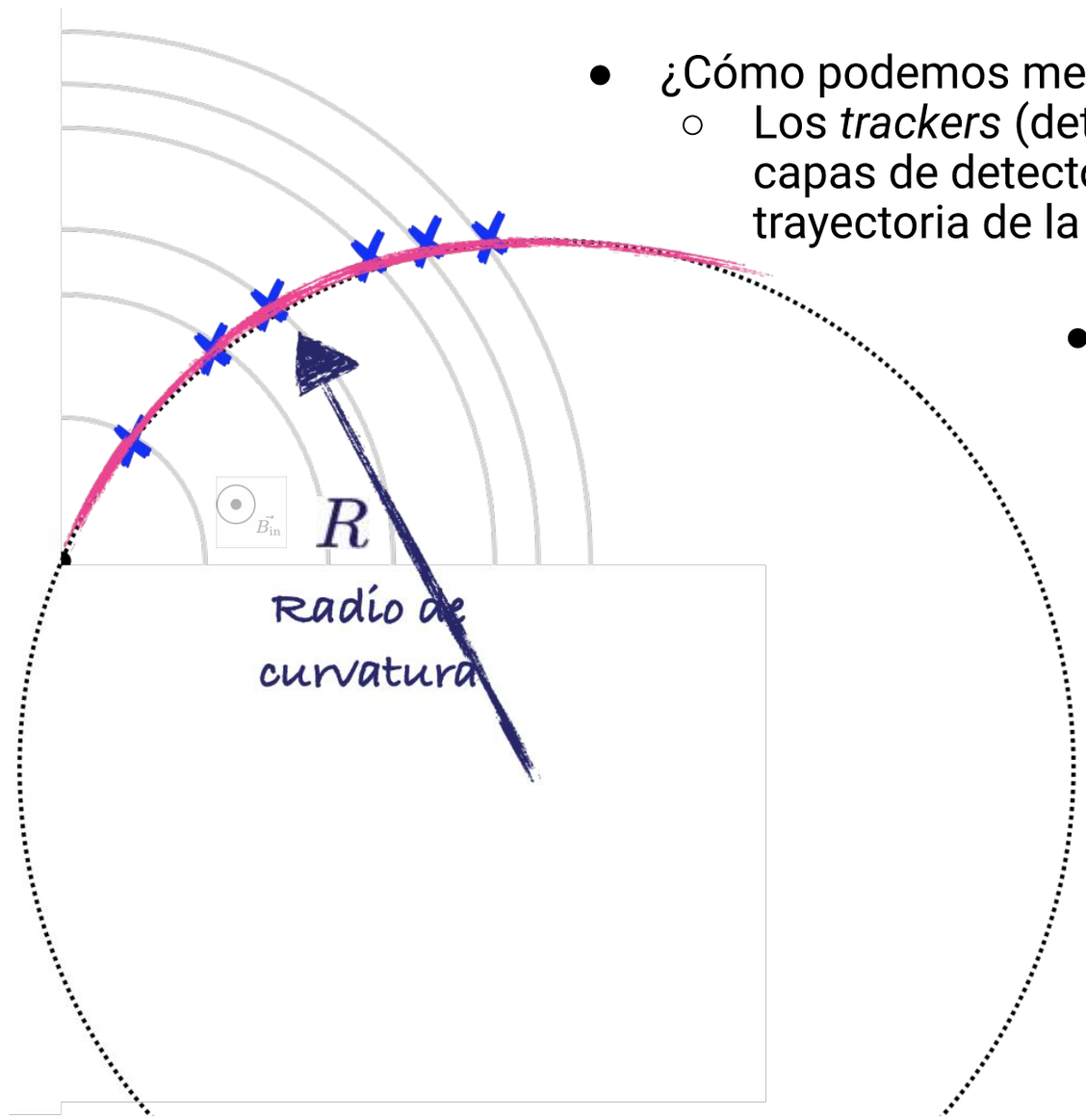
- Podemos medir la sagita, s, para calcular el radio R.

$$\cos(\alpha/2) = \frac{R-s}{R}$$

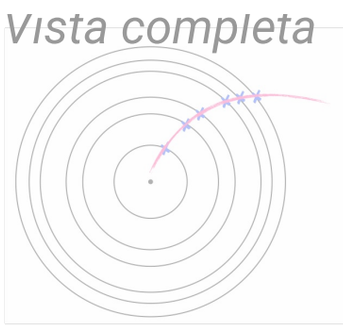
$$s = R - R\cos(\alpha/2)$$



Partículas cargadas en un campo magnético



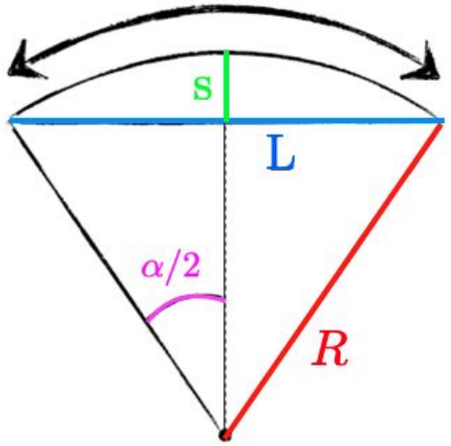
- ¿Cómo podemos medir la curvatura de la trayectoria?
  - Los *trackers* (detectores de trayectorias) están diseñados por capas de detectores/sensores sucesivos. Así podemos medir la trayectoria de la partícula en este detector.



- Podemos medir la sagita, s, para calcular el radio R.

