

# Tracking & Vertexing

Arely Cortés González

Humboldt Universität zu Berlin



Latin American alliance for  
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics

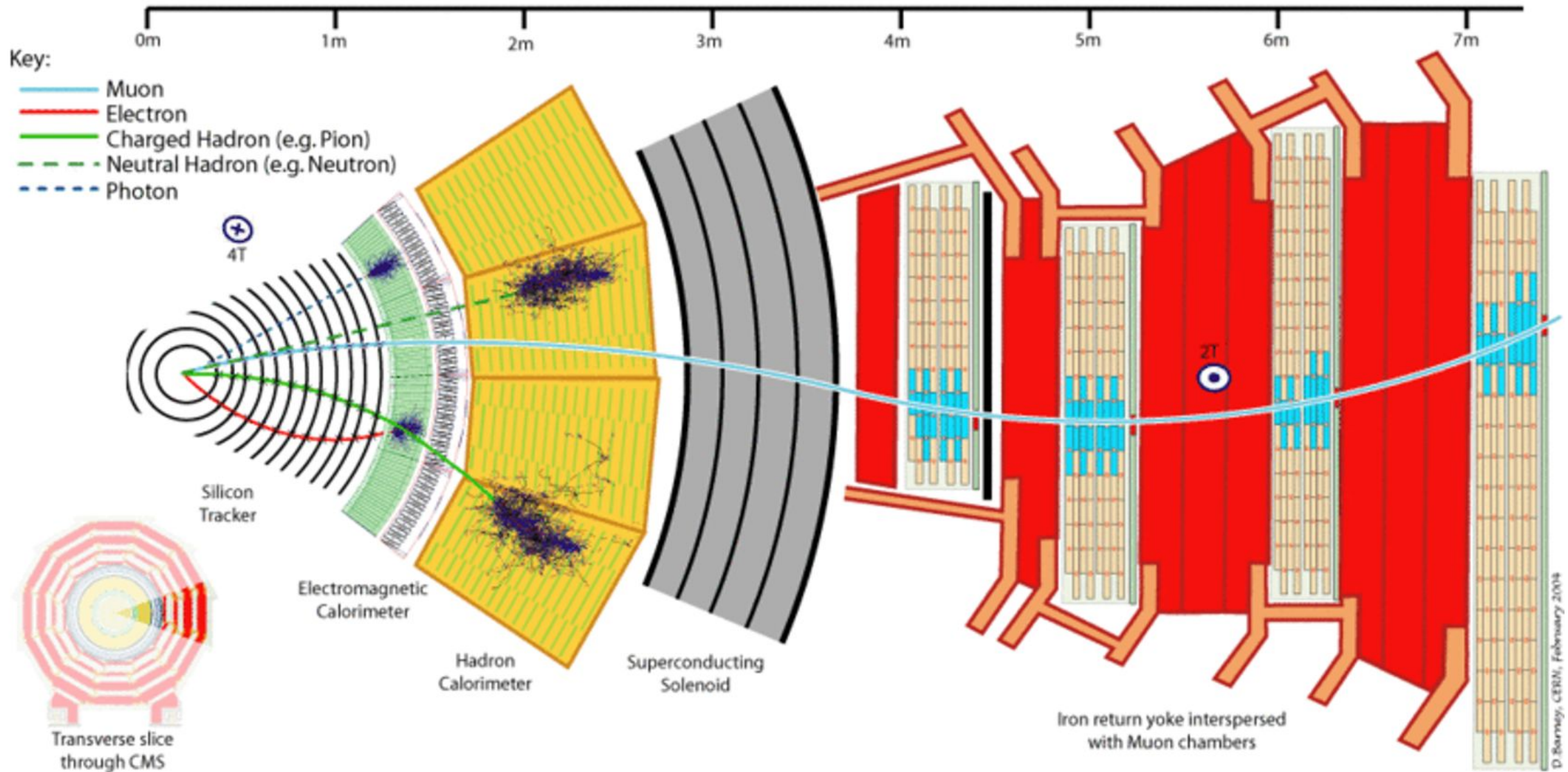


Cofinanciado por el  
programa Erasmus+  
de la Unión Europea





# Identificación de partículas



# Tracking





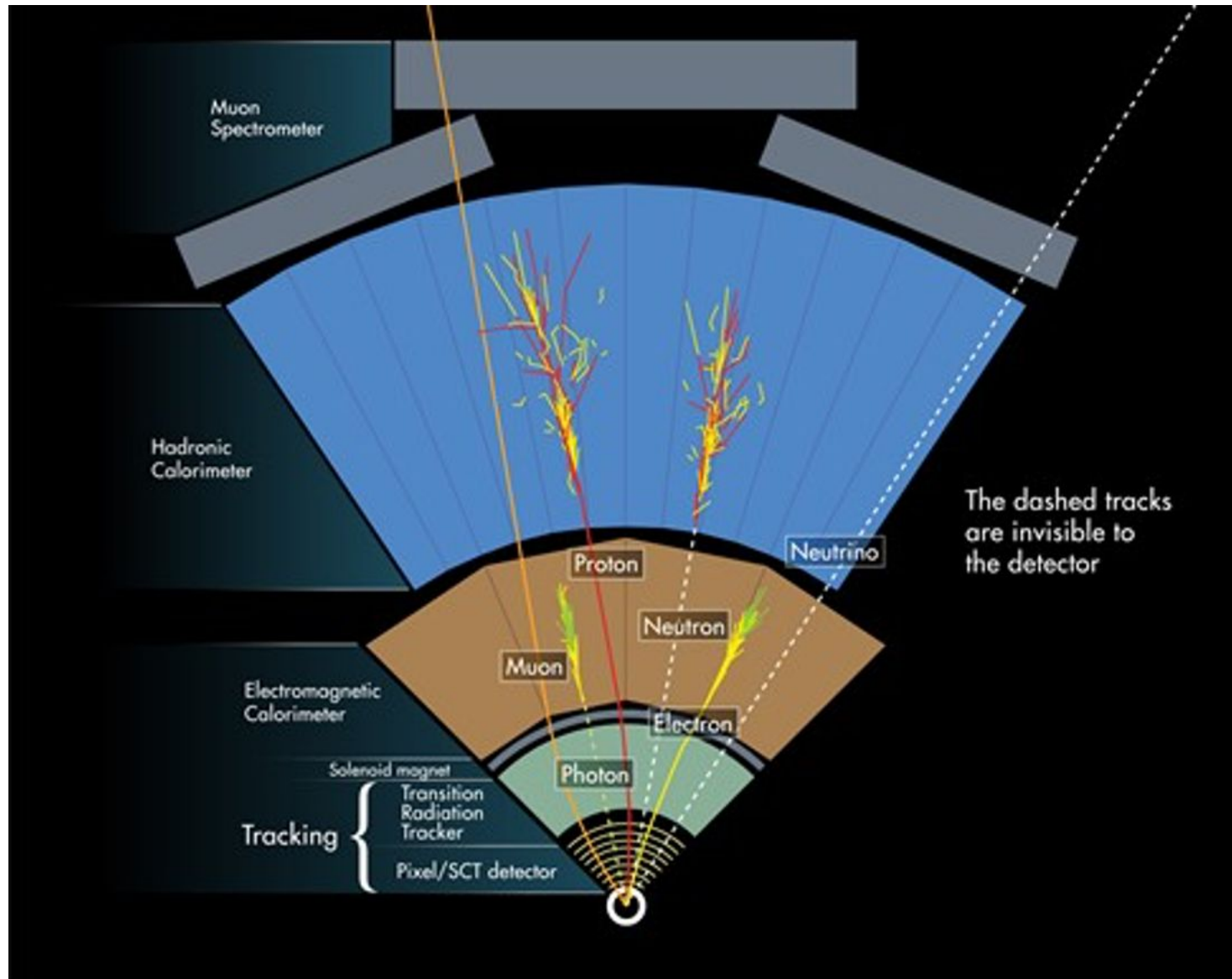
# ¿Qué es el tracking?

- ¿Qué es el *tracking*?
  - ¿Cómo identificamos las trayectorias de las partículas?
- Conceptos básicos:
  - Movimiento en un campo magnético.
  - Parámetros de las trayectorias: parámetro de impacto & momento.
- Reconstrucción de las trayectorias.
- *Vertexing*.
  - Vértices de interacción.





