

# Tracking

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



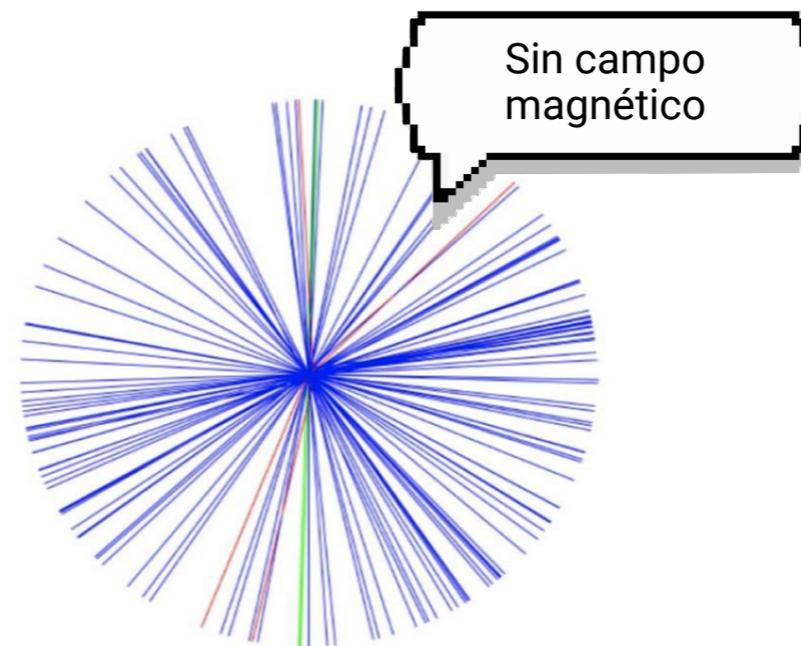
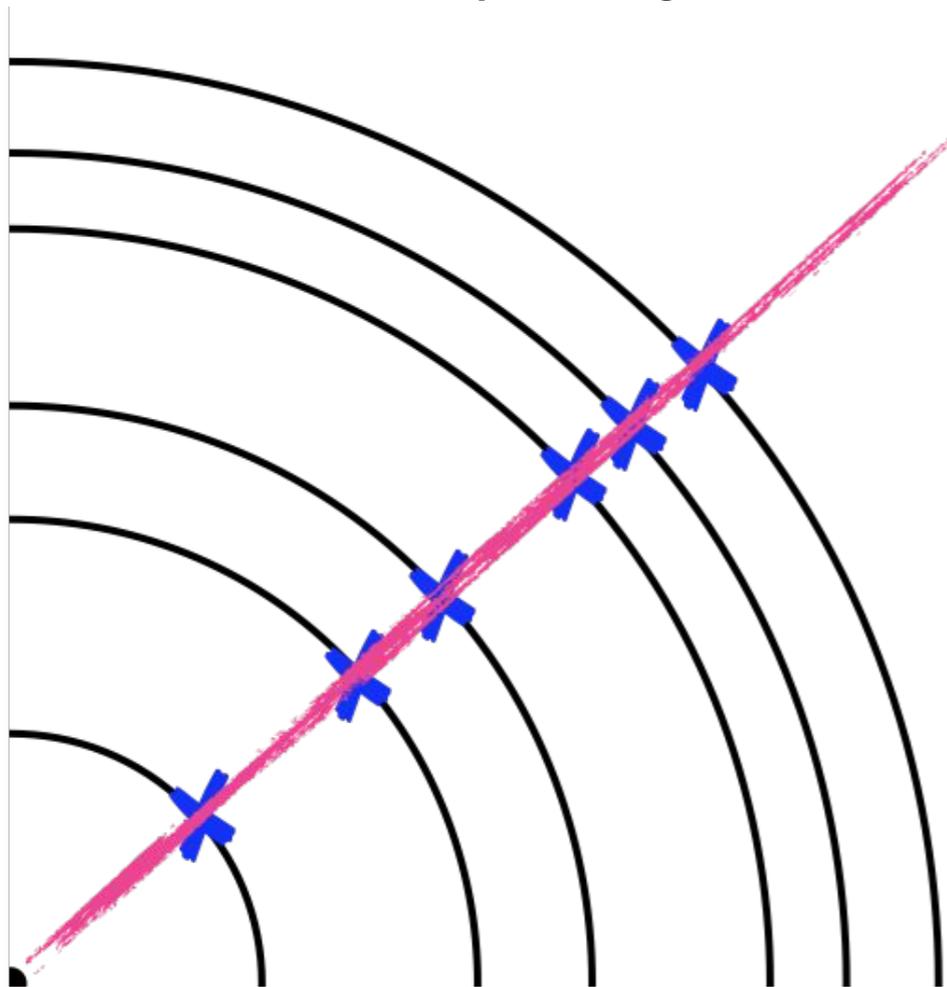


¿Cómo identificamos partículas, medimos su carga y momentum usando trazas?



# Partículas cargadas

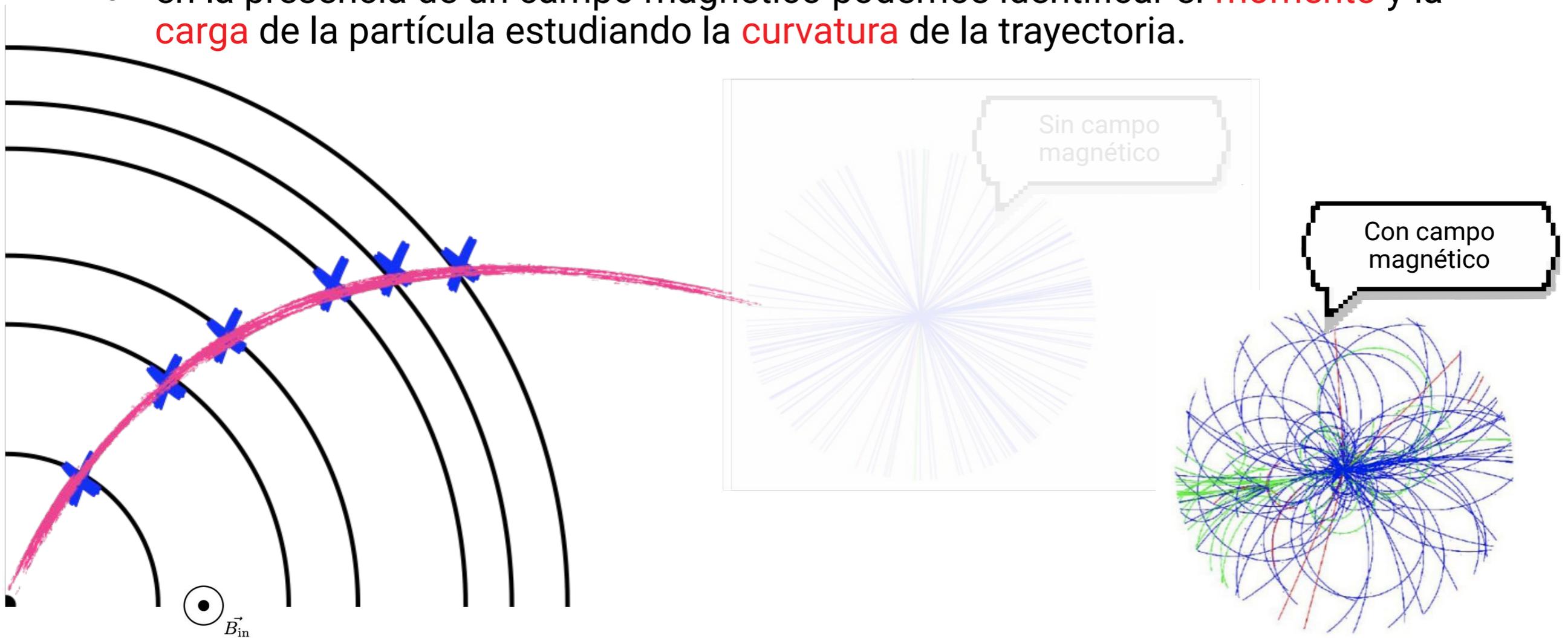
- Partículas cargadas atravesando un detector de ionización.
  - sin campo magnético.





# 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**.

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

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

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

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

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

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

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



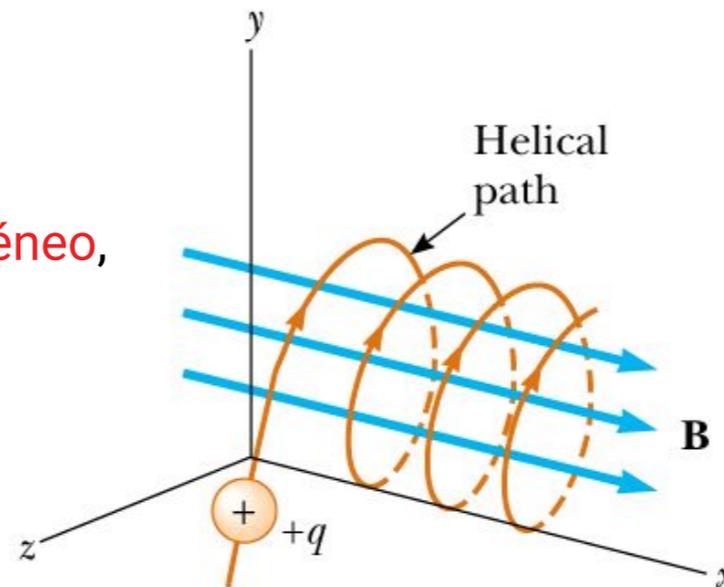
# Partículas cargadas en un campo magnético

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

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

- 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.

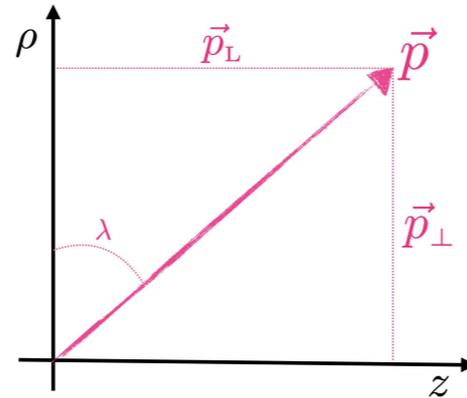
- En el caso de un campo magnético **homogéneo**, la trayectoria es dada por una hélice.





# Partículas cargadas en un campo magnético

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

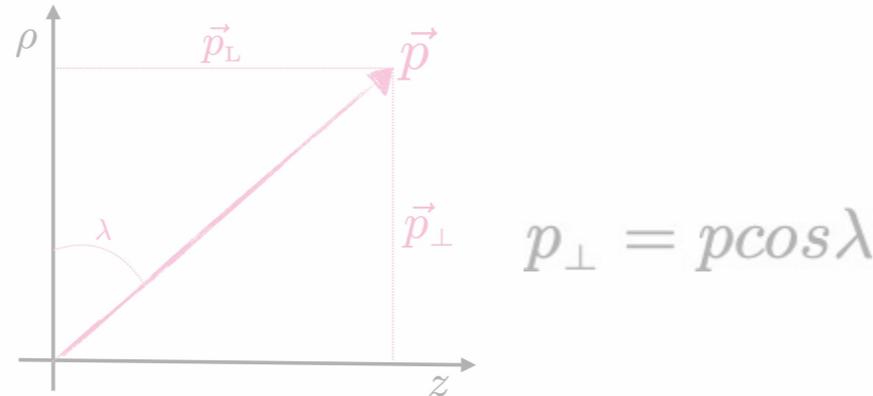


$$p_{\perp} = p \cos \lambda$$



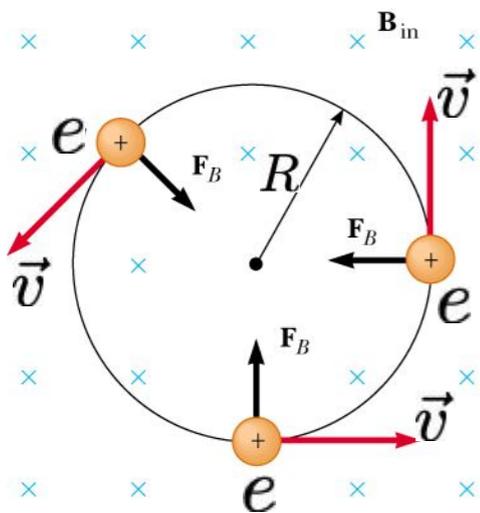
# Partículas cargadas en un campo magnético

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



- 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.