$$\cos(\alpha/2) = \frac{R-s}{R}$$

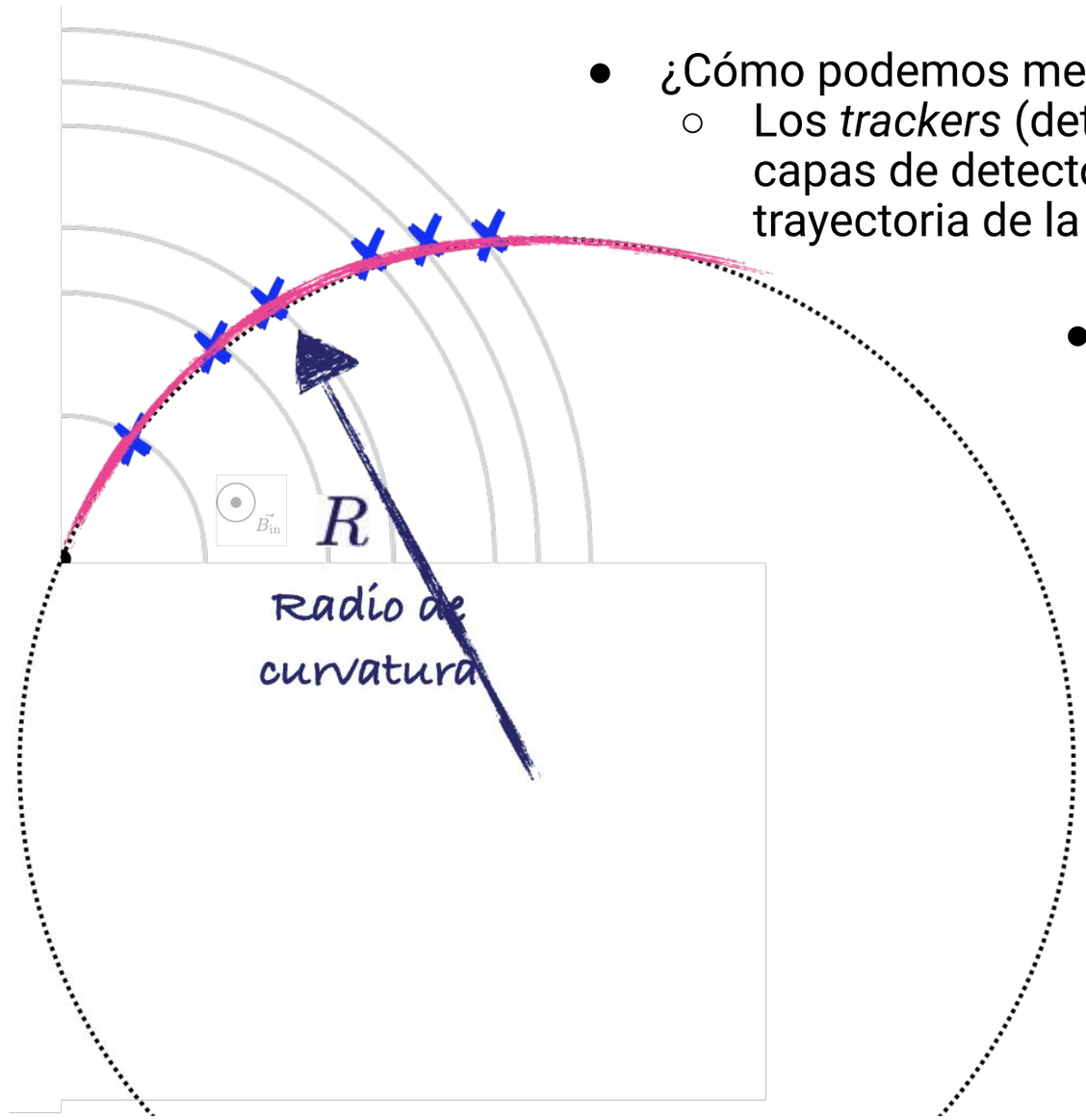
$$s = R - R\cos(\alpha/2)$$



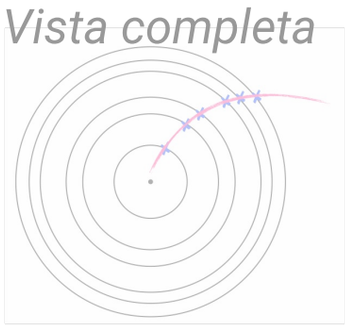
Para ángulos pequeños hacemos una expansión de series del coseno:

$$\cos(x) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \ldots$$

Partículas cargadas en un campo magnético



- ¿Cómo podemos medir la curvatura de la trayectoria?
  - Los *trackers* (detectores de trayectorias) están diseñados por capas de detectores/sensores sucesivos. Así podemos medir la trayectoria de la partícula en este detector.

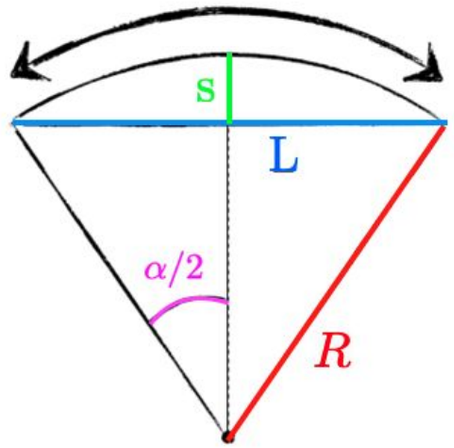


- Podemos medir la sagita, s, para calcular el radio R.

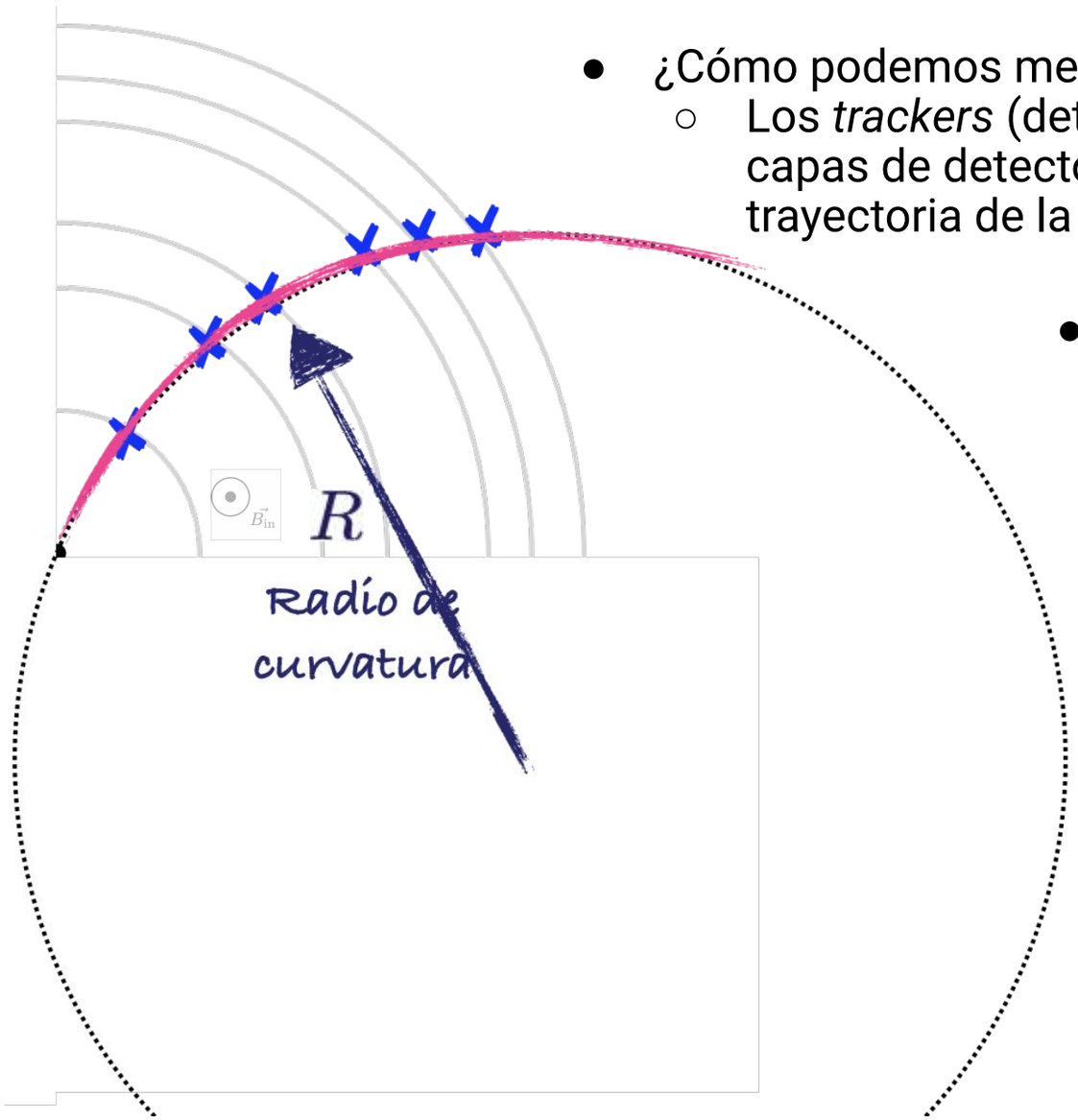
$$\cos(\alpha/2) = \frac{R-s}{R}$$

$$s = R - R\cos(\alpha/2) \approx R - R(1 - \frac{\alpha^2}{8})$$

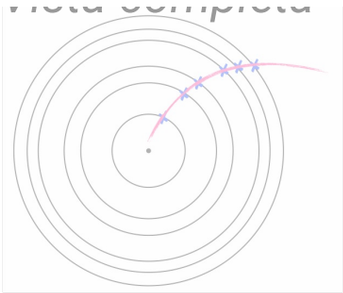
$$s \approx \frac{R\alpha^2}{8}$$



Partículas cargadas en un campo magnético



- ¿Cómo podemos medir la curvatura de la trayectoria?
  - Los *trackers* (detectores de trayectorias) están diseñados por capas de detectores/sensores sucesivos. Así podemos medir la trayectoria de la partícula en este detector.