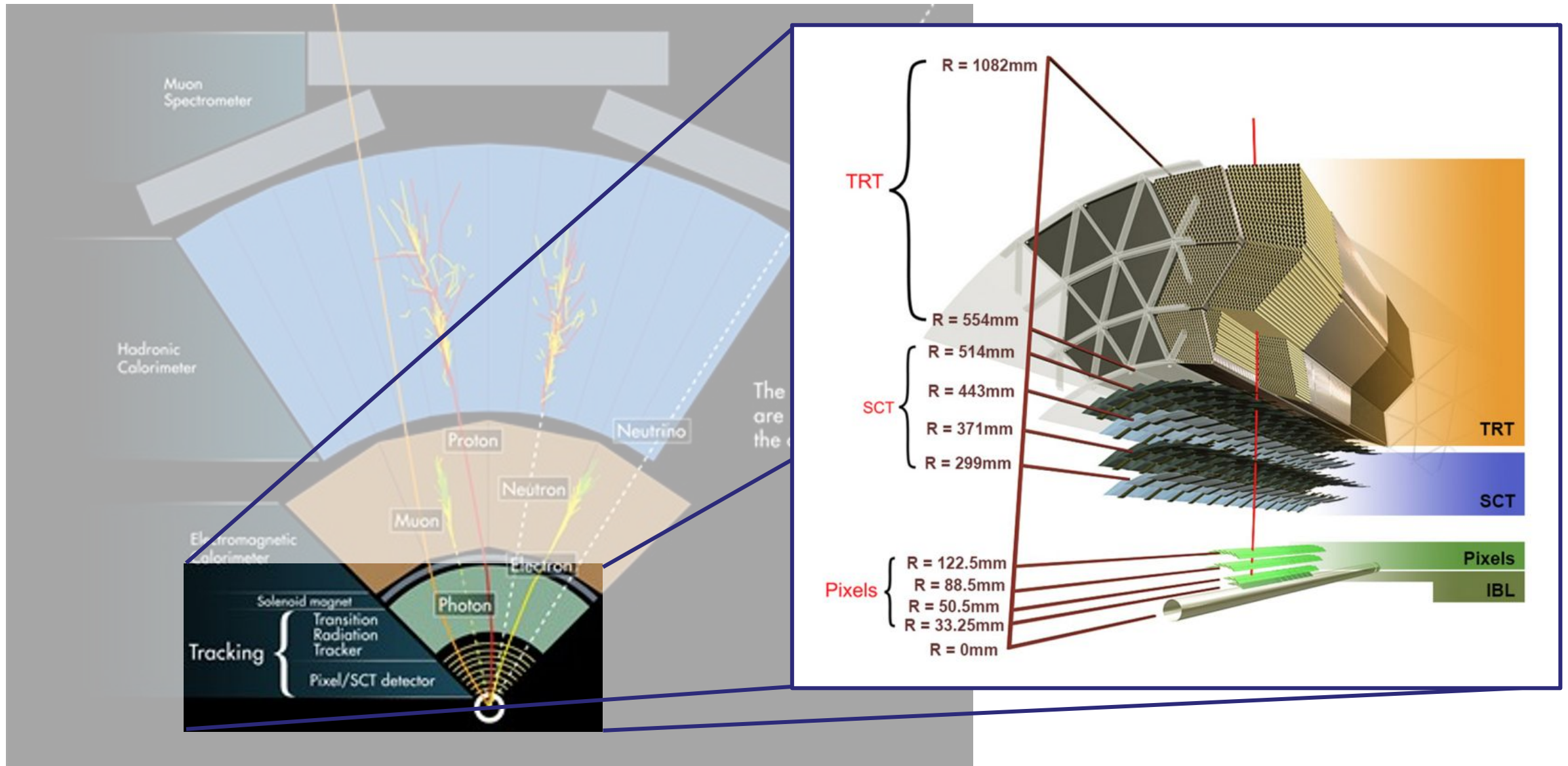
# Identificación de partículas



Otro ejemplo:  
Experimento ATLAS



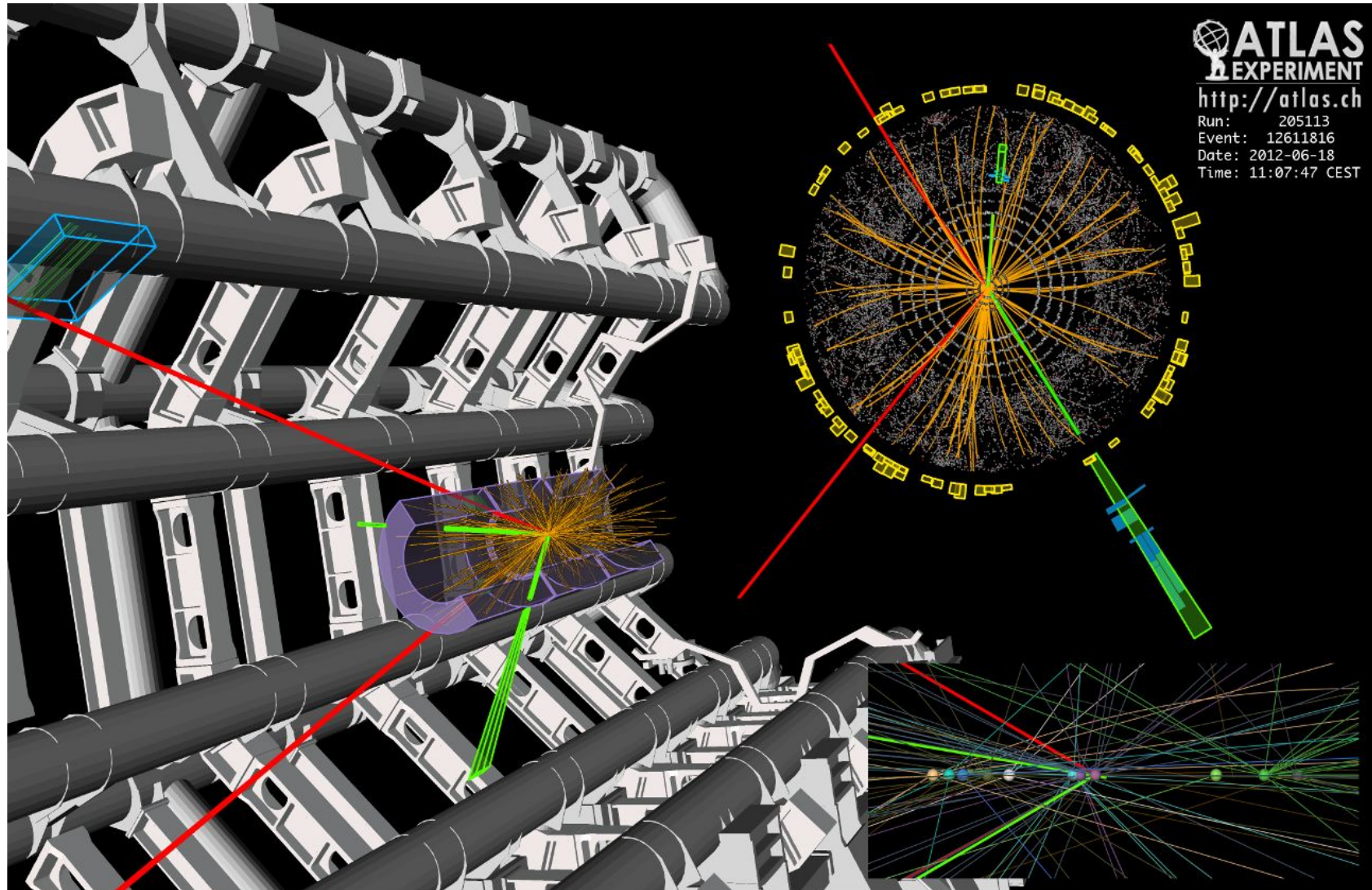
# Identificación de partículas







## ¿Qué queremos conocer de las partículas en el detector?



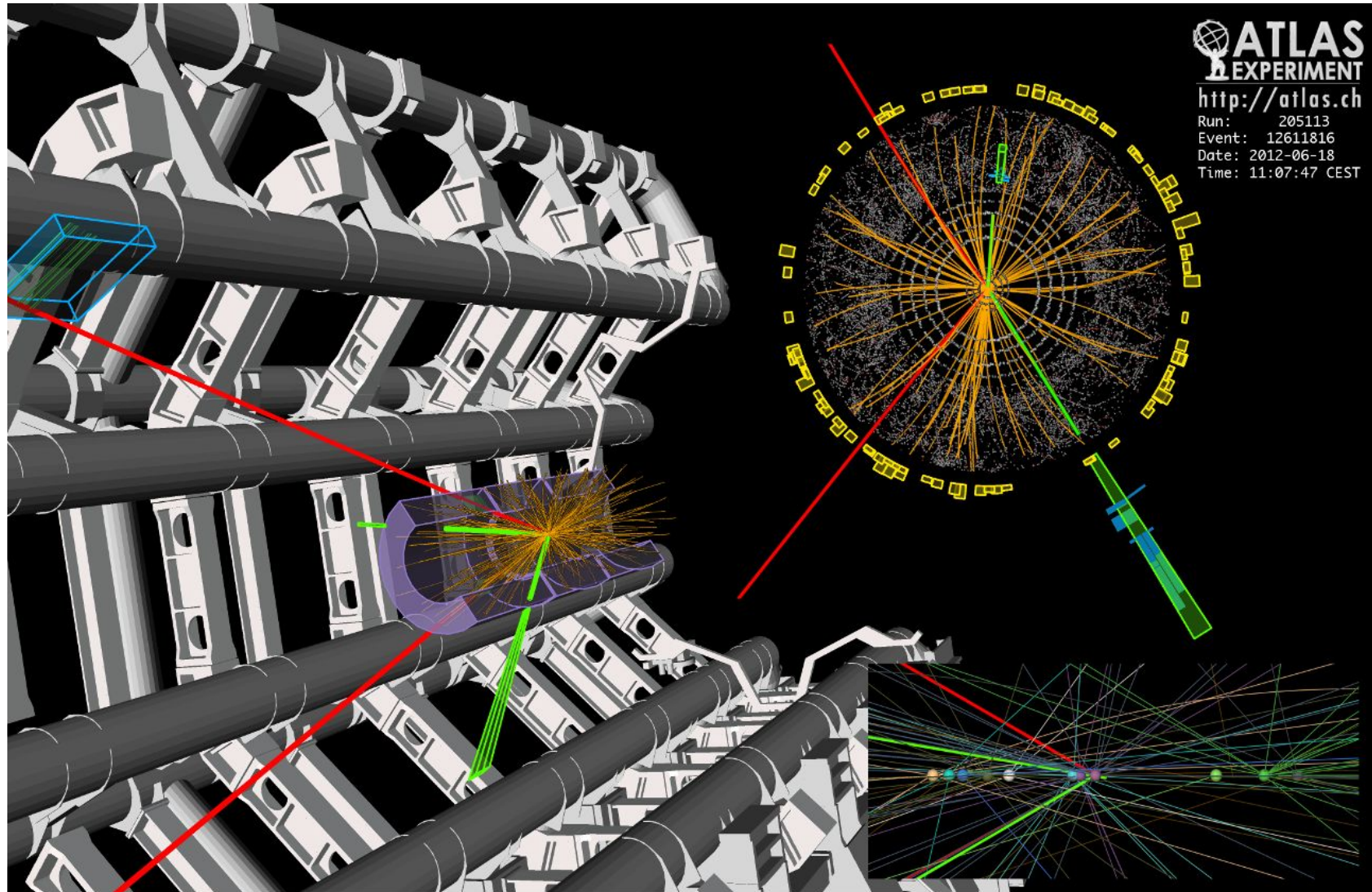
- Posición, energía, masa, carga, tiempo... Queremos identificar las partículas de la colisión.
- Propiedades de las partículas:
  - Masa,
  - carga,
  - forma de interacción.





# Identificación de partículas

¡Datos que serán de vital importancia para el desarrollo de la trama!