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

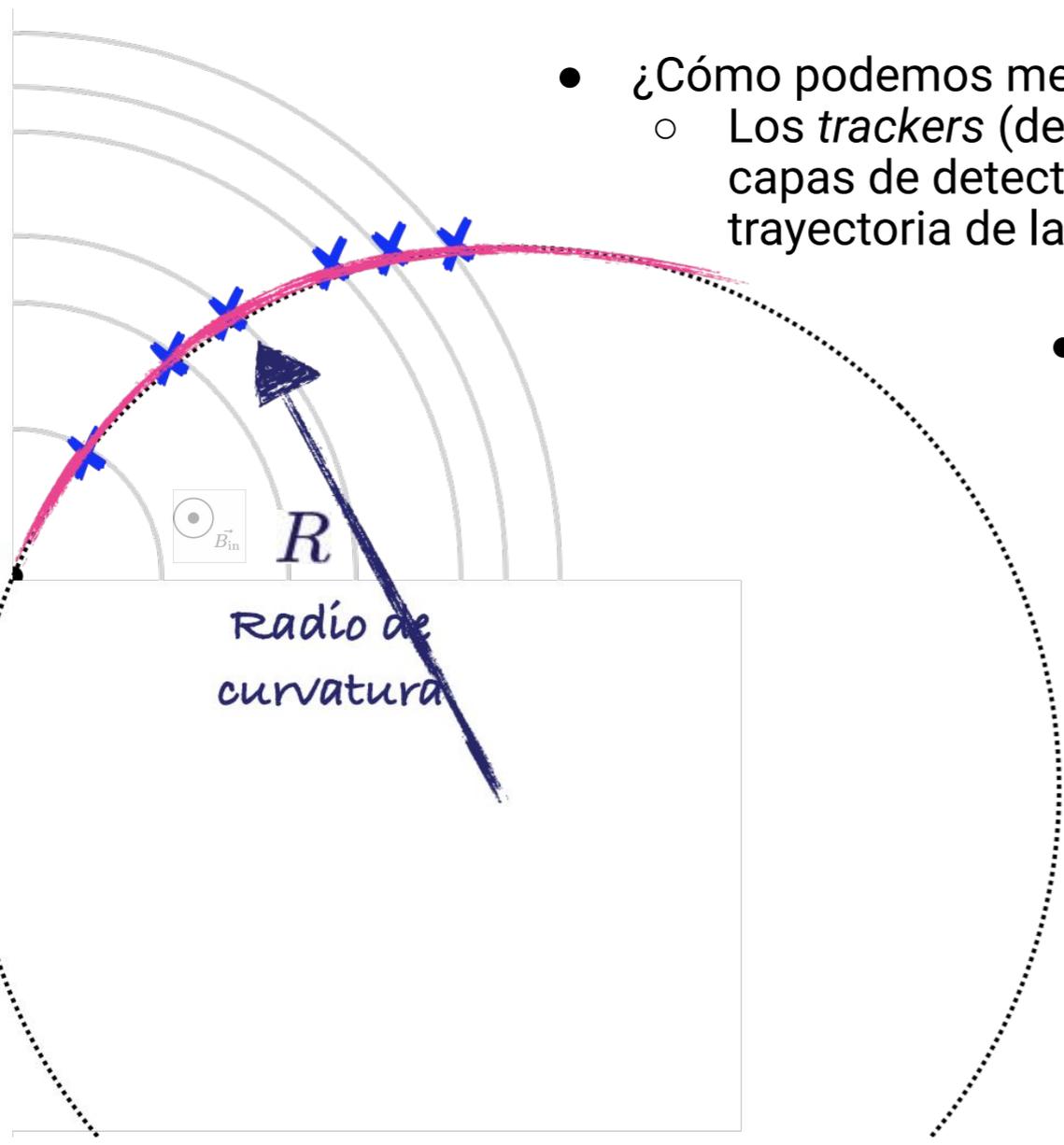
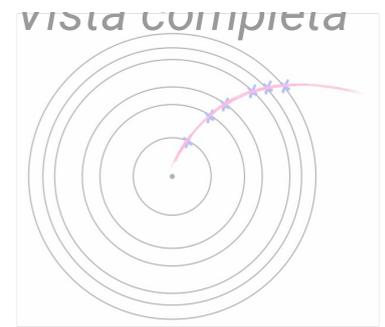


- La partícula seguirá una trayectoria circular de radio  $R$ .
- La aceleración de la partícula en esta trayectoria circular es:  $a = v^2/R$
- El movimiento de la partícula puede ser descrito por:  $Bev = \frac{mv^2}{R}$
- Y componente perpendicular del momento:  $p_{\perp} = mv = (Be)R$ 
  - en unidades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



# Partículas cargadas en un campo magnético

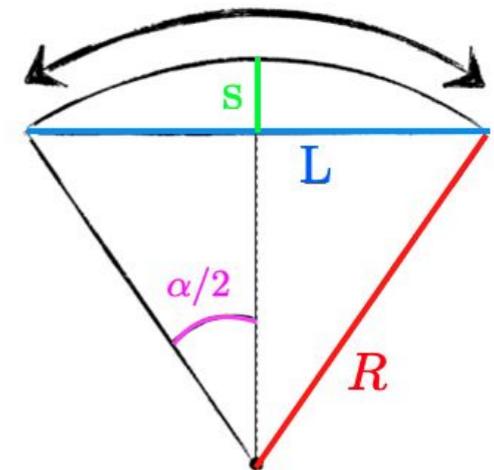
- ¿Cómo podemos medir la curvatura de la trayectoria?
  - Los *trackers* (detectores de trayectorias) están diseñados por capas de detectores/sensores sucesivos. Así podemos medir la trayectoria de la partícula en este detector.



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

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

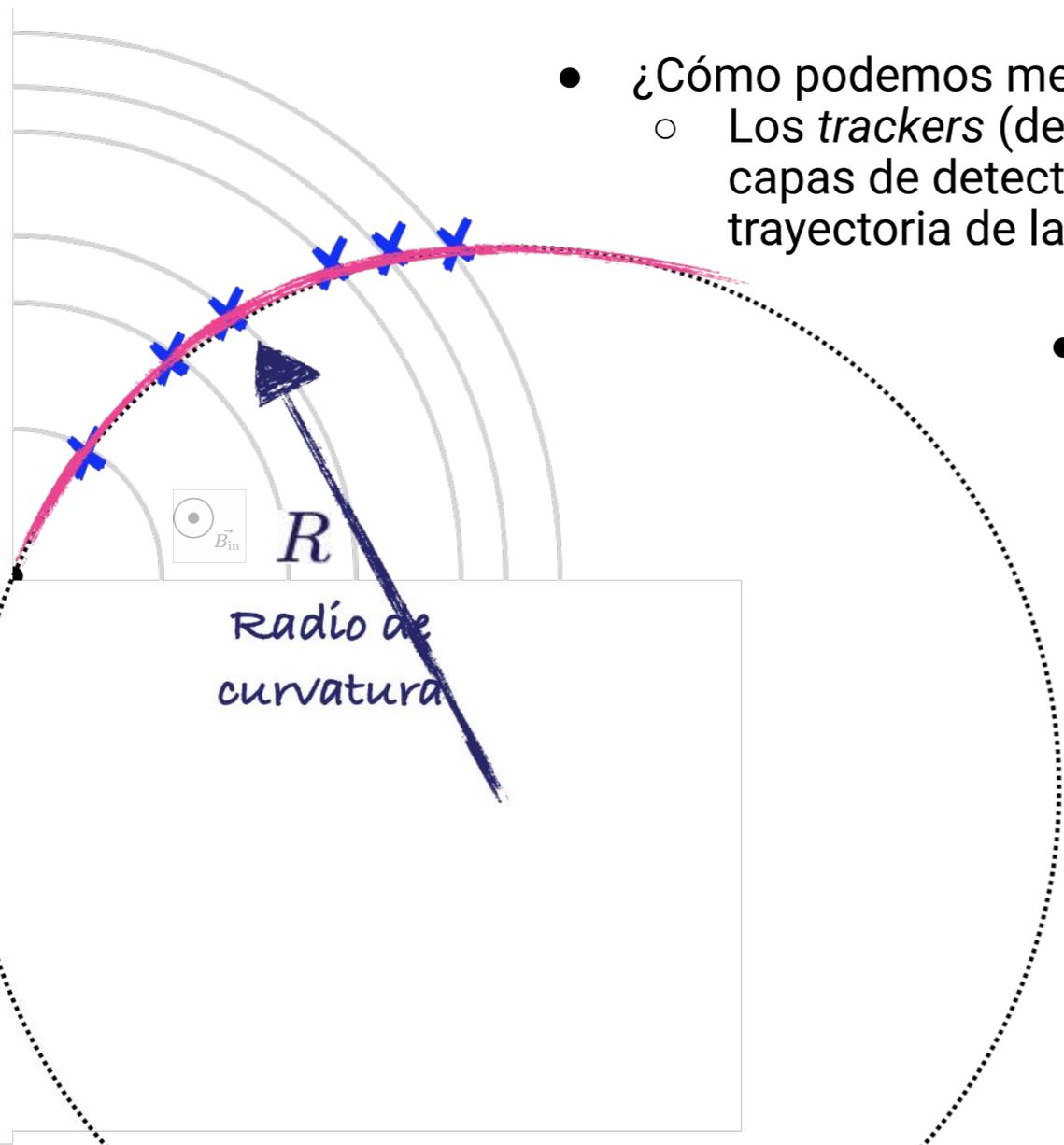
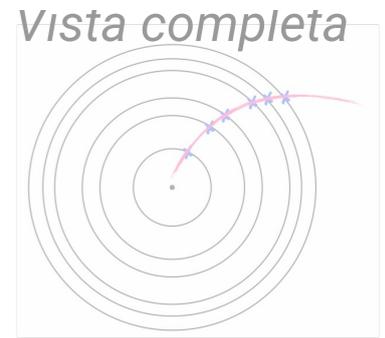
$$s = R - R \cos(\alpha/2)$$





# 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.



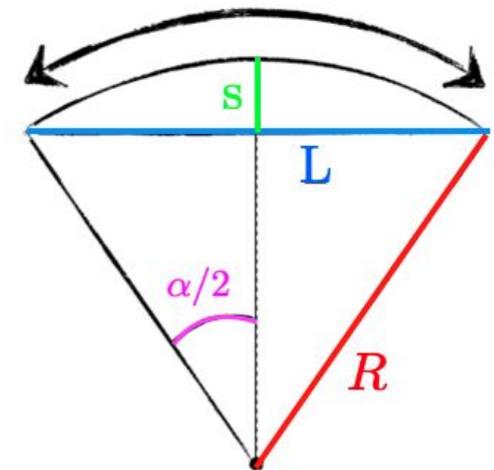
- Podemos medir la sagita,  $s$ , para calcular el radio  $R$ .

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

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

Para ángulos pequeños hacemos una expansión de series del coseno:

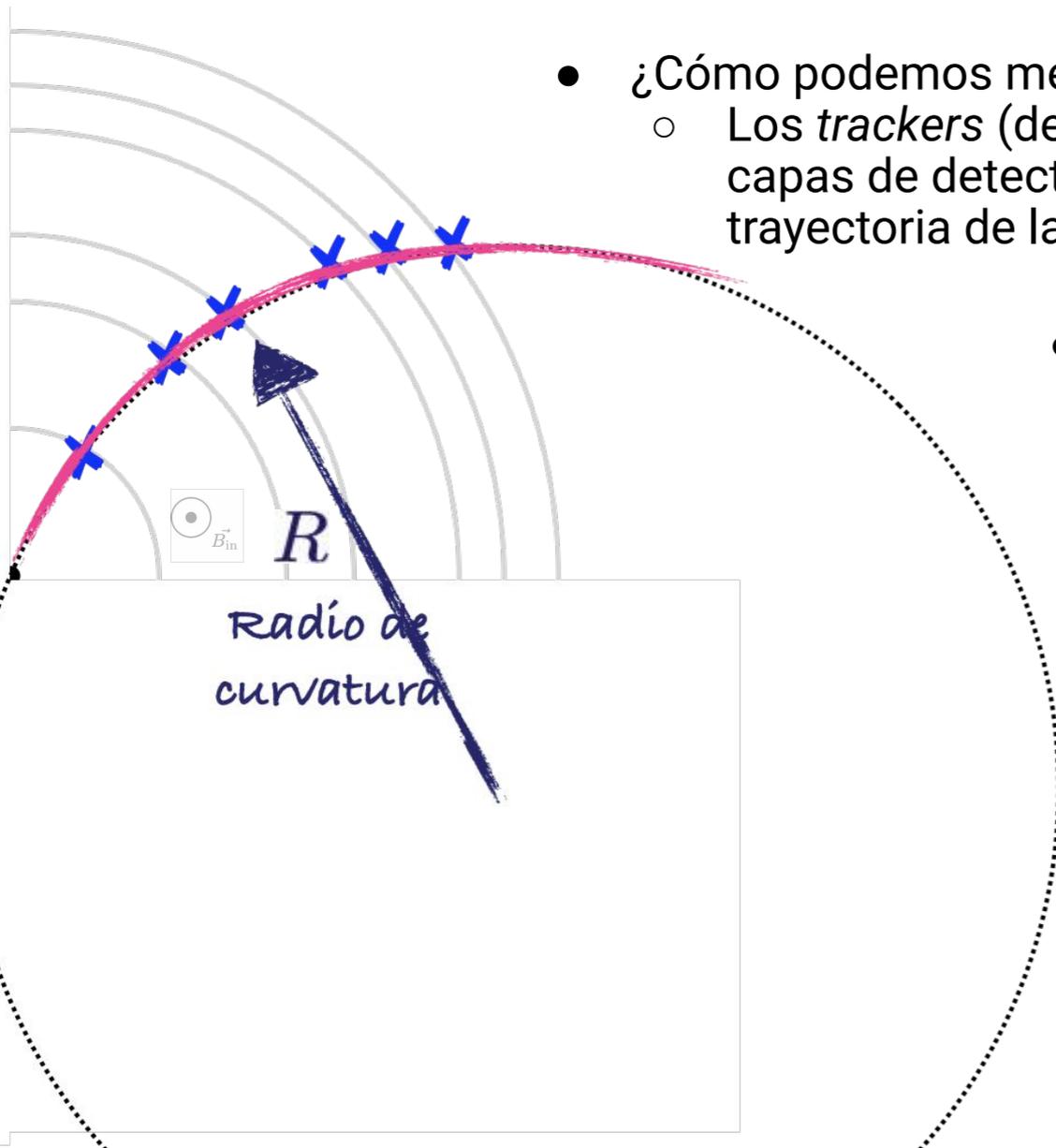
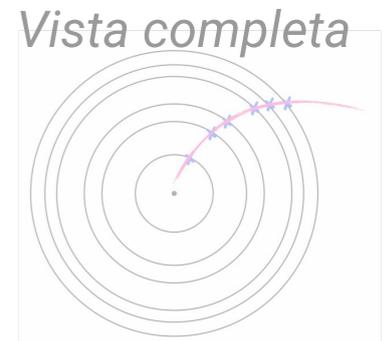
$$\cos(x) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \dots$$





# 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.

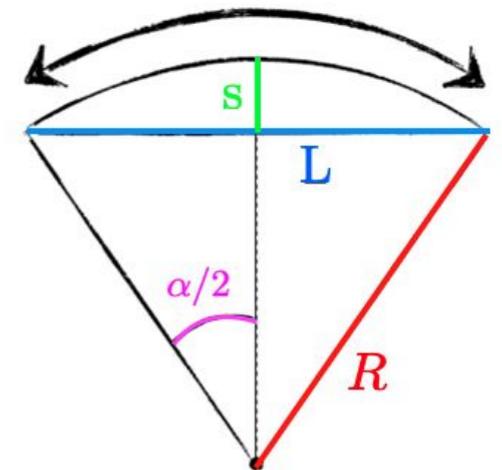


- Podemos medir la sagita,  $s$ , para calcular el radio  $R$ .