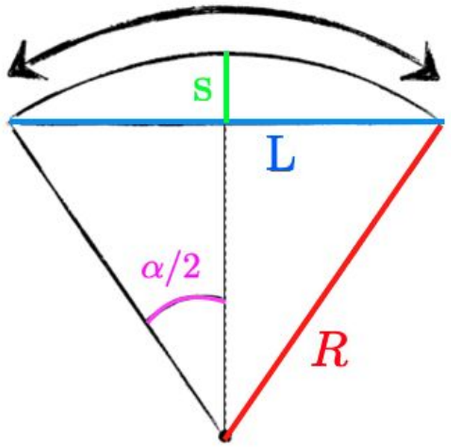


- Podemos medir la sagita, s, para calcular el radio R.

$$\cos(\alpha/2) = \frac{R-s}{R}$$

$$s = R - R\cos(\alpha/2) \approx R - R(1-\frac{\alpha^2}{8})$$

$$s \approx \frac{R\alpha^2}{8}$$

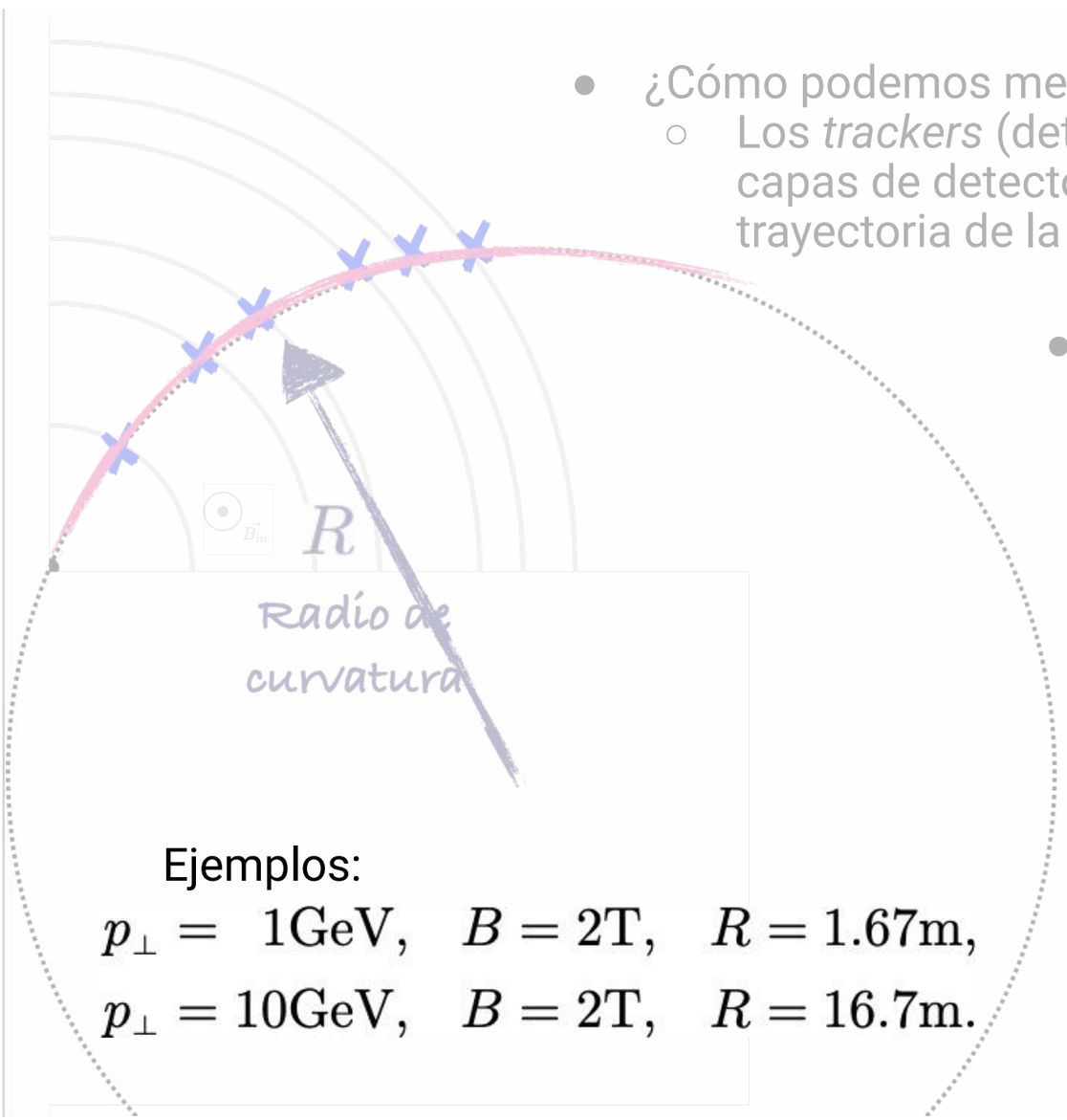


y usando: $\sin(\alpha/2) = \frac{(L/2)}{R}$, $\alpha \approx \frac{L}{R}$

$$s \approx \frac{L^2}{8R}$$

$$\boxed{R = \frac{L^2}{8s}}$$

Partículas cargadas en un campo magnético



Ejemplos:

$$p_\perp = \ \ 1\text{GeV}, \quad B = 2\text{T}, \quad R = 1.67\text{m},$$
$$p_\perp = 10\text{GeV}, \quad B = 2\text{T}, \quad R = 16.7\text{m}.$$

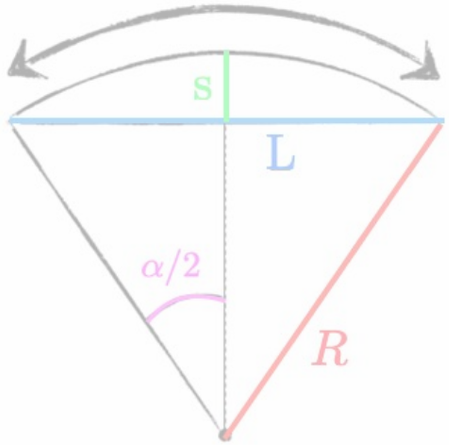
- ¿Cómo podemos medir la curvatura de la trayectoria?
  - Los *trackers* (detectores de trayectorias) están diseñados por capas de detectores/sensores sucesivos. Así podemos medir la trayectoria de la partícula en este detector.

- Podemos medir la sagita, s, para calcular el radio R.

$$\cos(\alpha/2) = \frac{R-s}{R}$$

$$s = R - R\cos(\alpha/2) \approx R - R(1 - \frac{\alpha^2}{8})$$

$$s \approx \frac{R\alpha^2}{8}$$



y usando: $\sin(\alpha/2) = \frac{(L/2)}{R}, \quad \alpha \approx \frac{L}{R}$

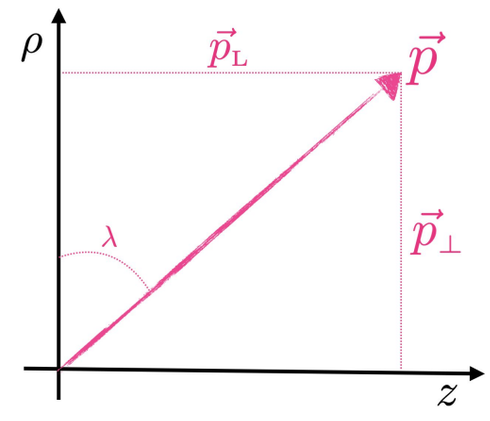
$$s \approx \frac{L^2}{8R}$$

$$\boxed{R = \frac{L^2}{8s}}$$

Partículas cargadas en un campo magnético

$$p_\perp = (Be)R$$

$$R = \frac{L^2}{8s}$$



$$p_\perp = p cos\lambda$$

Momento total:

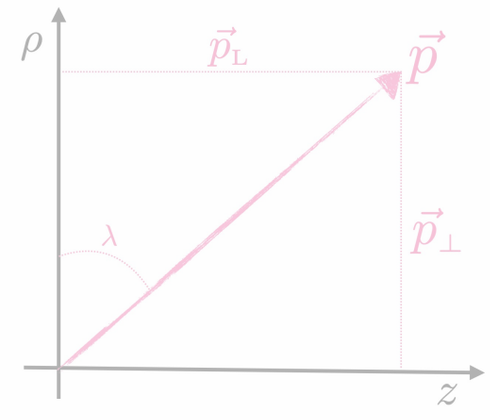
$$p = \frac{p_\perp}{\cos\lambda} = \frac{(Be)R}{\cos\lambda}$$

$$p[\mathrm{GeV/c}] = \frac{0.3BR}{\cos\lambda}$$

Partículas cargadas en un campo magnético

$$p_\perp = (Be)R$$

$$R = \frac{L^2}{8s}$$



$$p_\perp = p cos\lambda$$

Momento total:

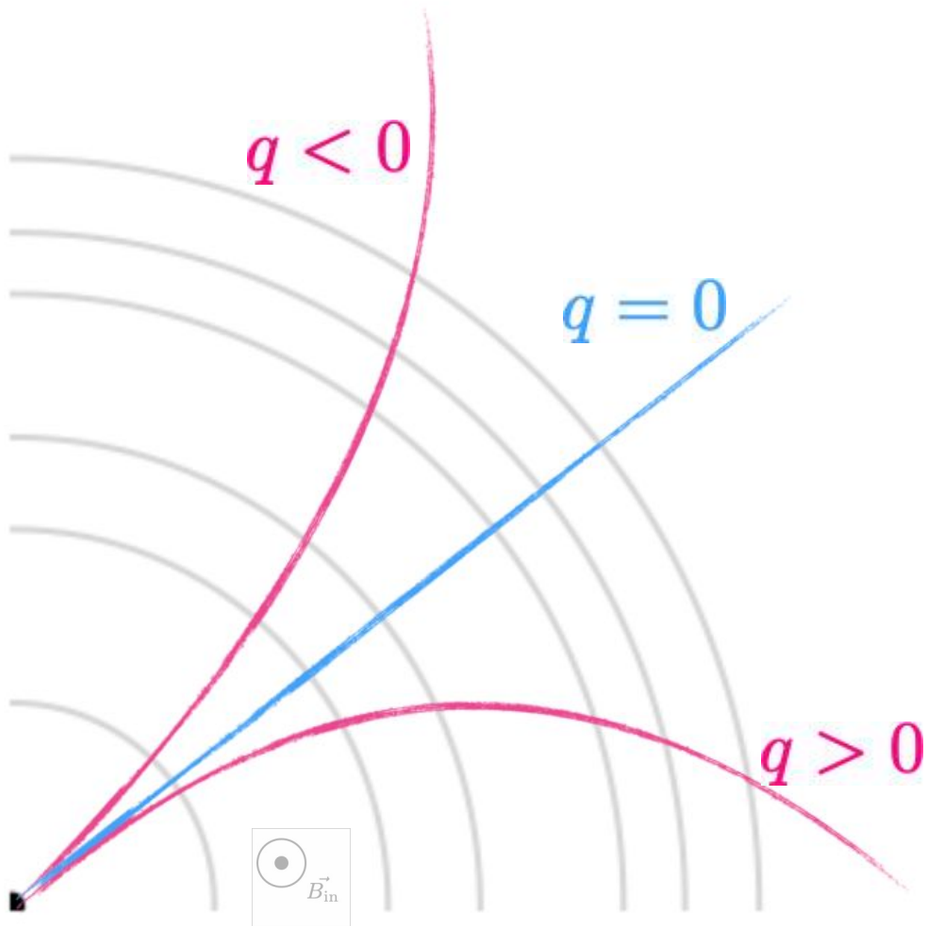
$$p = \frac{p_\perp}{\cos\lambda} = \frac{(Be)R}{\cos\lambda}$$

$$p[\mathrm{GeV/c}] = \frac{0.3BR}{\cos\lambda}$$

¿**Incertidumbre** en la medición del momento?

- Error en la medición del radio de curvatura (R): $\frac{\Delta p}{p} \propto \frac{\Delta R}{R} = \frac{L^2}{8s} \cdot \frac{\Delta s}{s}$
- Error en la medición del ángulo en el plano ρz (λ): $\frac{\Delta p}{p} \propto \tan\lambda \ \Delta\lambda$
- Contribución de la dispersión múltiple (*multiple scattering*). $\left(\frac{\sigma_p}{p^2}\right)^2 = \mathrm{const.}\left(\frac{p_T}{BL^2}\right)^2 + \mathrm{const.}\left(\frac{1}{B\sqrt{LX_0}}\right)^2$

Carga de la partícula

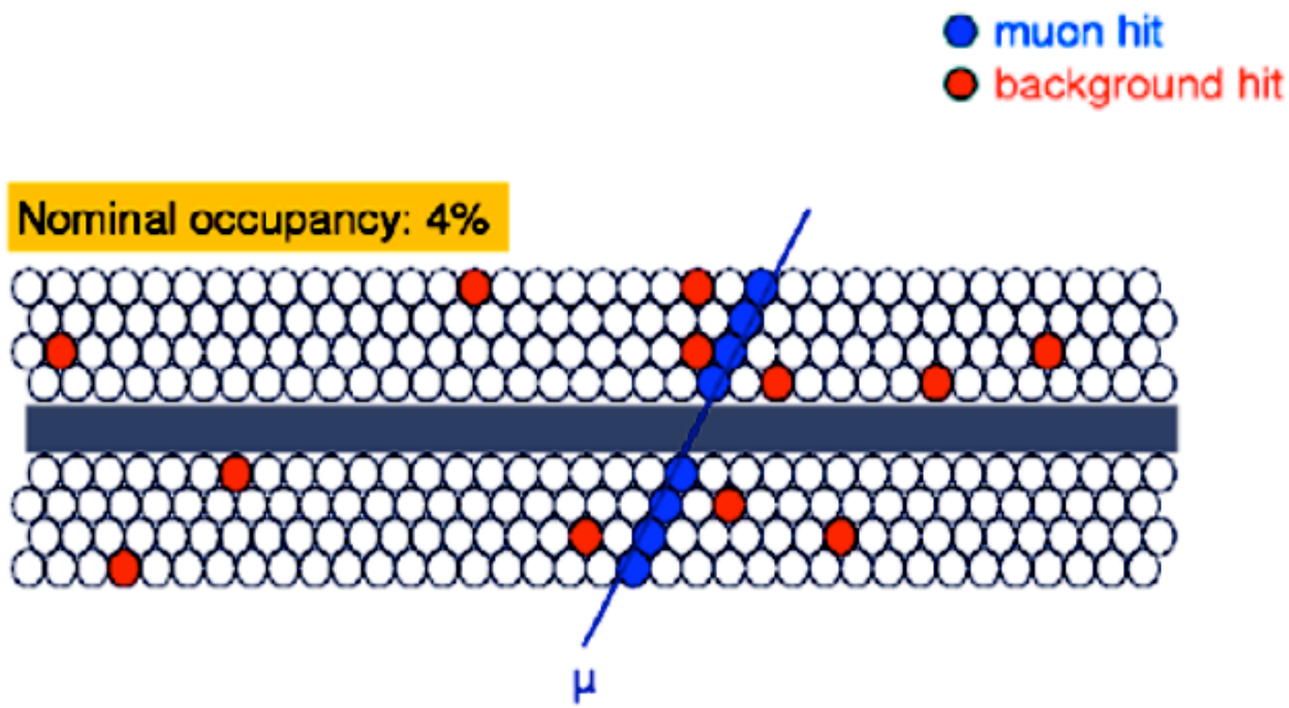


- El sentido de la curvatura de la partícula (R) en el campo magnético nos permite conocer la carga de la partícula.