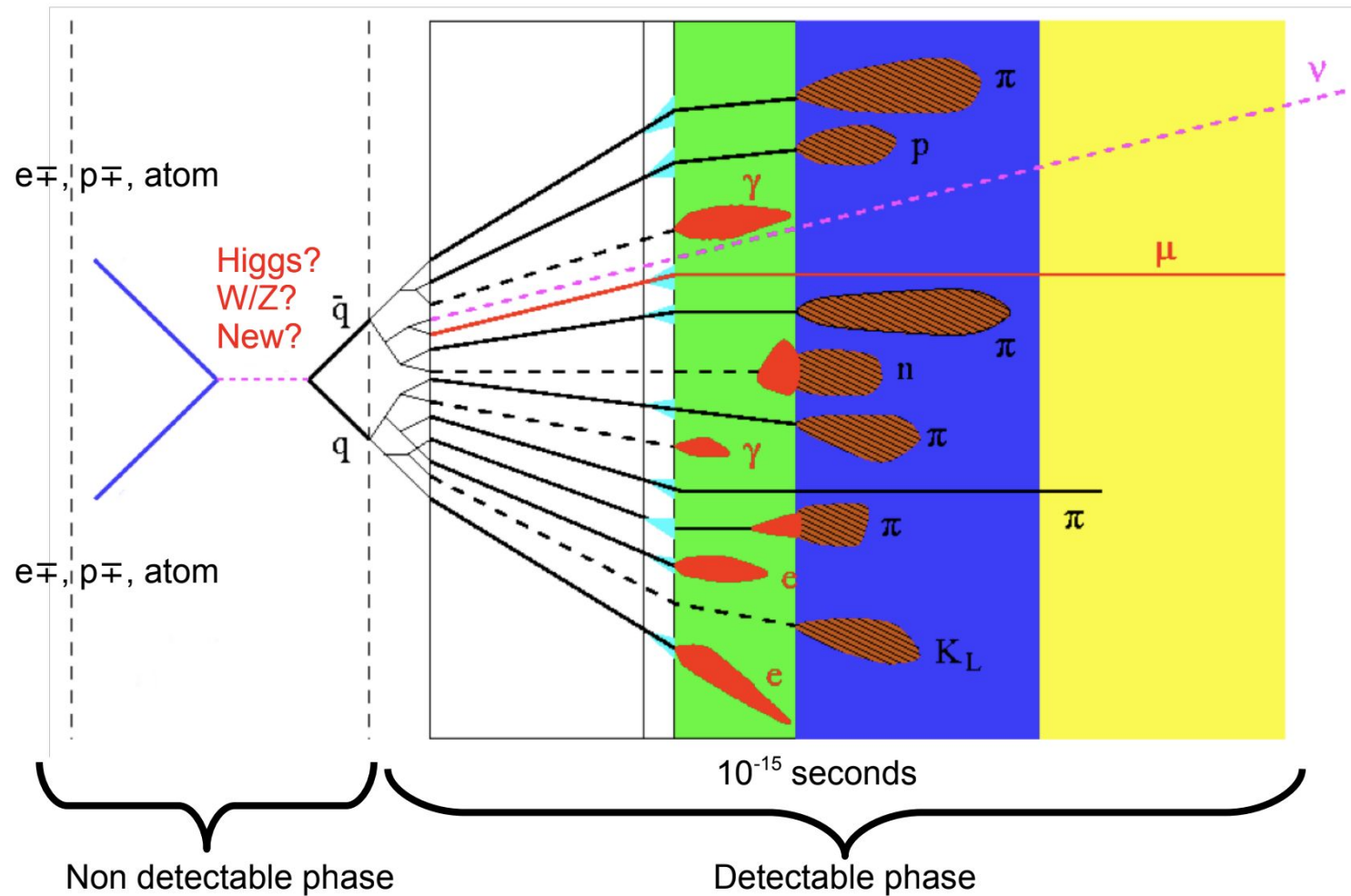


- Posición, energía, masa, carga, tiempo... Queremos identificar las partículas de la colisión.
- Propiedades de las partículas:
  - Masa,
  - carga,
  - forma de interacción.
- *Tracking* es la reconstrucción de la trayectoria de partículas cargadas en un detector.
- ¡Partículas cargadas estables!
- Es una medición no destructiva.
- Usamos campos magnéticos para determinar el momento y la carga de la partícula.



# Partículas estable

- Solo podemos identificar partículas con un tiempo de vida *largo*.