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

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

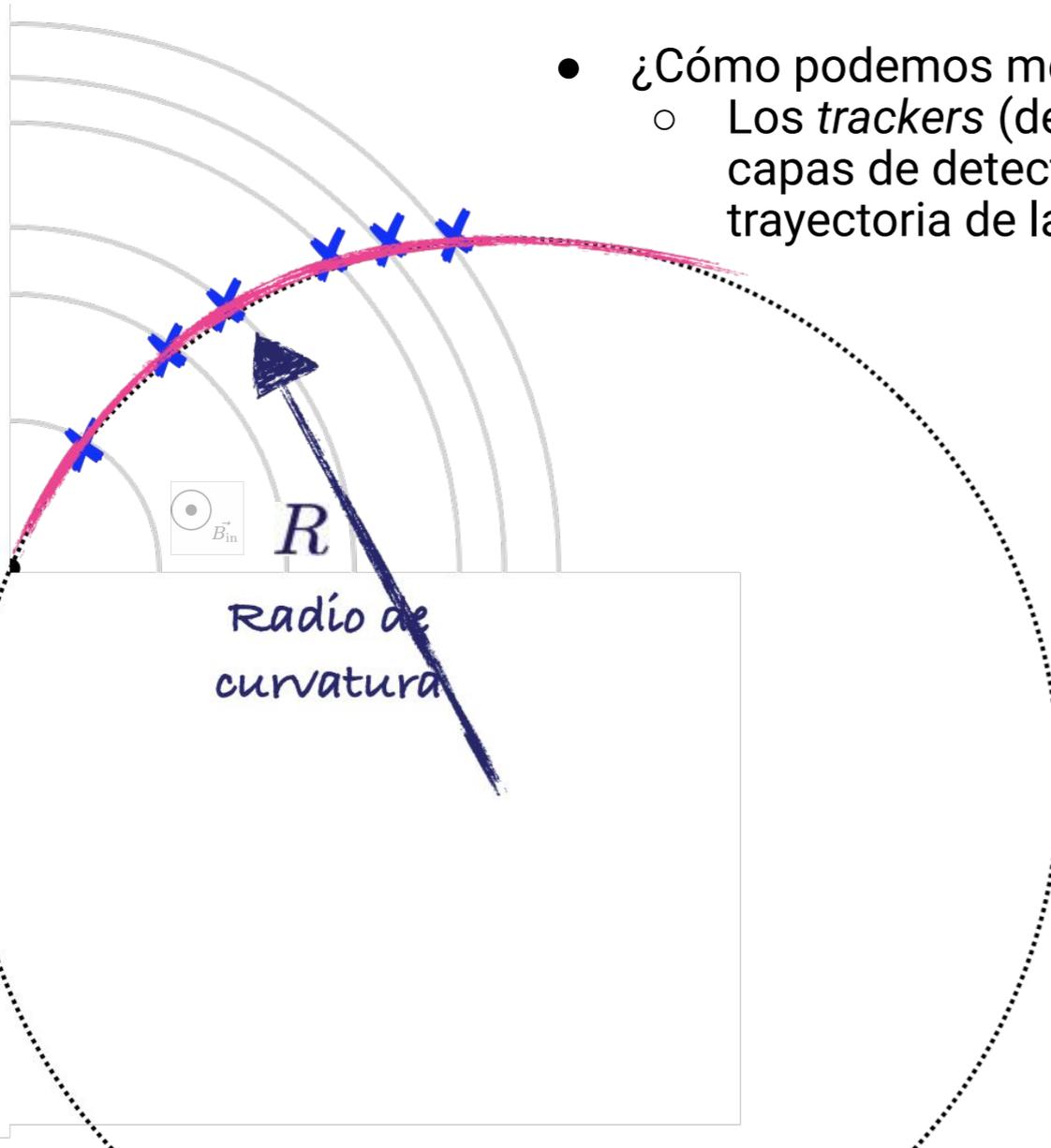
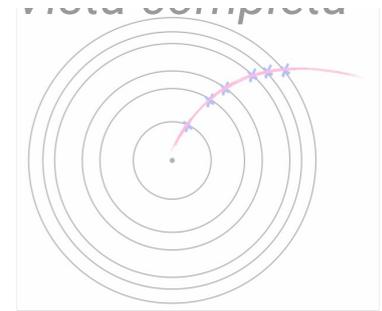
$$s \approx \frac{R\alpha^2}{8}$$





# 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  $R$ .

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

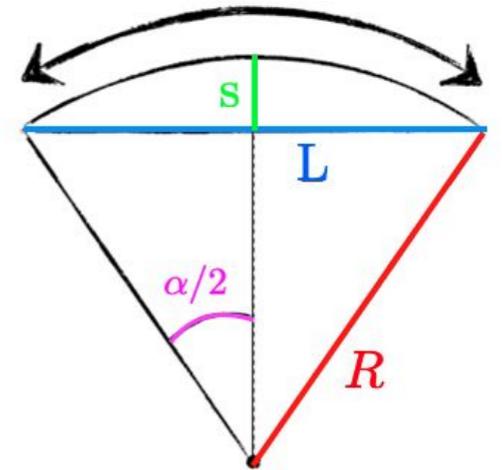
$$s = R - R \cos(\alpha/2) \approx R - R(1 - \frac{\alpha^2}{8})$$

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

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

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

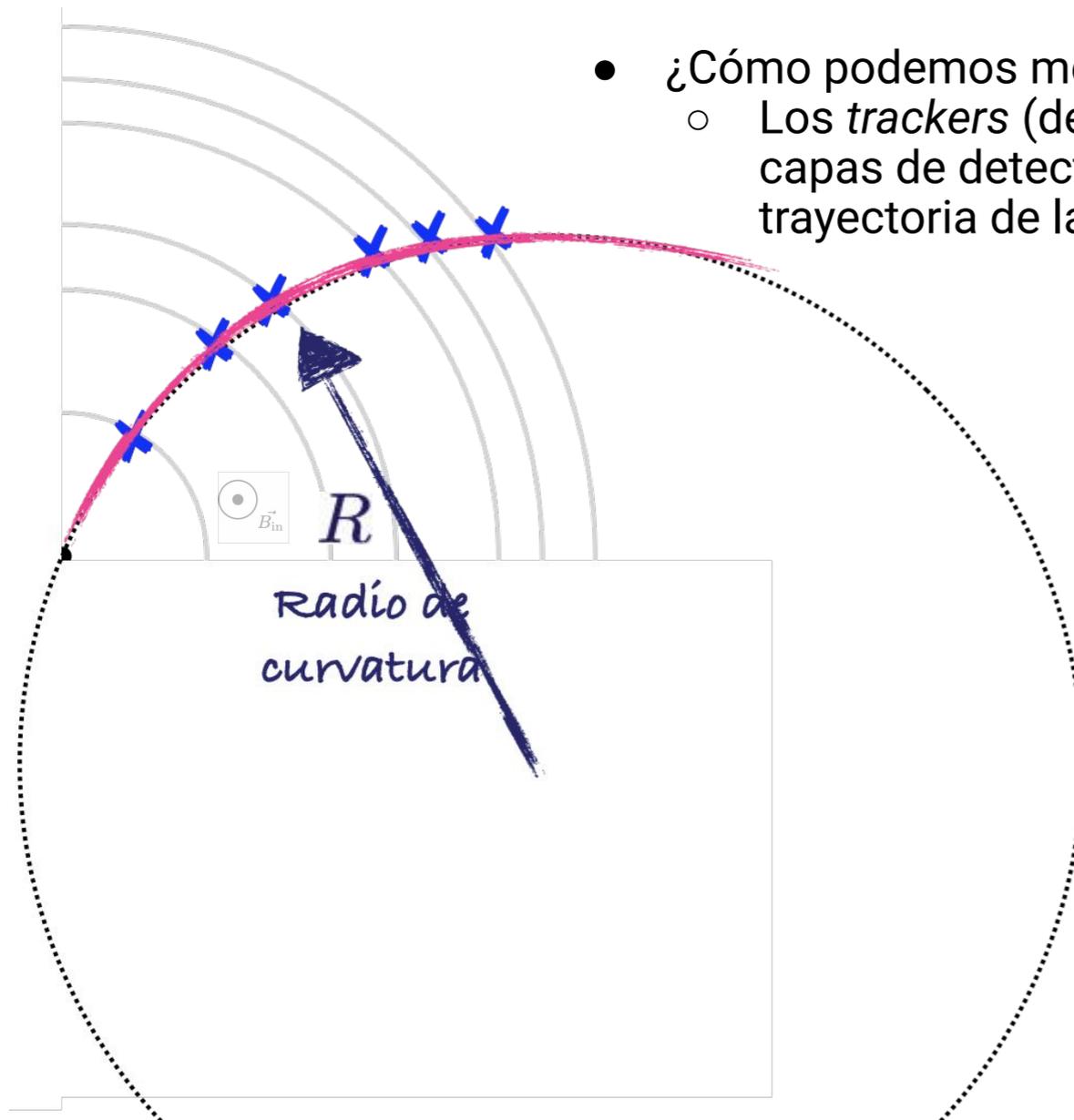
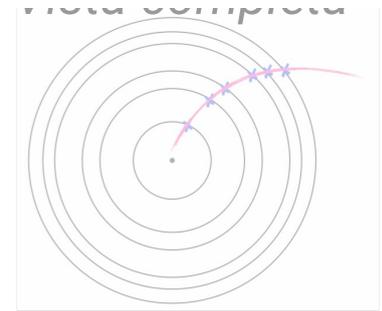
$$R = \frac{L^2}{8s}$$





# 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  $R$ .

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

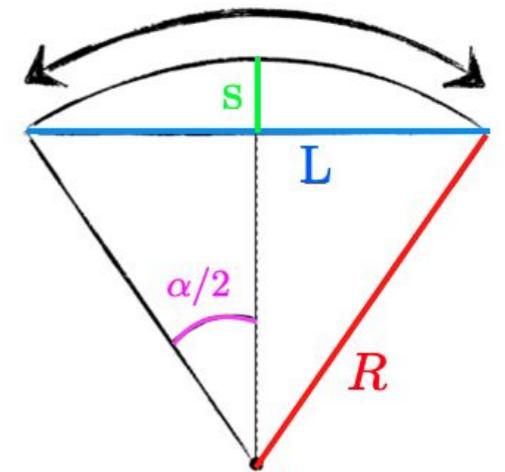
$$s = R - R \cos(\alpha/2) \approx R - R(1 - \frac{\alpha^2}{8})$$