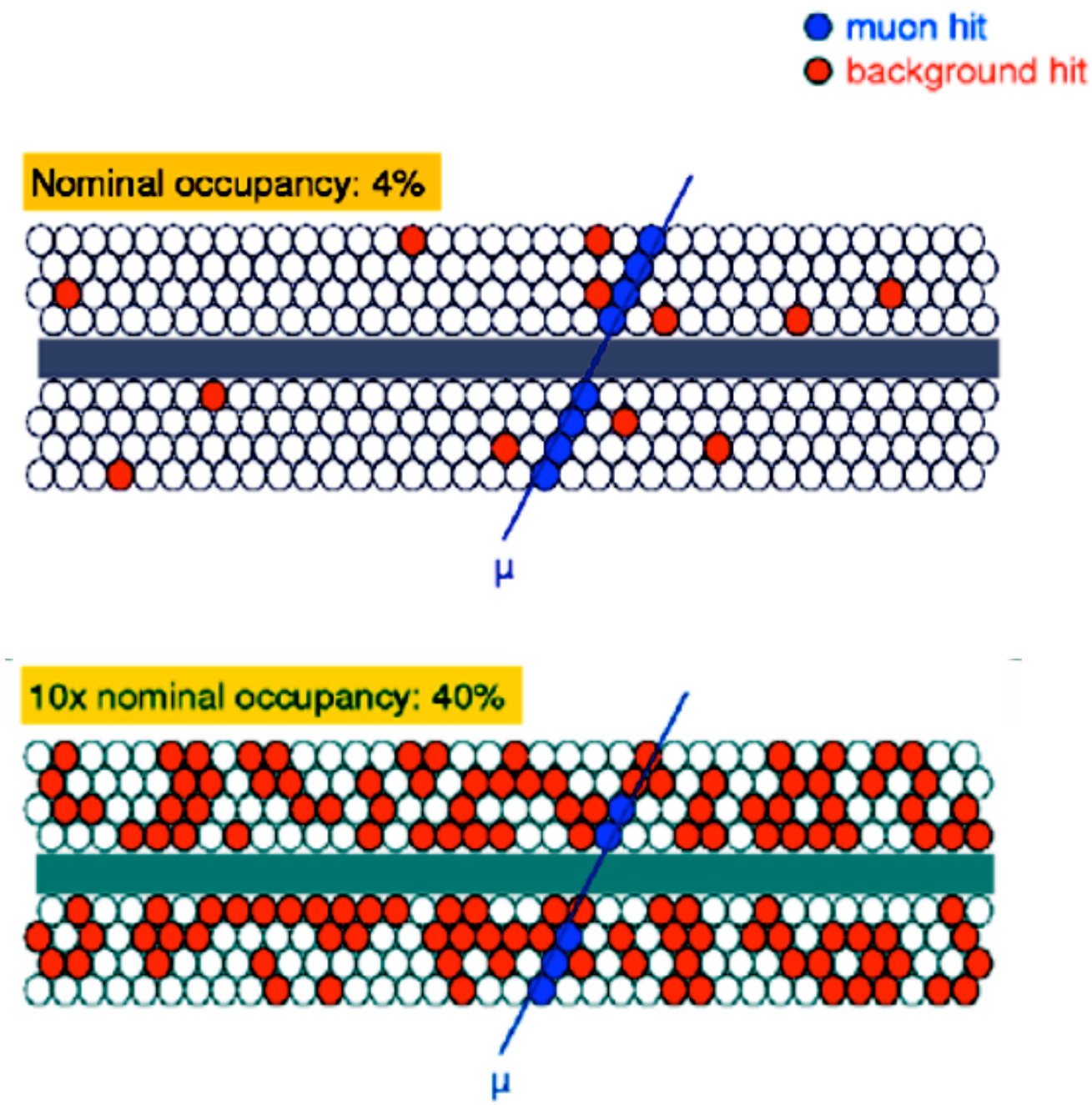
$$q > 0 \qquad \frac{1}{R} > 0 \qquad\qquad q < 0 \qquad \frac{1}{R} < 0$$

- Conforme el momento aumenta, la trayectoria se acerca a una línea recta, lo que hace más difícil esta medición.