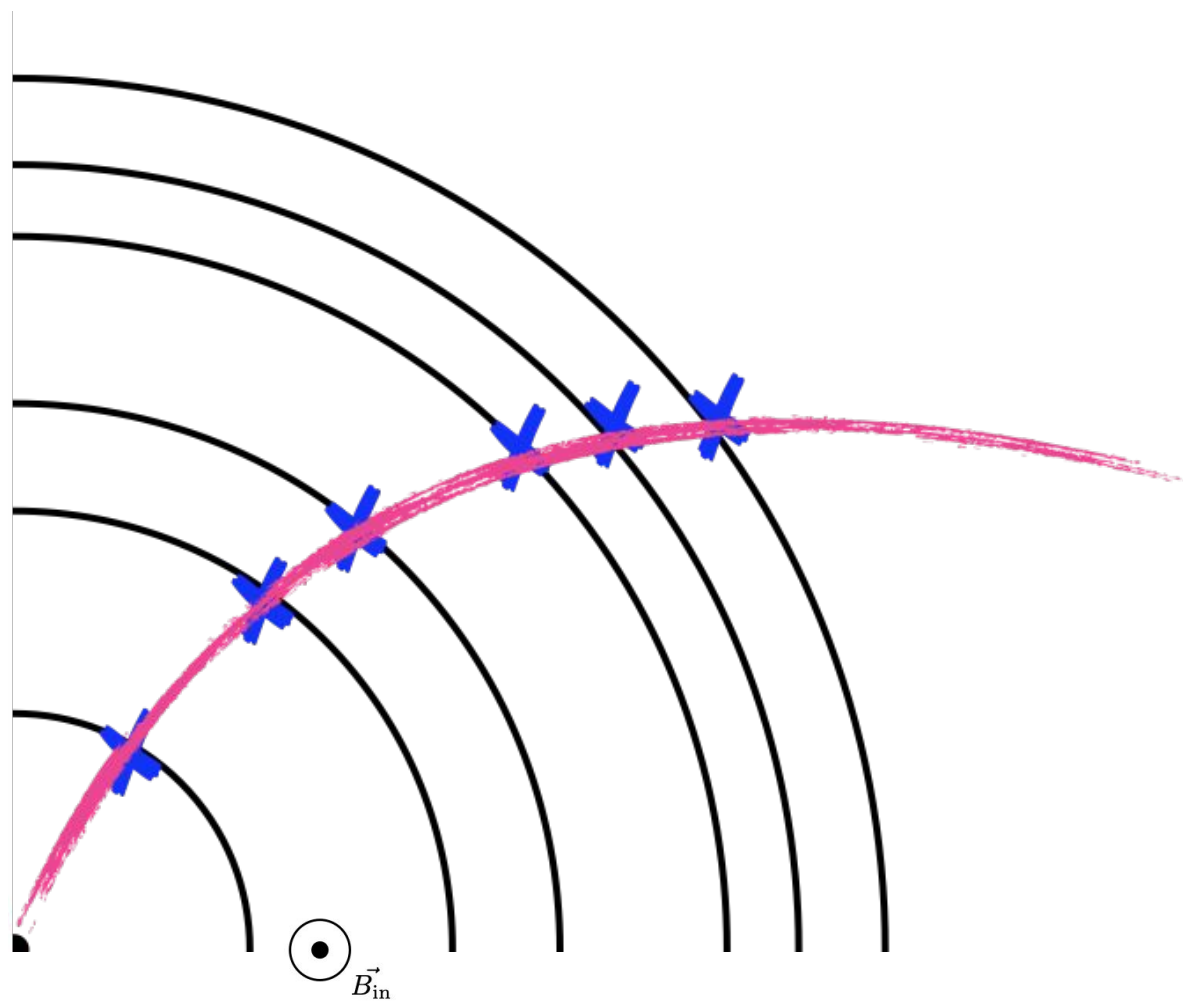


- Partículas inestables:
  - se identifican mediante la reconstrucción de las partículas estables que salen a partir de su desintegración.
- Partículas estables:
  - atraviesan el detector, y no se desintegran dentro de éste.
  - partículas cargadas:  $\pi^{\pm}, k^{\pm}$ , muones, electrones y protones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