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

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

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

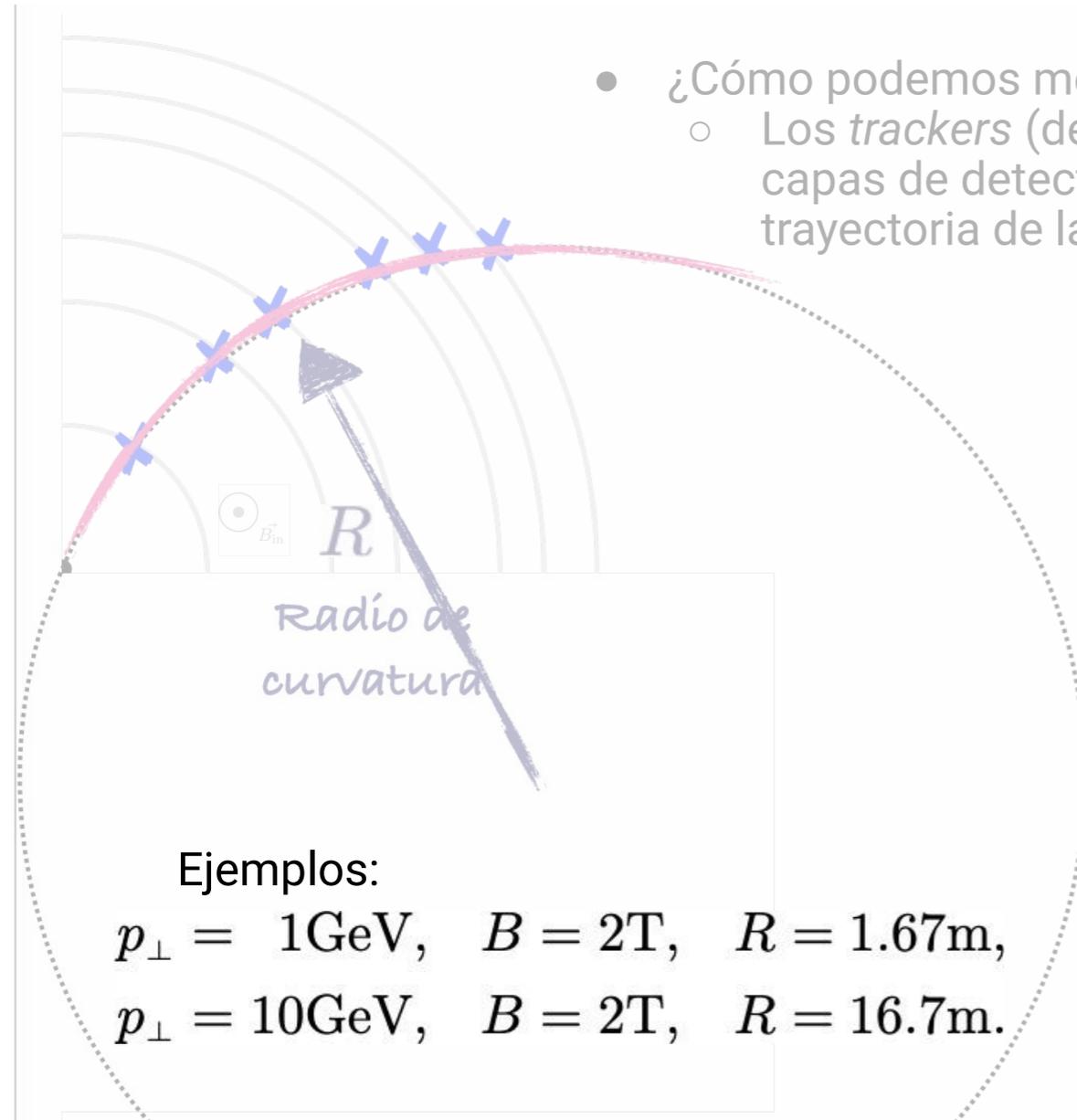
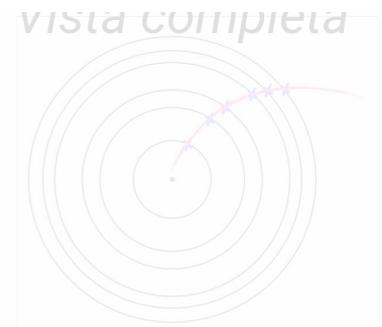
$$R = \frac{L^2}{8s}$$





# 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  $R$ .

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

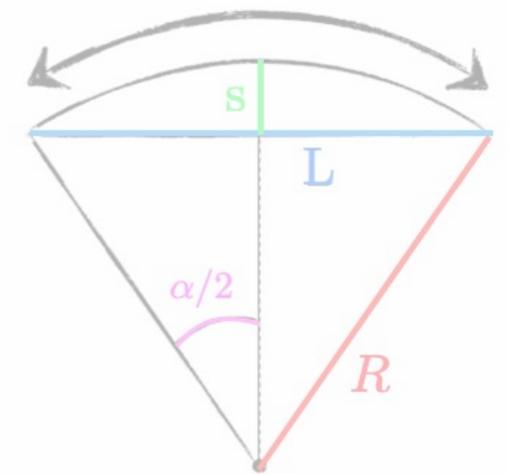
$$s = R - R \cos(\alpha/2) \approx R - R \left(1 - \frac{\alpha^2}{8}\right)$$

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

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

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

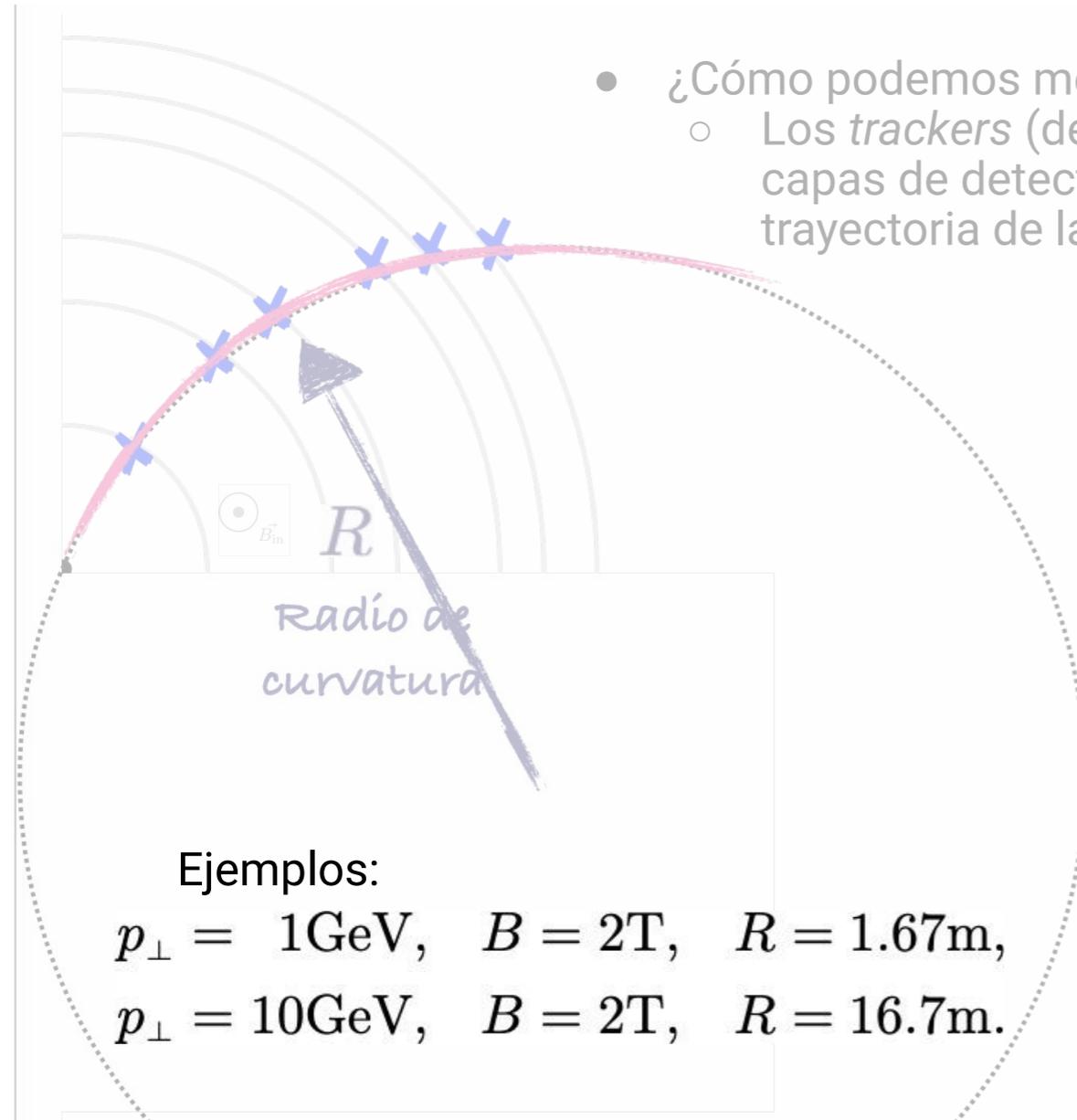
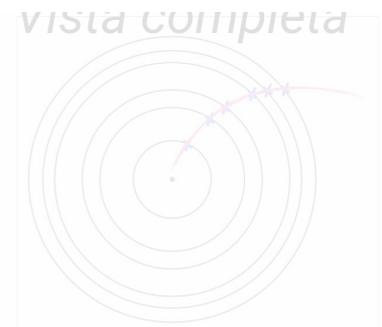
$$R = \frac{L^2}{8s}$$





# 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  $R$ .

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

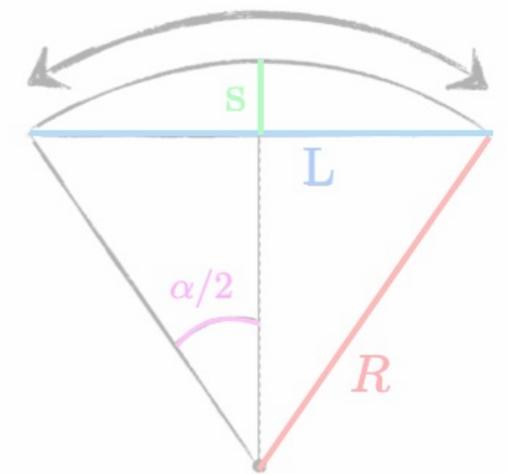
$$s = R - R \cos(\alpha/2) \approx R - R(1 - \frac{\alpha^2}{8})$$

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

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

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

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

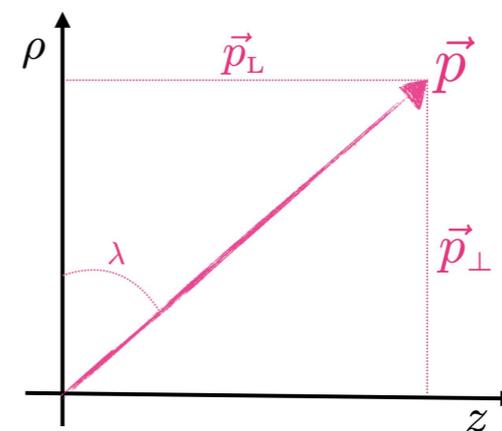




# Partículas cargadas en un campo magnético

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

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



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

Momento total:

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

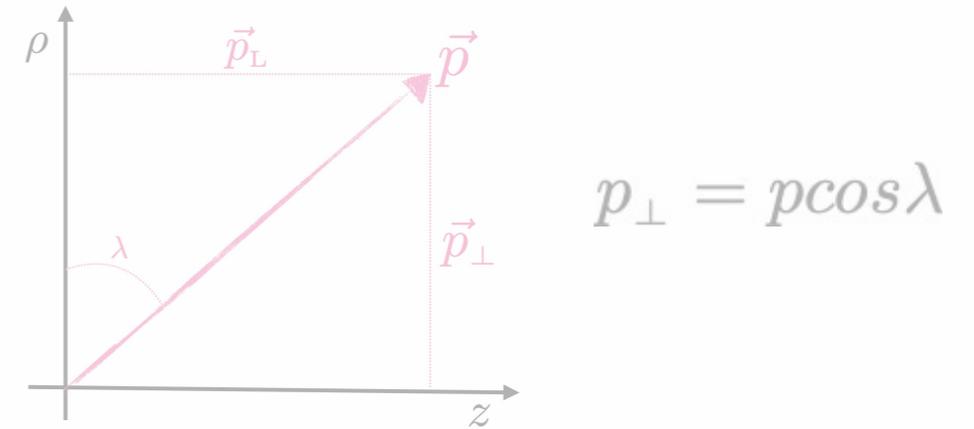
$$p[\text{GeV}/c] = \frac{0.3BR}{\cos \lambda}$$



# Partículas cargadas en un campo magnético

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

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



Momento total:

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

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

¿Incertidumbre en la medición del momento?