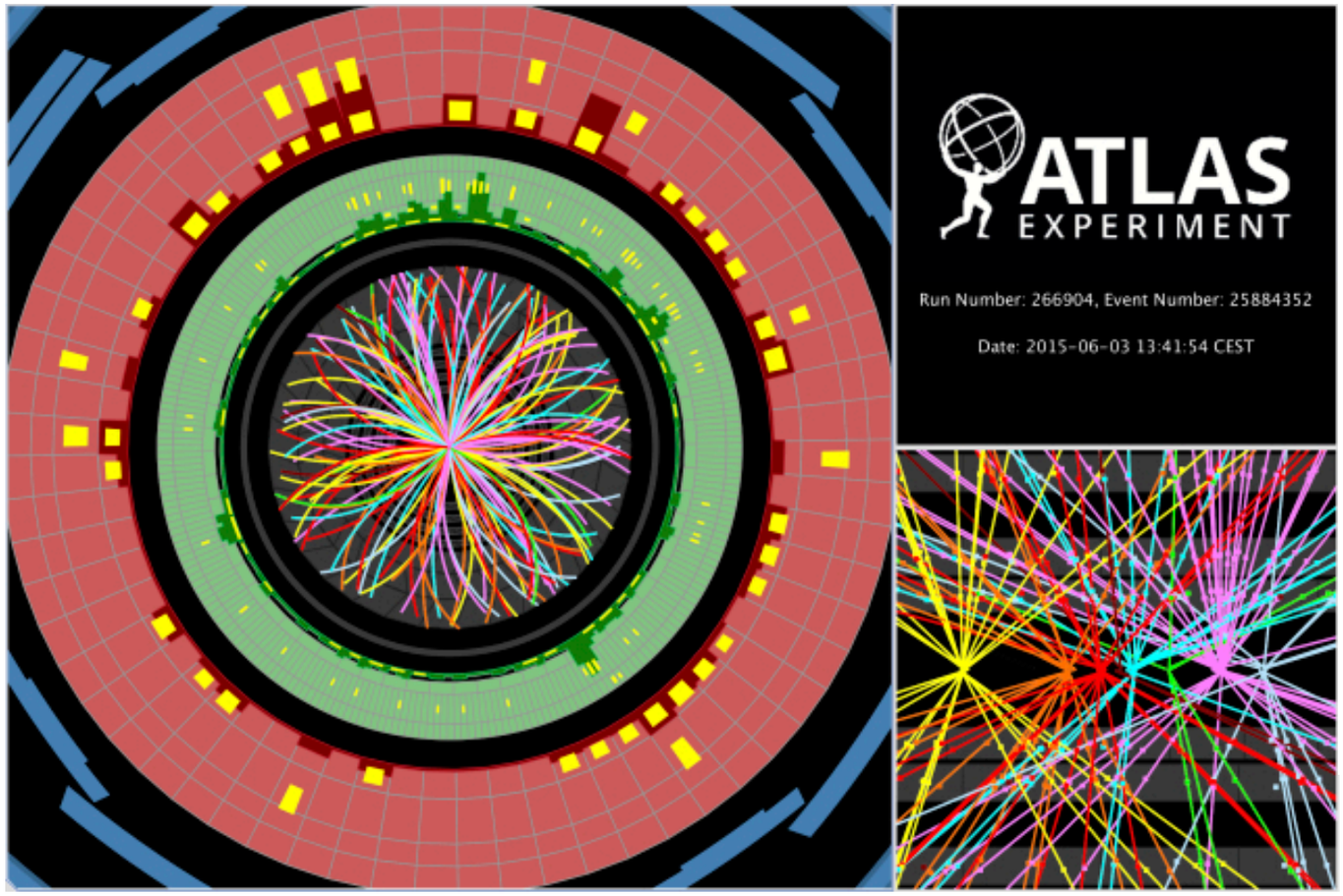
Granularidad

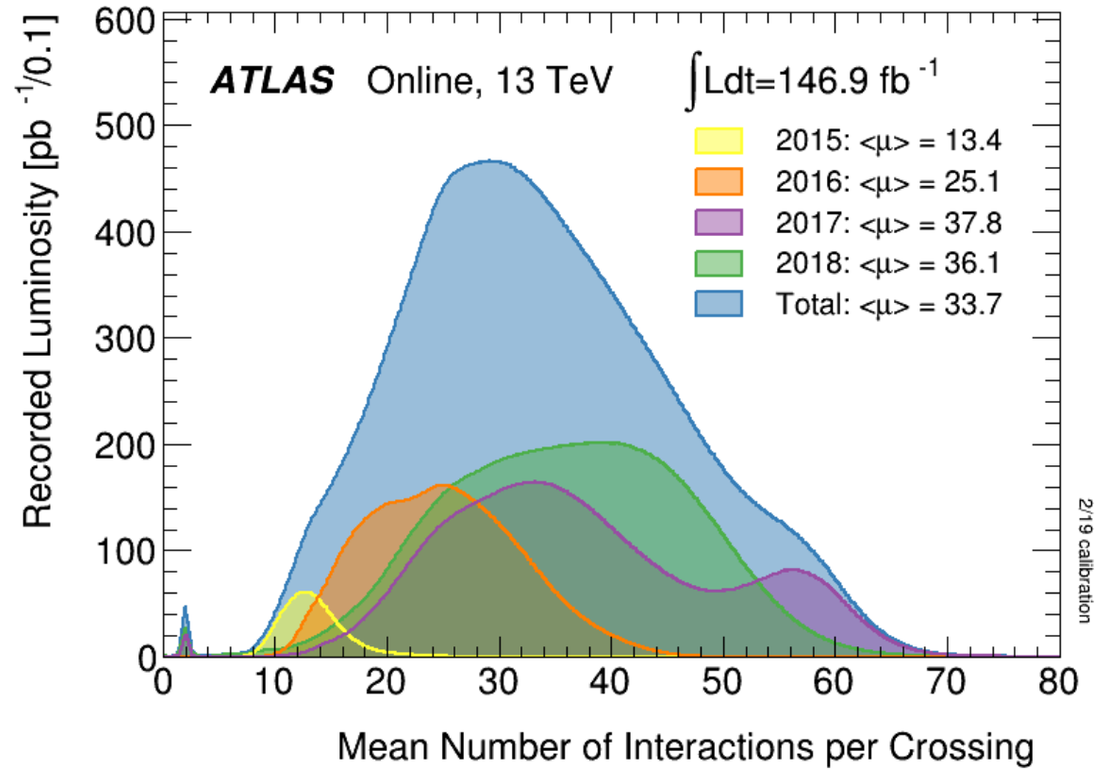


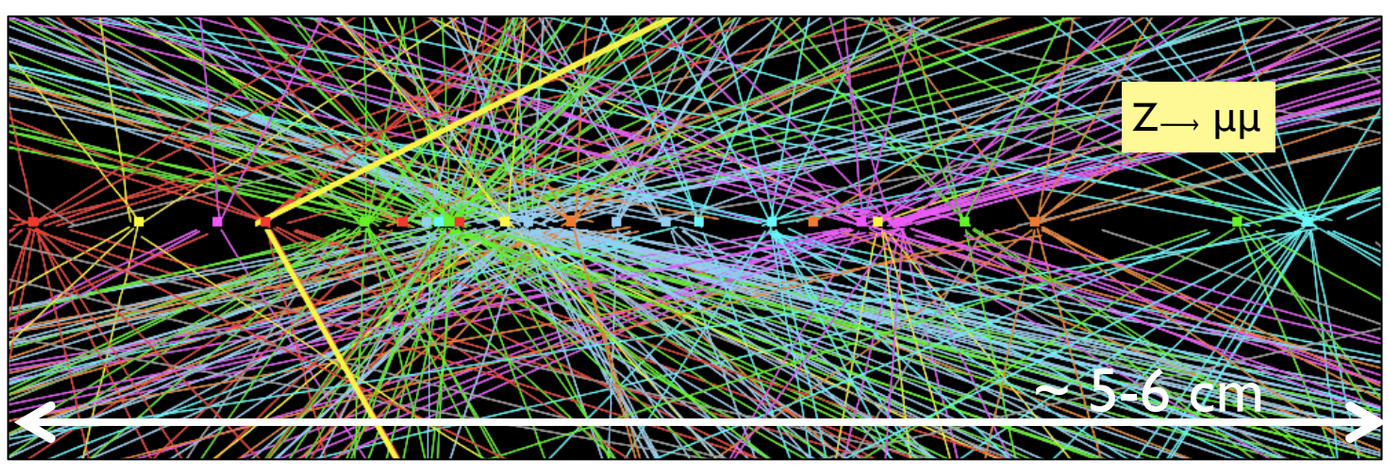
Granularidad



Un evento de datos







Z⟶ μμ event from 2012 data with 25 reconstructed vertices

Retos para tracking

Retos para los detectores de trayectorias:

- Tolerancia a la radiación.
  - Entre más cercana al punto colisión, mayor la radiación que recibe el detector.
  - Dicha radiación puede mover los átomos del silicio, creando estructuras de banda muy complejas.

- Tiempo de respuesta (necesitamos detectores *rápidos*).

- Cantidad de calor que pueden soportar los detectores.

- Reducir la influencia del detector en la trayectoria de las partículas: reducir los efectos de la dispersión múltiple.

- Costos.
  - El costo de detectores de silicio es prohibitivo para cubrir detectores de mucha área. En este caso detectores de gas son una mejor alternativa.

Retos para tracking

Retos para los algoritmos de reconstrucción de trayectorias:

- Las partículas que intentamos reconstruir tienen un amplio rango de momento: desde MeV hasta TeV.

- El número de trayectorias que se deben reconstruir es bastante alto.
    - Alto número de puntos de interacción por colisión.
    - Esto también influye en el diseño del detector (¿más o menos granularidad?).

- Tomar en cuenta el efecto de dispersión múltiple.

- Los detectores usualmente combinan diferentes tipos de tecnología (resoluciones).
    - El software debe ser capaz de combinarlas.

- Idealmente, se debe poder utilizar la información de los detectores de tracking para el sistema de trigger.

Conclusiones

- Muchas tecnologías de detectores gaseosos disponibles con características diferentes

- No hay una tecnología optima para todos los problemas de detección, al momento de construir un detector tenemos que considerar:
  - El tipo de particula
  - La frecuencia de medida
  - El tiempo de respuesta deseado del detector
  - La precision deseada de la medida
  - Costo

- Una vez tenemos hits en el detector, podemos usar algoritmos de tracking para inferir por donde la partícula pasó y utilizar esa información para inferir, la carga, y el momento de la partícula

- Tracking en un medio denso con muchos hits, es un problema de combinatoria complicado! Cada vez algoritmos mas sofisticados, incluyendo inteligencia artificial son usados para resolver estos problemas!

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)

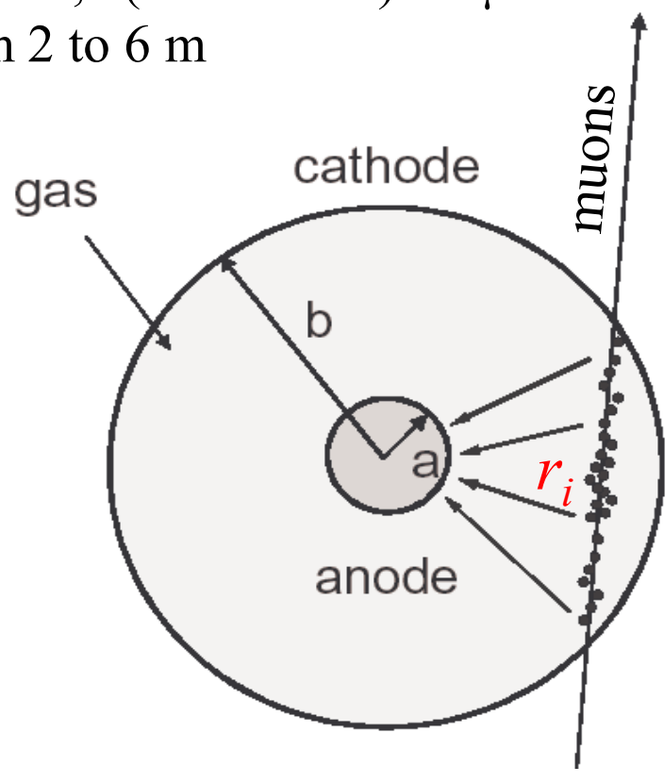
Referencias

- Algunos libros:
  - D. Green. The physics of particle detectors. Cambridge University Press.
  - C. Grupen, B. Scwartz. Particle Detectors. Cambridge University Press.
  - C. Leroy, P. Rancoita. Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection. World Scientific.
  - K. Kleinknecht, Detectors for particle radiation. Cambridge University Press.