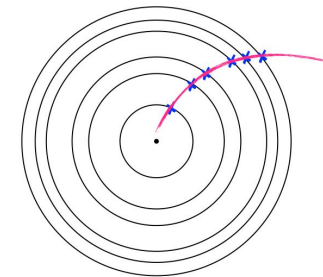


# ¿Cómo se generan los *hits* $\times$ ?

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



Vista completa



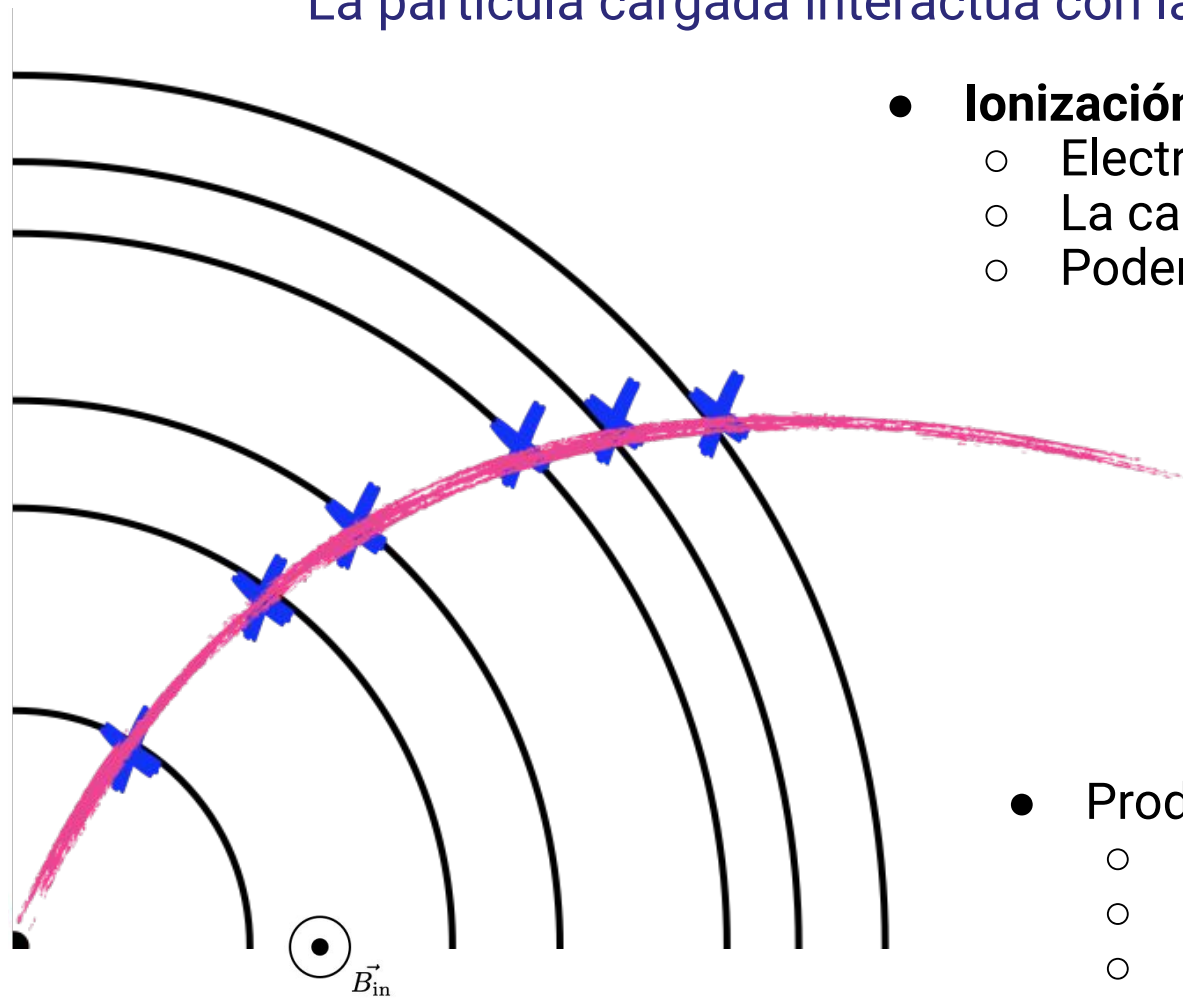




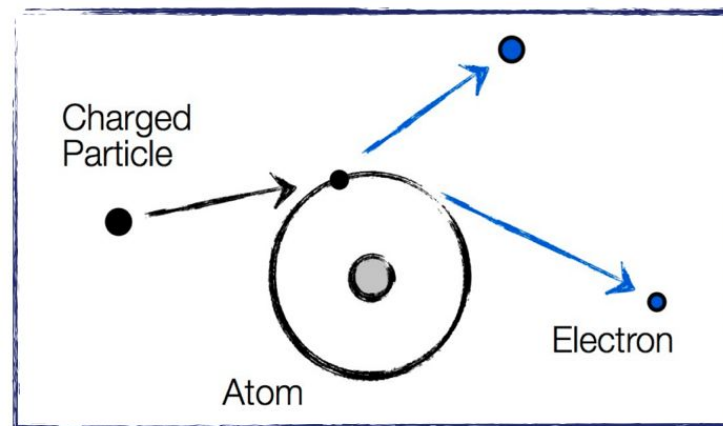
# ¿Cómo se generan los *hits* ✕ ?

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

La partícula cargada interactúa con la materia

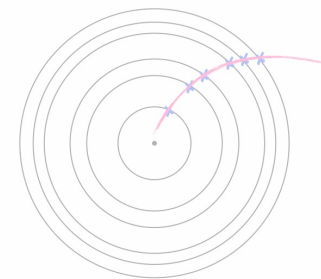


- **Ionización** (principal):
  - Electrones son arrancados del átomo.
  - La carga puede ser detectada.
  - Podemos medir por donde pasó la partícula (*hit*).



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

Vista completa