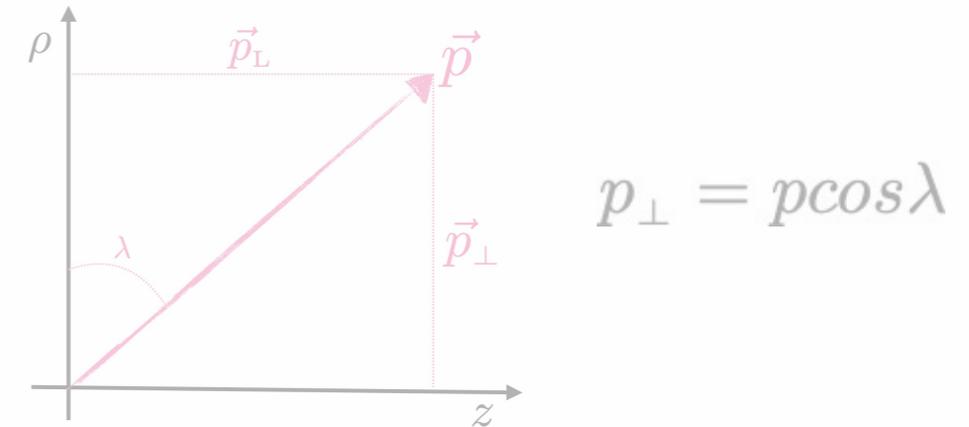
- Error en la medición del radio de curvatura (R):  $\frac{\Delta p}{p} \propto \frac{\Delta R}{R} = \frac{L^2}{8s} \cdot \frac{\Delta s}{s}$
- Error en la medición del ángulo en el plano  $\rho z$  ( $\lambda$ ):  $\frac{\Delta p}{p} \propto \tan \lambda \Delta \lambda$
- Contribución de la dispersión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



# Momento de las partículas cargadas

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

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



Momento total:

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

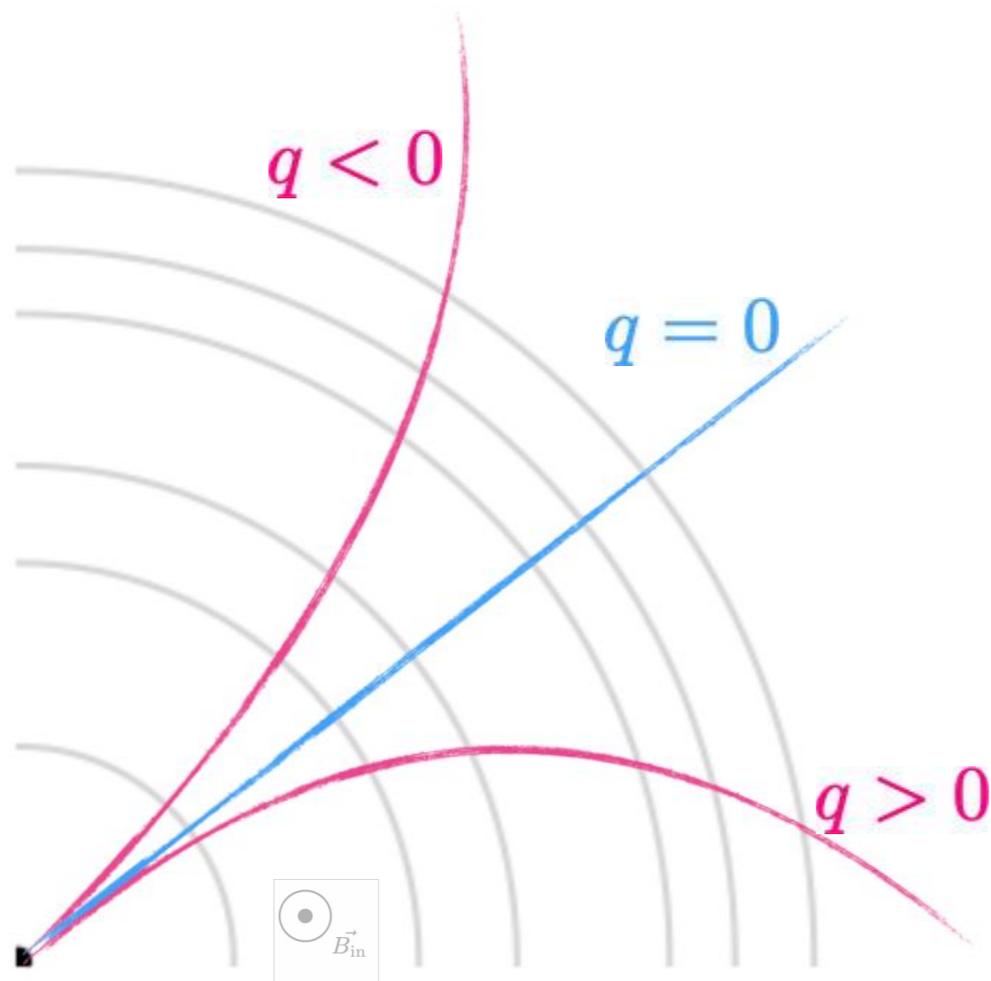
$$p[\text{GeV}/c] = \frac{0.3BR}{\cos \lambda}$$

¿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  $\rho z$  ( $\lambda$ ):  $\frac{\Delta p}{p} \propto \tan \lambda \Delta \lambda$
- Contribución de la dispersión múltiple (*multiple scattering*).  $\left(\frac{\sigma_p}{p^2}\right)^2 = \text{const.} \left(\frac{p_T}{BL^2}\right)^2 + \text{const.} \left(\frac{1}{B\sqrt{LX_0}}\right)^2$



# 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.

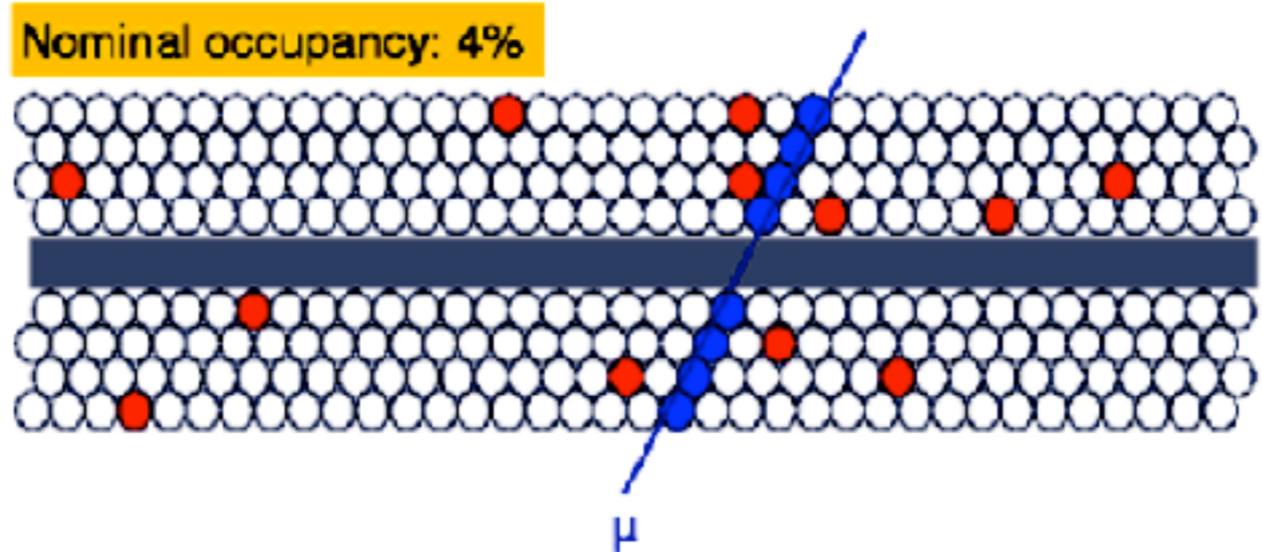
$$q > 0 \quad \frac{1}{R} > 0 \quad q < 0 \quad \frac{1}{R} < 0$$

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



# Granularidad

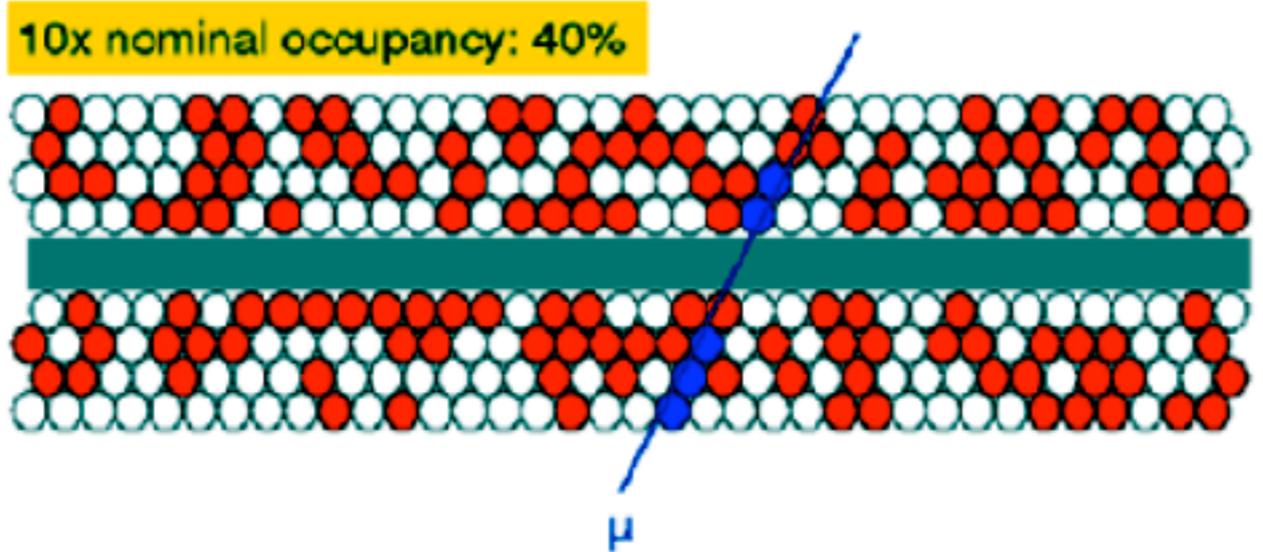
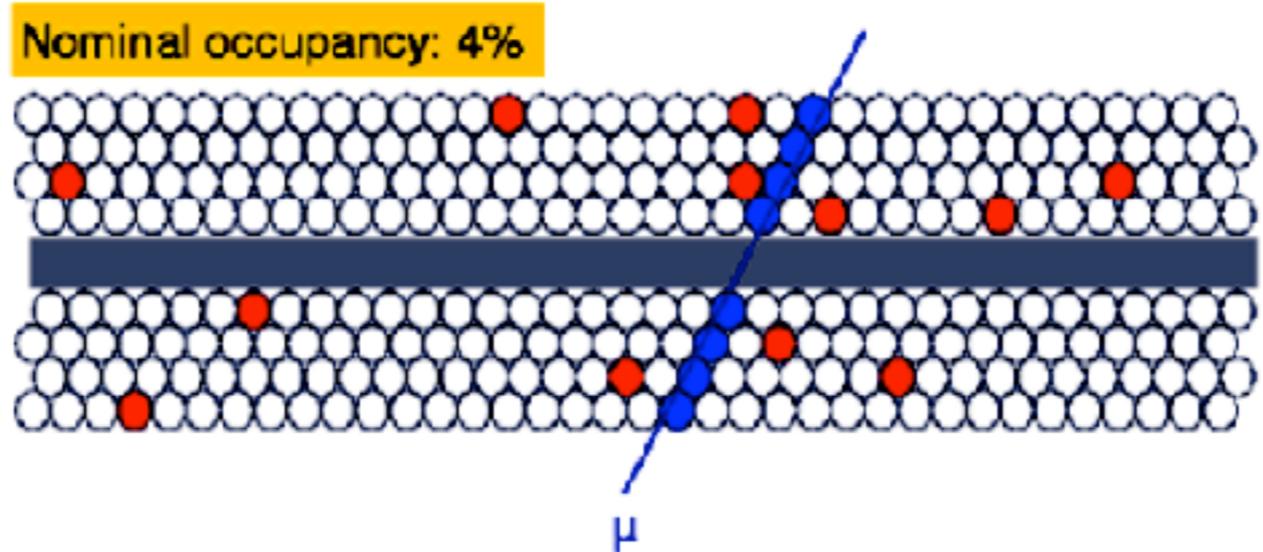
- muon hit
- background hit