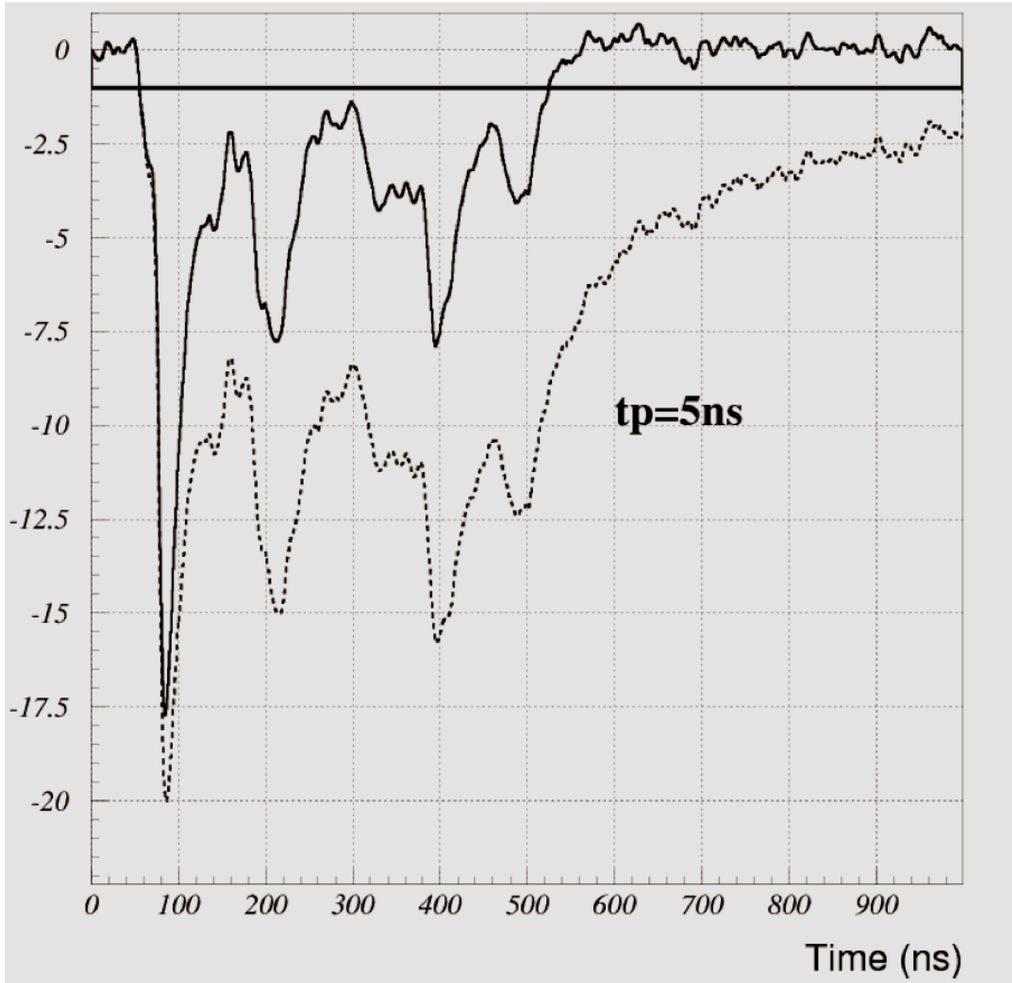
- Otras referencias electrónicas (de las cuales tomé mucho material):
  - Tracking. LA-CoNGA physics 2021. Arelys Cortez
  - Tracking. Esipap. Jérôme Baudot.
  - CEVALE2VE. Tracking and Vertexing. R. Camacho Toro.
  - 2012 Joint Fermilab-CERN Hadron Collider Physics Summer School.

Un ejemplo: Los tubos de deriva de ATLAS

b=15 mm, a(anode wire)=50μm
L from 2 to 6 m



Arrival time fluctuation of each e- cluster on the anode wire

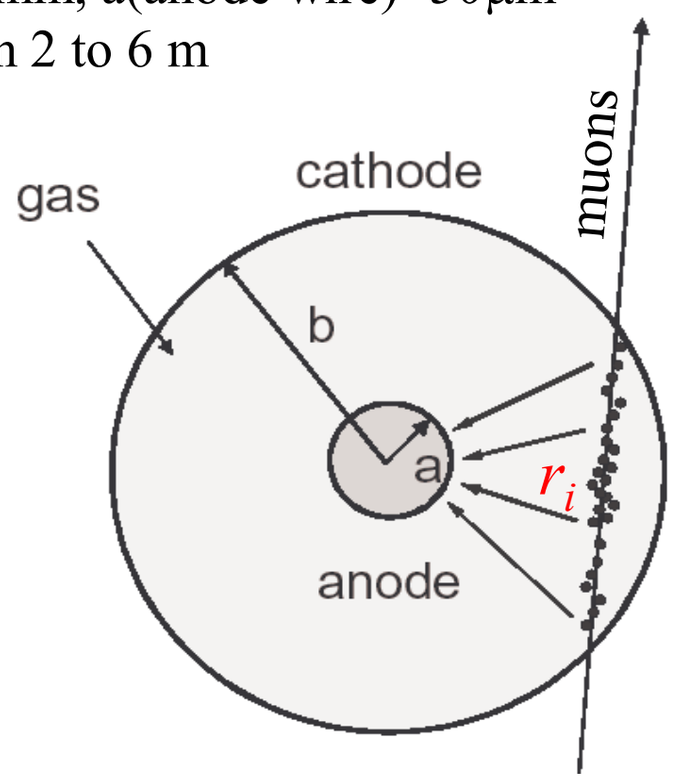


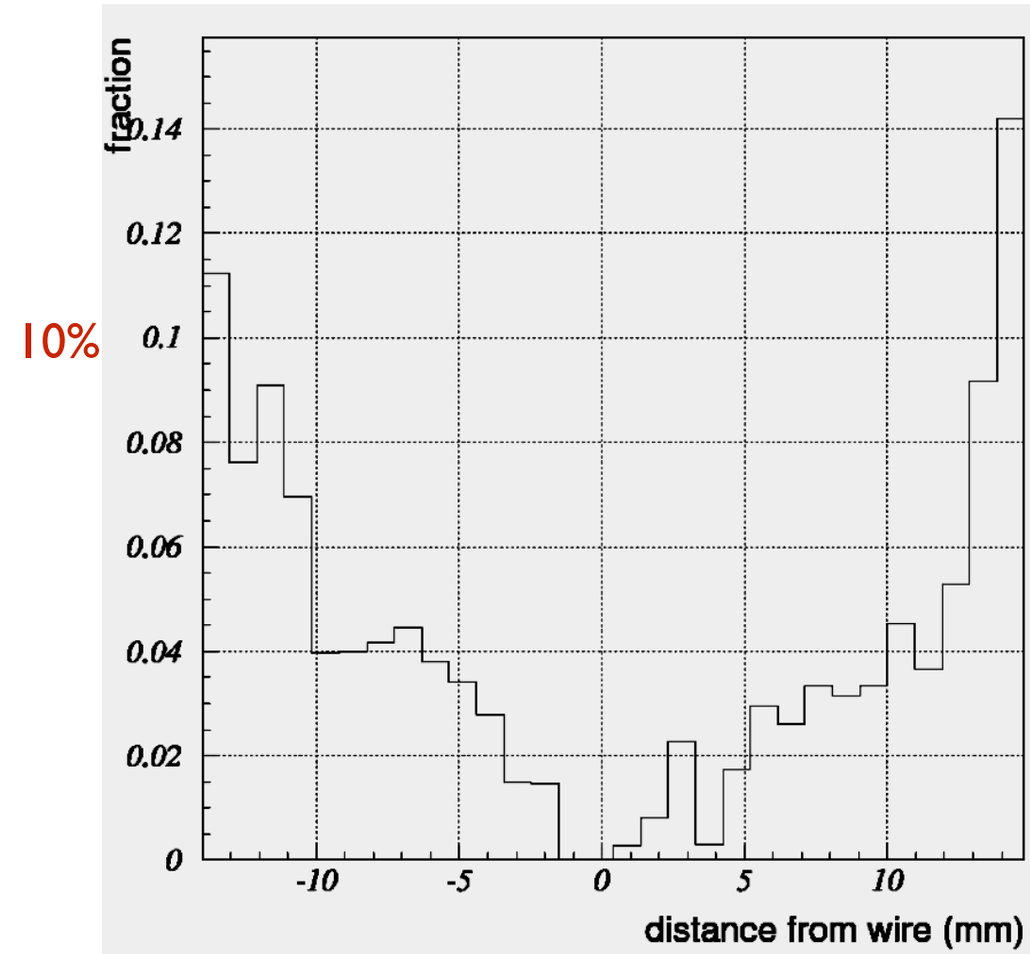
<u>ATLAS Monitored Drift Tube characteristics :</u>