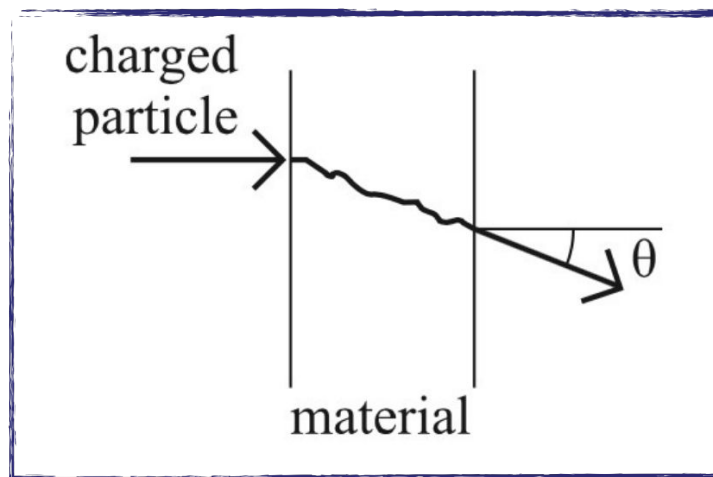


# ¿Cómo se generan los *hits* $\times$ ?

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

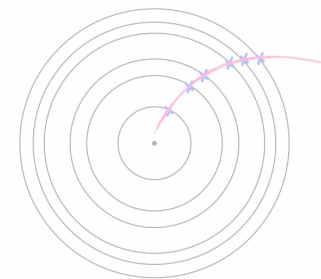
La partícula cargada es afectada por la interacción con la materia.

- **Multiple Coulomb Scattering** (dispersión múltiple):
  - deflexión 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).

Vista completa



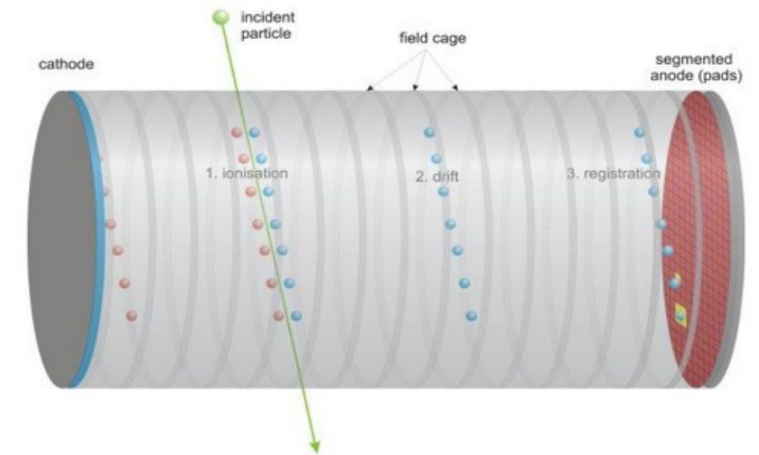


# Tecnologías de *trackers*

- Existen 3 tecnologías de detectores principalmente usadas para *tracking*.

eg. Time Projection Chamber (TPC)  
Image by *O. Schäfer*

- 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).