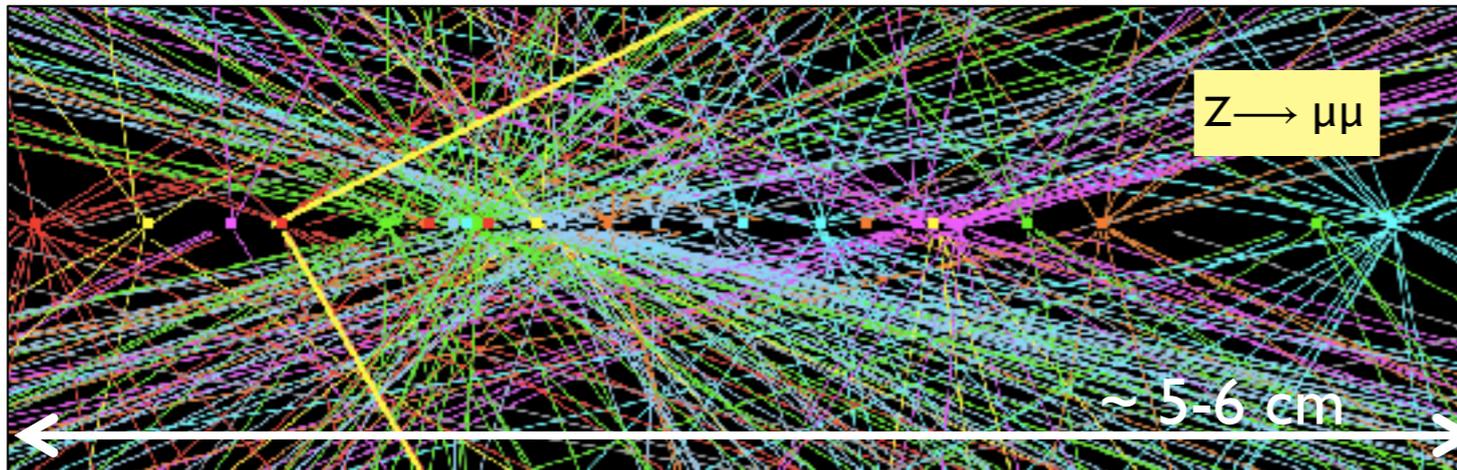
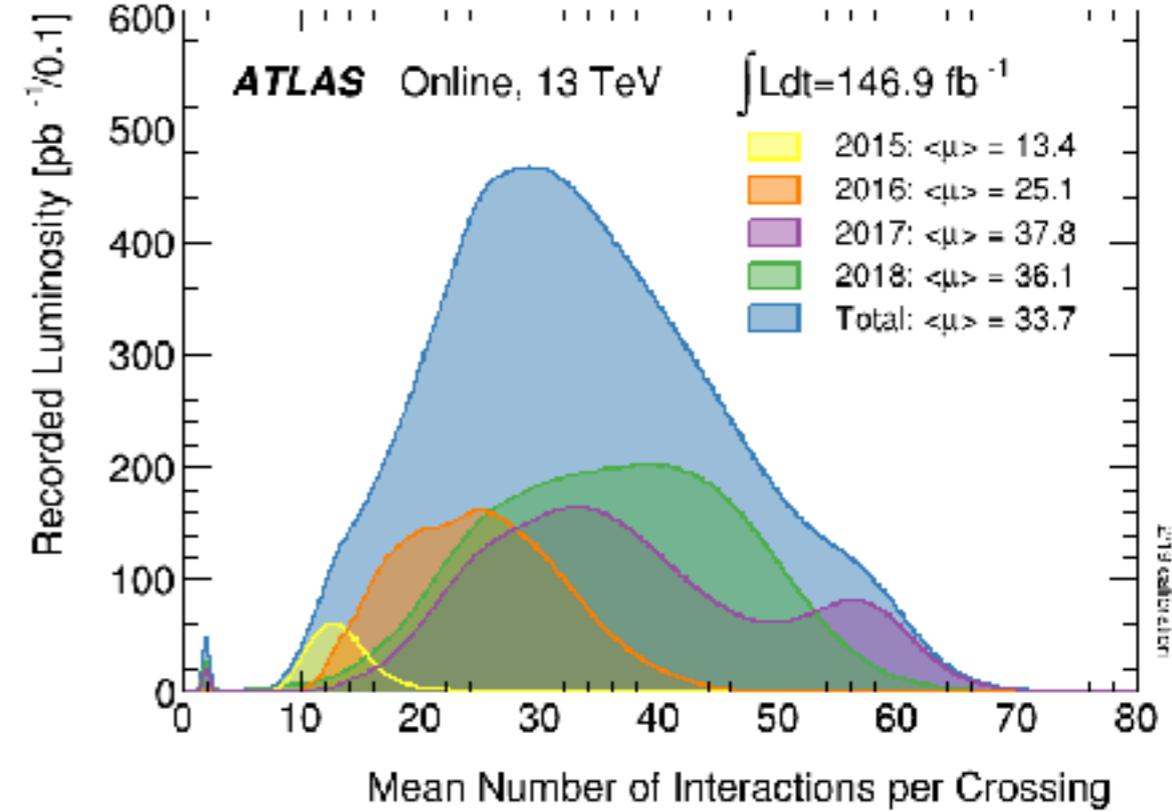
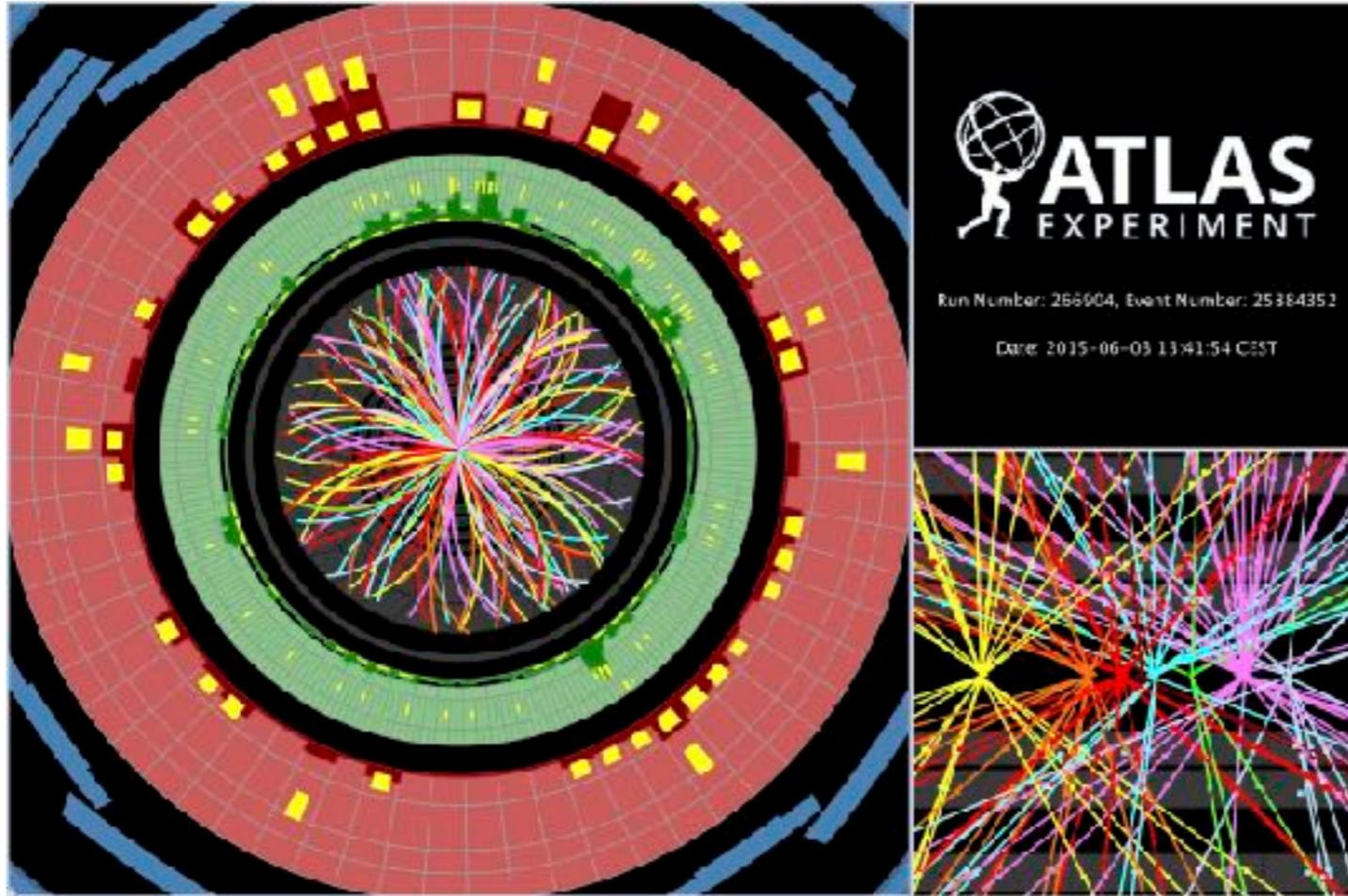
# Granularidad

- muon hit
- background hit





# Un evento de datos



$Z \rightarrow \mu\mu$  event from 2012 data with 25 reconstructed vertices



## 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 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.

# Detectores gaseosos + tracking



Latin American alliance for  
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics

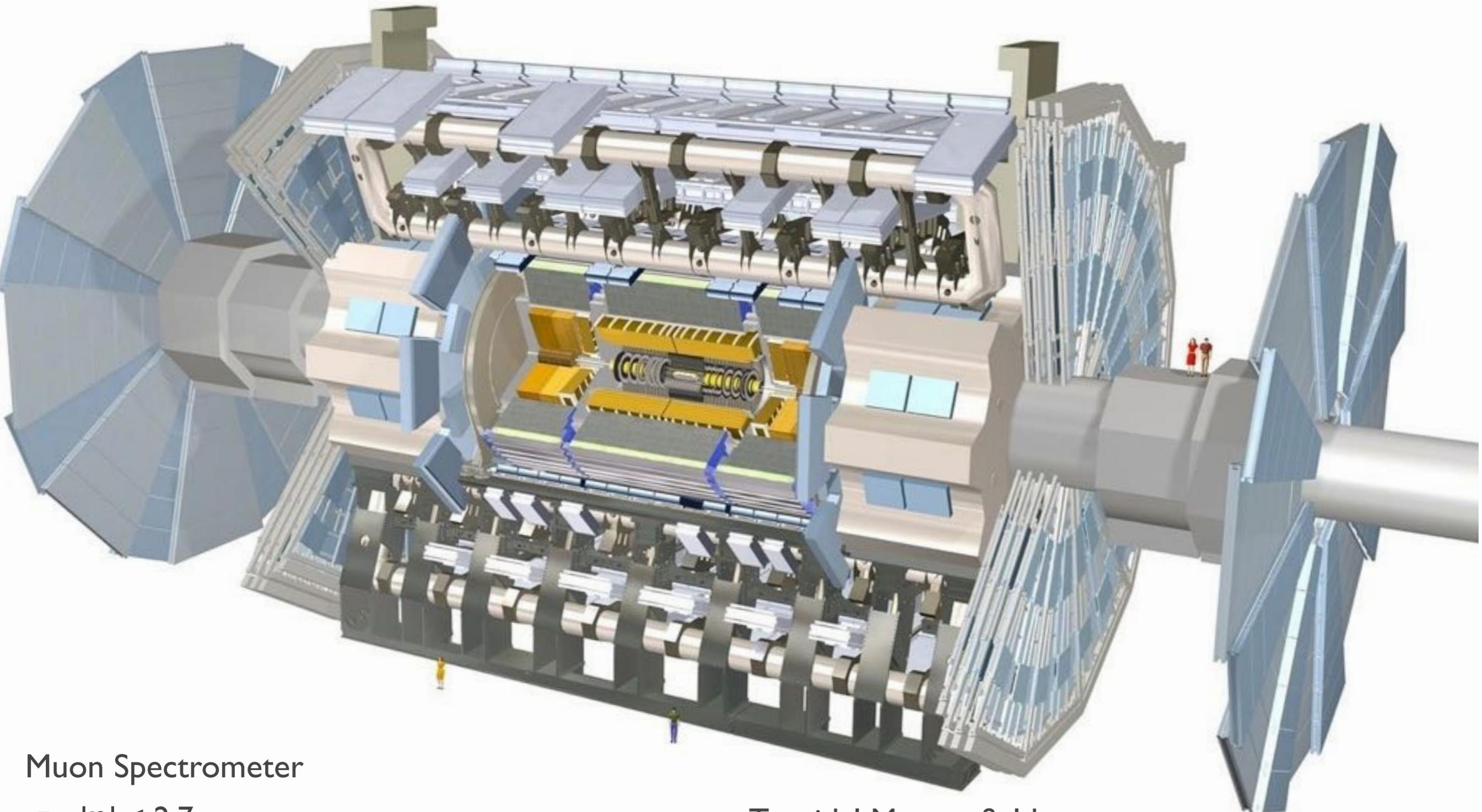


Cofinanciado por el  
programa Erasmus+  
de la Unión Europea





# Un ejemplo: El espectrómetro de muones de ATLAS



## Muon Spectrometer

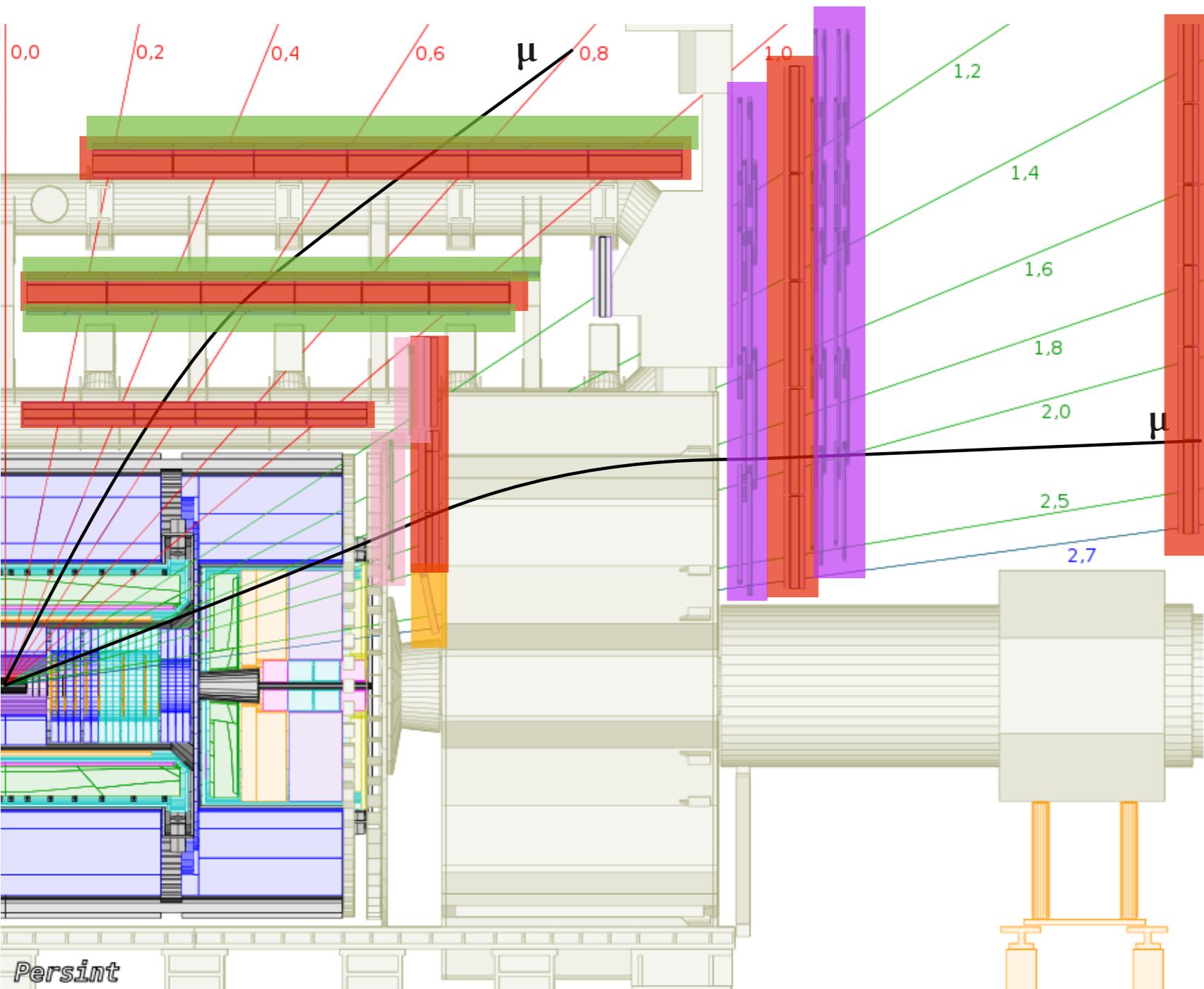
- $|\eta| < 2.7$
- Muon precision measurement and trigger
- $\sigma/p_T \sim$  from 3 -10 % for 50-1000 GeV muons