- $Ar:CO_2$ 93:7
- p = 3 bar => ~3×100 pairs/cm (n_{Total})
- V ~ 3000 V (2.10^5 V/cm)
- Gain: 2.10^4
- Max drift time of e- : 700 ns
- Centring of wire < 100μm all along the tube (20μm at the end-plug)

Un ejemplo: Los tubos de deriva de ATLAS

b=15 mm, a(anode wire)=50µm
L from 2 to 6 m





Inefficiency = f(radius)
close to tube walls, because of small signal
Remark: bad resolution for tracks centered on the wire

ATLAS Monitored Drift Tube characteristics :

- $Ar:CO_2$ 93:7
- p = 3 bar => ~3×100 pairs/cm (n_{Total})
- V ~ 3000 V (2.10^5 V/cm)
- Gain: 2.10^4
- Max drift time of e- : 700 ns
- Centring of wire < 100µm all along the tube (20µm at the end-plug)

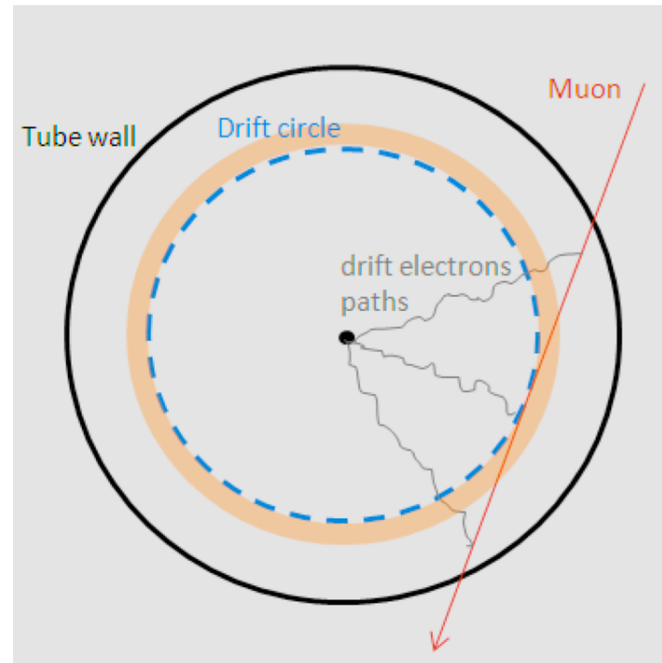
Resumen

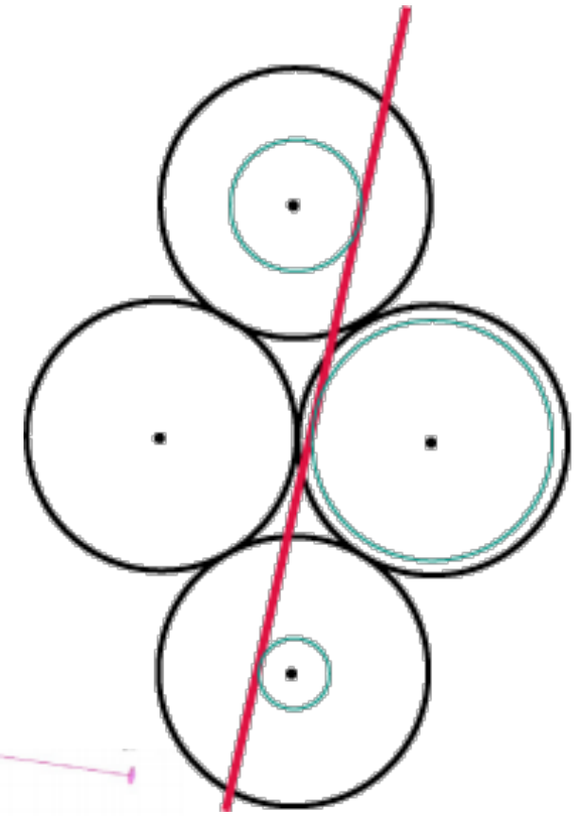
Hemos visto :

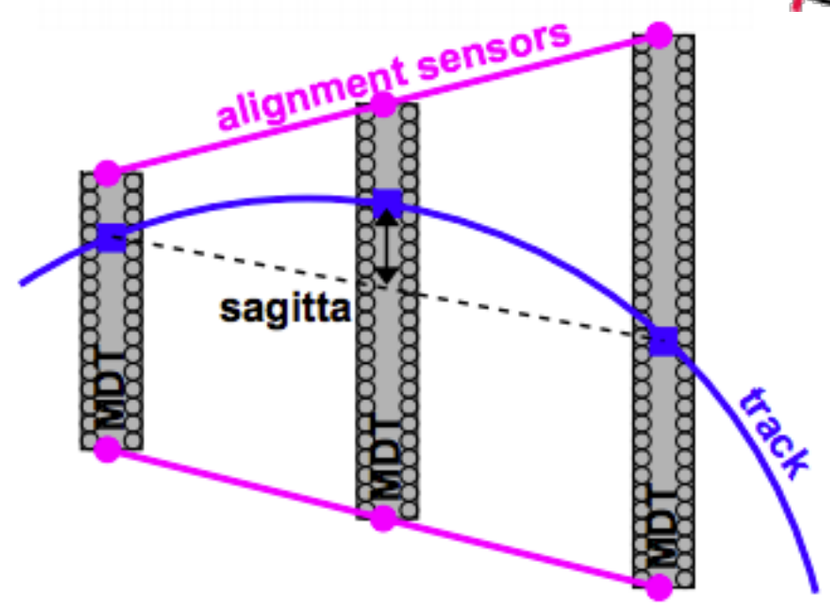
- Formación y detección de la señal.
- El transporte de electrones e iones en el gas (La velocidad de los electrones ~100 a ~1000× la velocidad de los iones).
- La avalancha y la multiplicación de la señal
- Las condiciones de trabajo de una cámara de ionización van desde el modo proporcional, luego 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 MicroMegas)
- No existe un único detector (gaseoso) universal. Es necesario probar el detector, también simularlo, en condiciones reales para entender/optimizar las condiciones de trabajo.

Reconstrución de trazas

- Tubos de deriva apilados sirven para medir el tiempo de llegada del pulso de ionización
- Se reconstruye el punto por donde pasó la traza usando las tangentes a los círculos
- Resolución σ ~ 80 μm / tubo → mejora al combinar tubos de una cámara ~50μm localmente
- Las trazas se detectan en tres cámaras MDT igualmente espaciadas
- El momento de la traza (= curvatura en el campo magnético) se deriva de una medición de 3 puntos
- La desviación de la rectitud (sagitta, s) es directamente proporcional al momento, p: $s \propto 1/p$







Detectores gaseosos en el LHC

- Los experimentos del LHC utilizan detectores de gas principalmente para los detectores de muones a gran escala (ejemplo las cámaras MDT)
- Aunque los principales elementos de detección son bastante tradicionales, muchos aspectos han mejorado de forma espectacular:
  - Electrónica de lectura (integración, resistencia a la radiación)
  - Excelente comprensión y optimización de los efectos físicos del detector (HEED, MAGBOLTZ, GARFIELD)
  - Mejora de las características de envejecimiento gracias a los gases especiales