## Toroidal Magnet field

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



# Un ejemplo: El espectrómetro de muones de ATLAS



## Precision chambers :

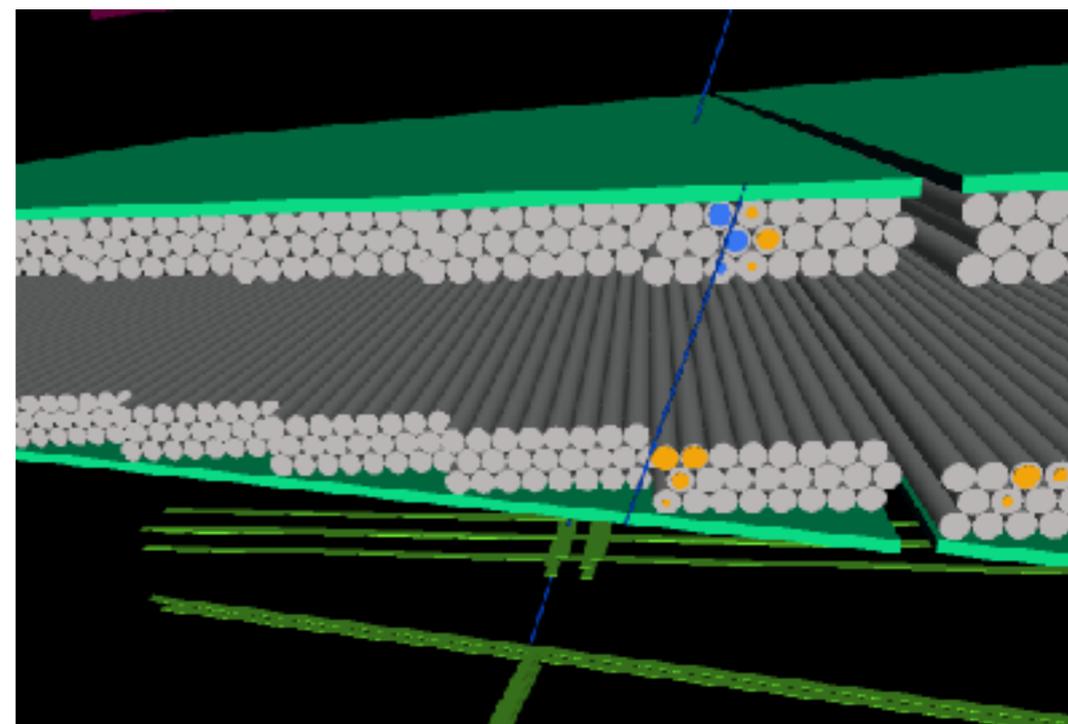
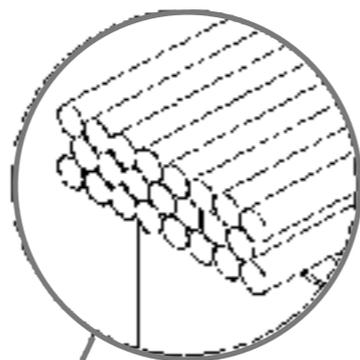
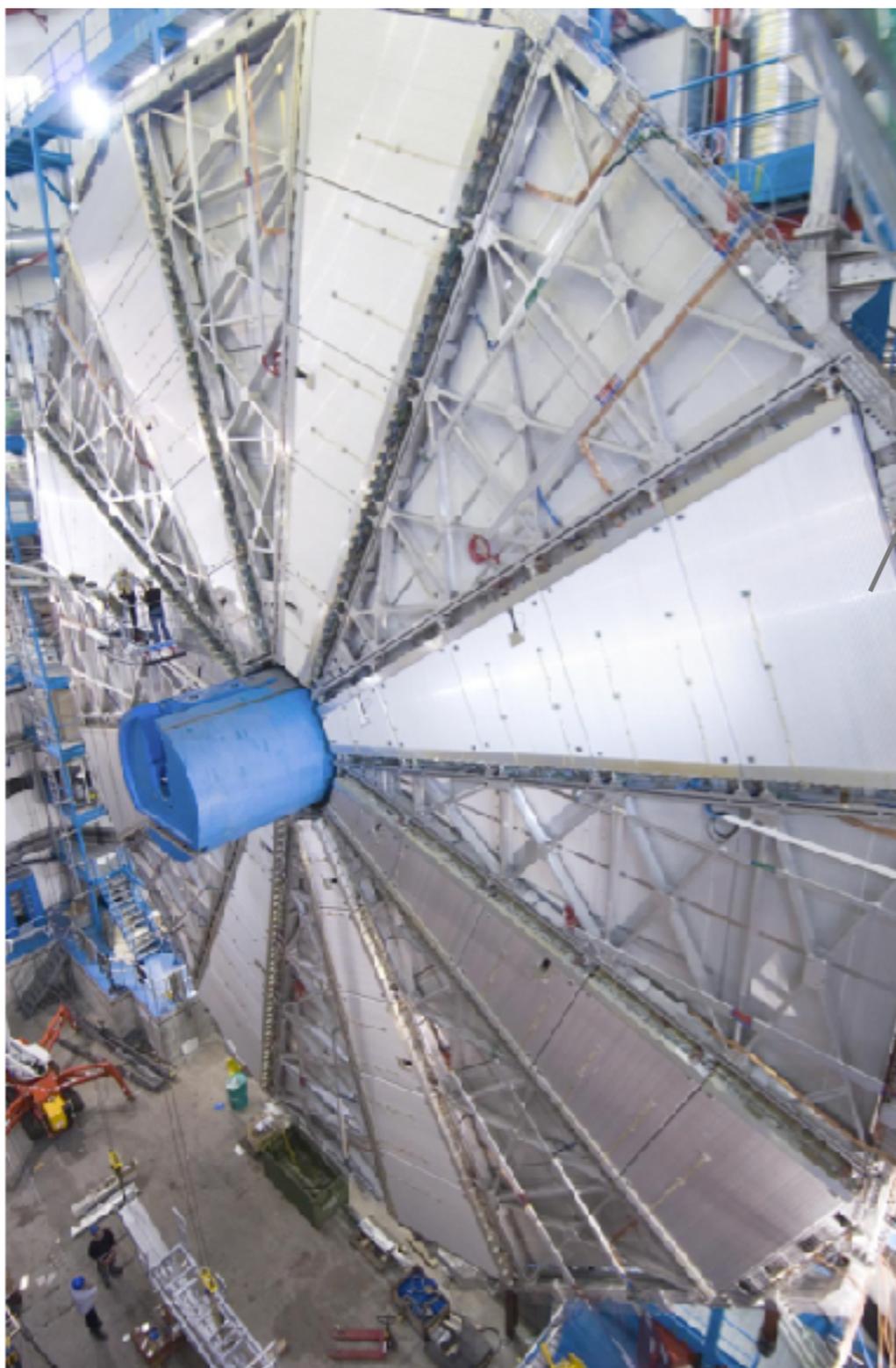
- Monitored Drift Tubes (MDT)  
 $|\eta| < 2.7$ , (  $|\eta| < 2.0$  small wheel )
- Cathode Strip Chambers (CSC)  
 $2.0 < |\eta| < 2.7$  (small wheel)

## 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)



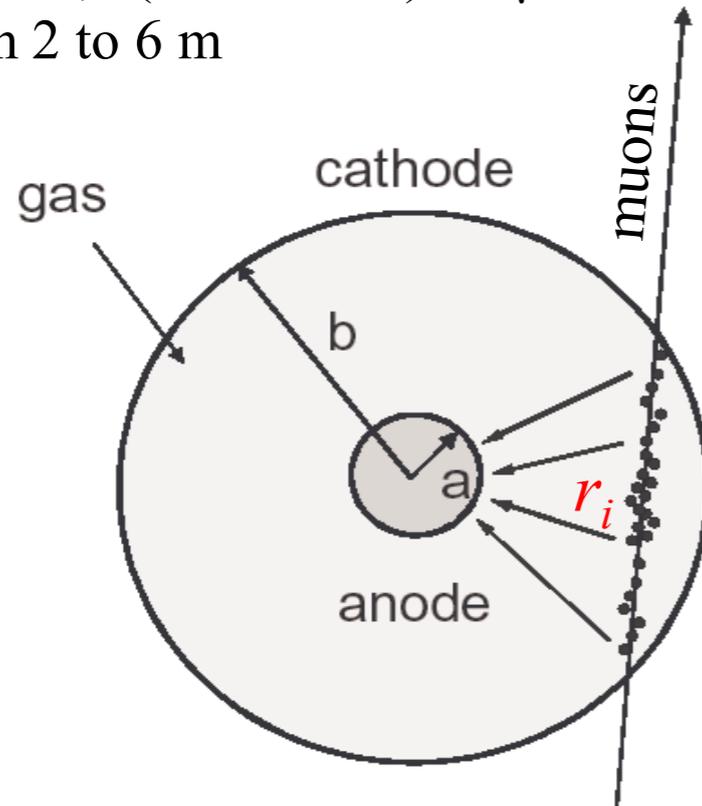
# Un ejemplo: Los tubos de deriva de ATLAS



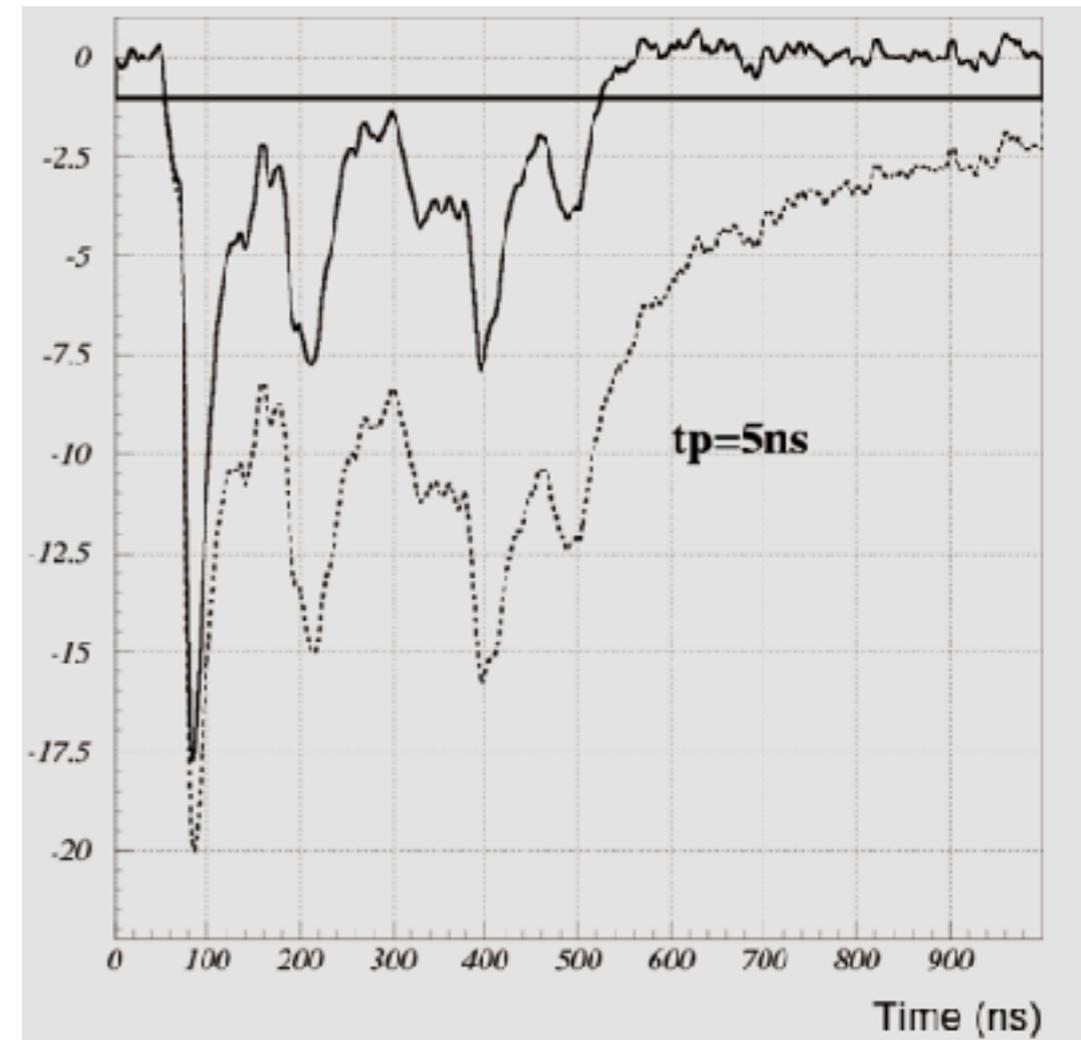


# Un ejemplo: Los tubos de deriva de ATLAS

$b=15\text{ mm}$ ,  $a(\text{anode wire})=50\mu\text{m}$   
 $L$  from 2 to 6 m



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



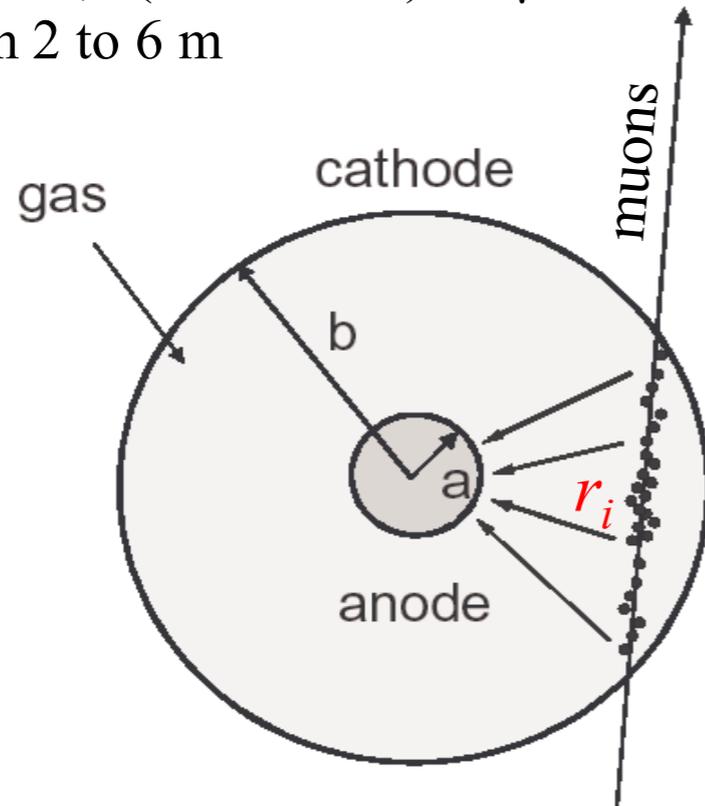
## ATLAS Monitored Drift Tube characteristics :

- Ar:CO<sub>2</sub> 93:7
- $p = 3\text{ bar} \Rightarrow \sim 3 \times 100\text{ pairs/cm}$  ( $n_{\text{Total}}$ )
- $V \sim 3000\text{ V}$  ( $2 \cdot 10^5\text{ V/cm}$ )
- Gain:  $2 \cdot 10^4$
- **Max drift time of e- : 700 ns**
- Centring of wire  $< 100\mu\text{m}$  all along the tube  
( $20\mu\text{m}$  at the end-plug)

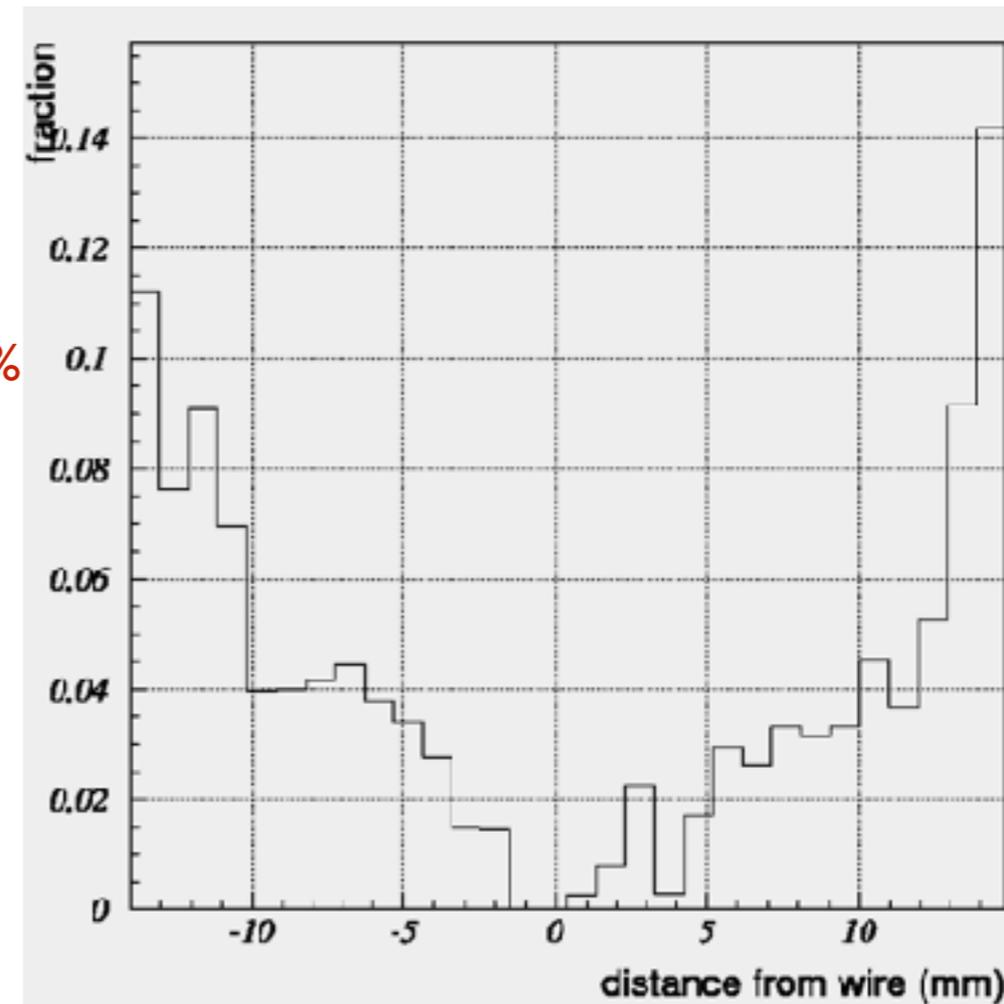


# Un ejemplo: Los tubos de deriva de ATLAS

$b=15\text{ mm}$ ,  $a(\text{anode wire})=50\mu\text{m}$   
 $L$  from 2 to 6 m



10%



## ATLAS Monitored Drift Tube characteristics :

- Ar:CO<sub>2</sub> 93:7
- $p = 3\text{ bar} \Rightarrow \sim 3 \times 100\text{ pairs/cm}$  ( $n_{\text{Total}}$ )
- $V \sim 3000\text{ V}$  ( $2 \cdot 10^5\text{ V/cm}$ )
- Gain:  $2 \cdot 10^4$
- **Max drift time of e<sup>-</sup> : 700 ns**
- Centring of wire  $< 100\mu\text{m}$  all along the tube (20 $\mu\text{m}$  at the end-plug)

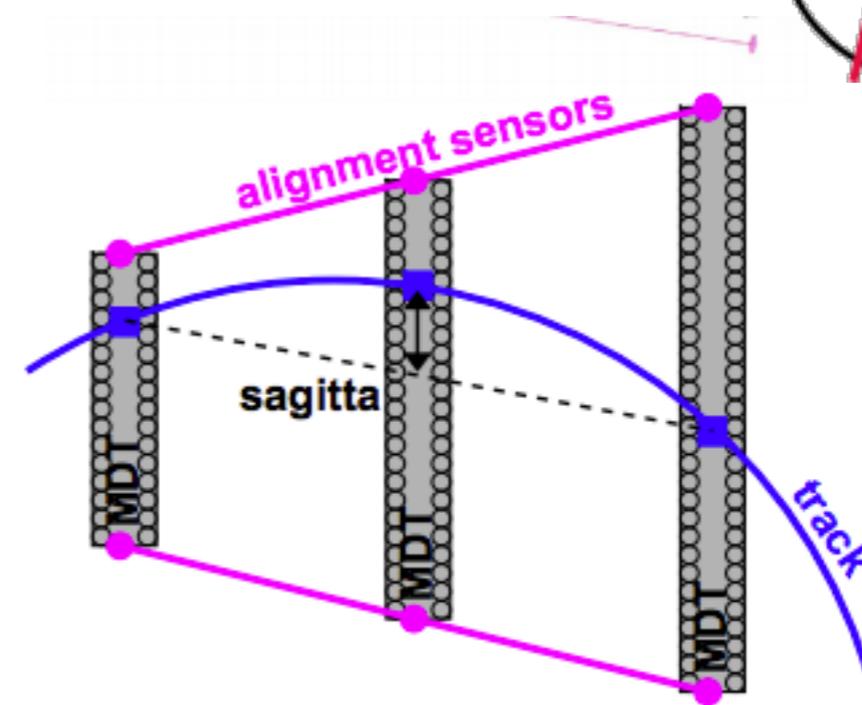
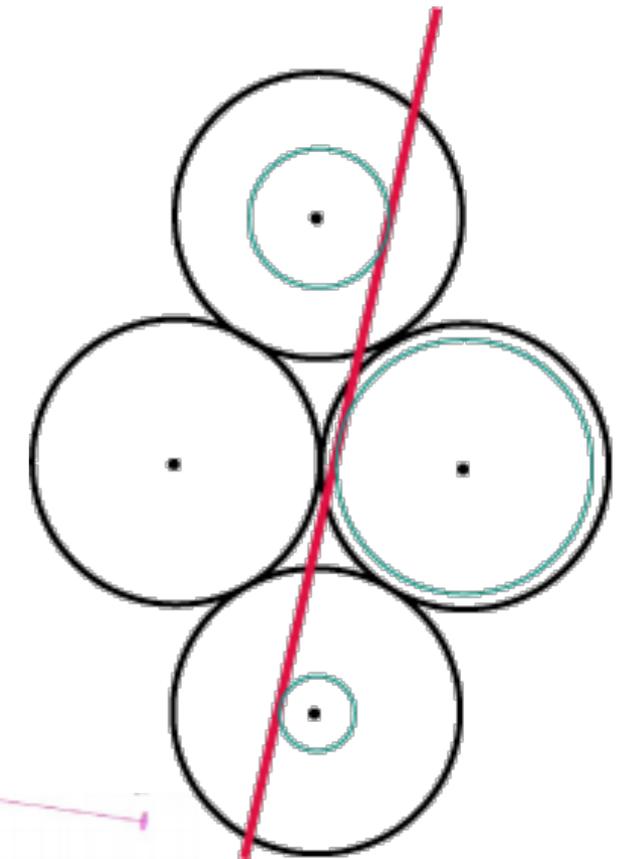
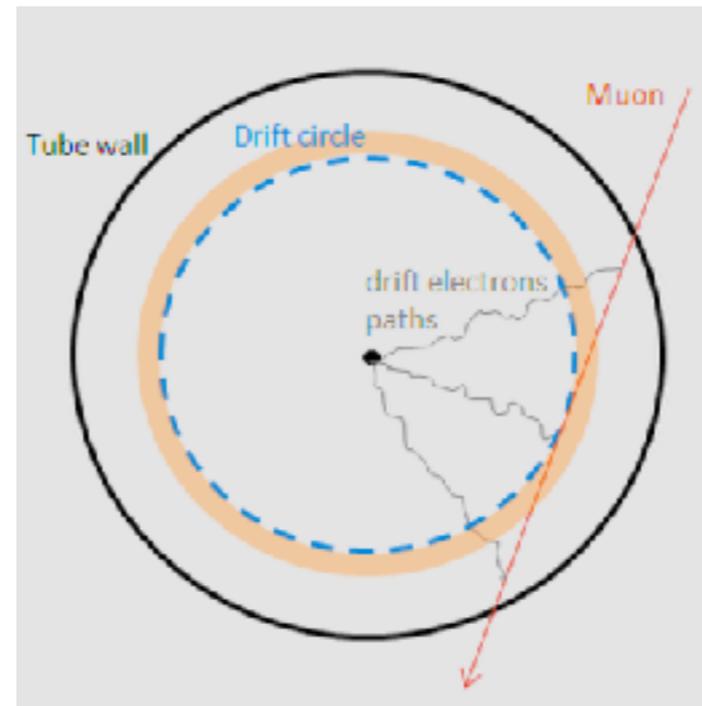
Inefficiency =  $f(\text{radius})$

close to tube walls, because of small signal  
Remark: bad resolution for tracks centered on the wire



# Reconstrucción 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  $\sigma \sim 80 \mu\text{m} / \text{tubo} \rightarrow$  mejora al combinar tubos de una cámara  $\sim 50\mu\text{m}$  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



## Objetivos del tracking

- Medir la trayectoria de una partícula cargada:
  - Identificar los diferentes puntos de interacción (hits) de la partícula con las capas/planos del detector.
  - Hacer un fit de esos hits (e.g. curva, línea recta).
  - Medir el momento y el signo de la carga de las partículas cargadas a partir de su curvatura dentro de un campo magnético.
- Encontrar los vértices de interacción (puntos de origen)
- Identificación de partículas
  - Combinando información de varios detectores (ejemplo detector de muones)

 <http://laconga.redclara.net>

 [contacto@laconga.redclara.net](mailto: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

- 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.