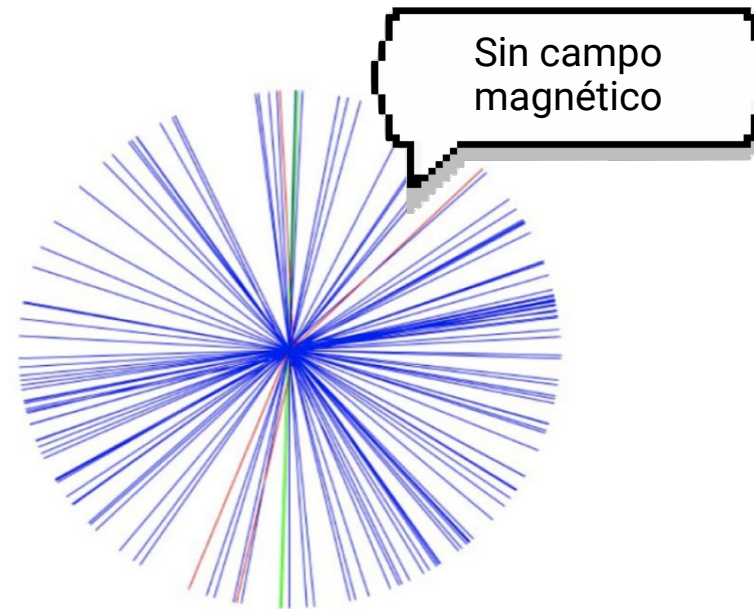
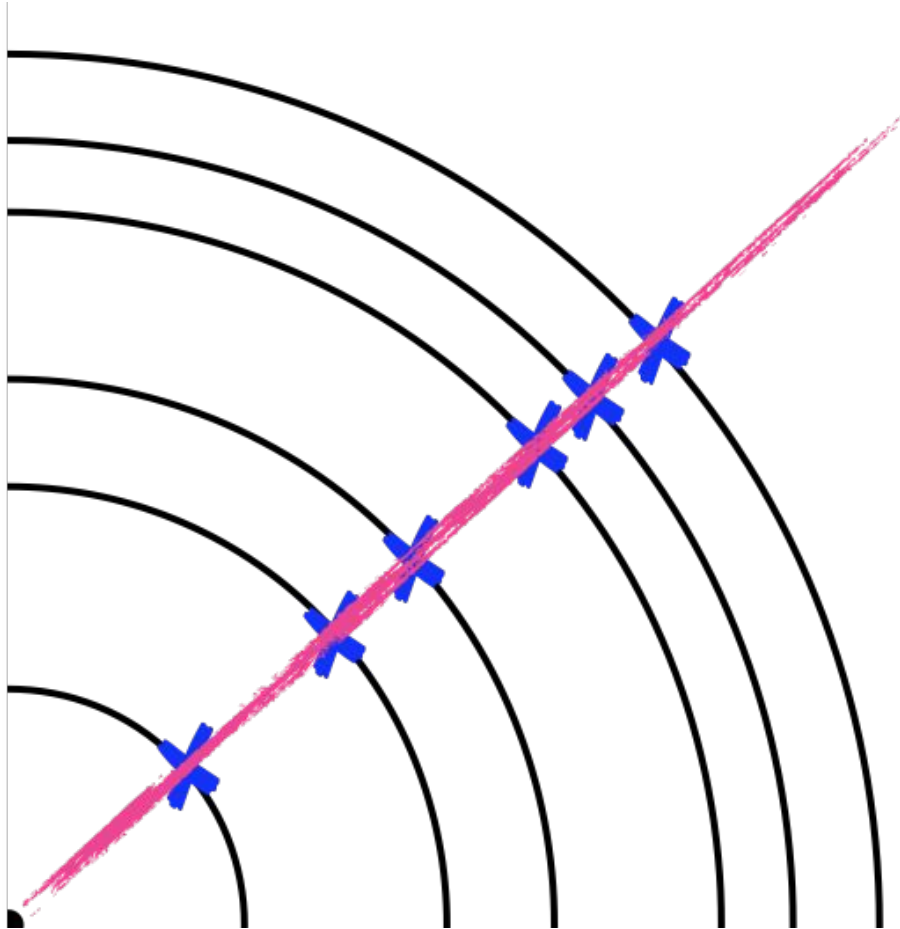
Reconstruyendo las trayectorias...





# Partículas cargadas

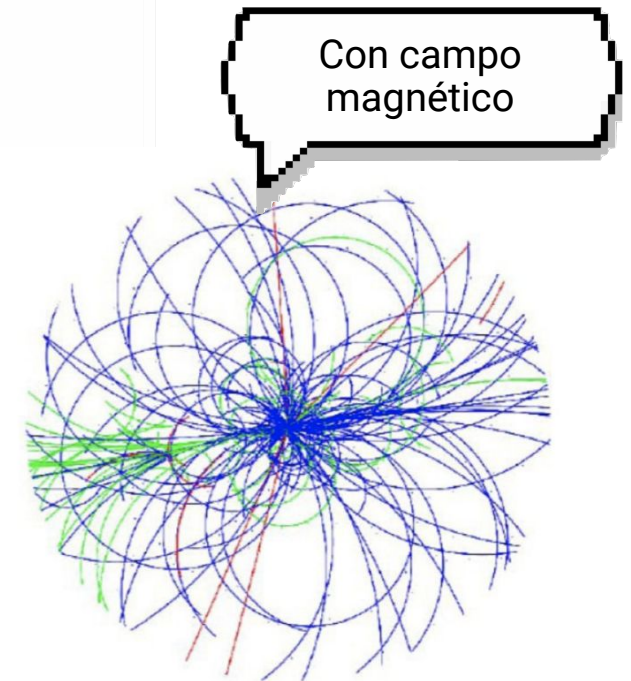
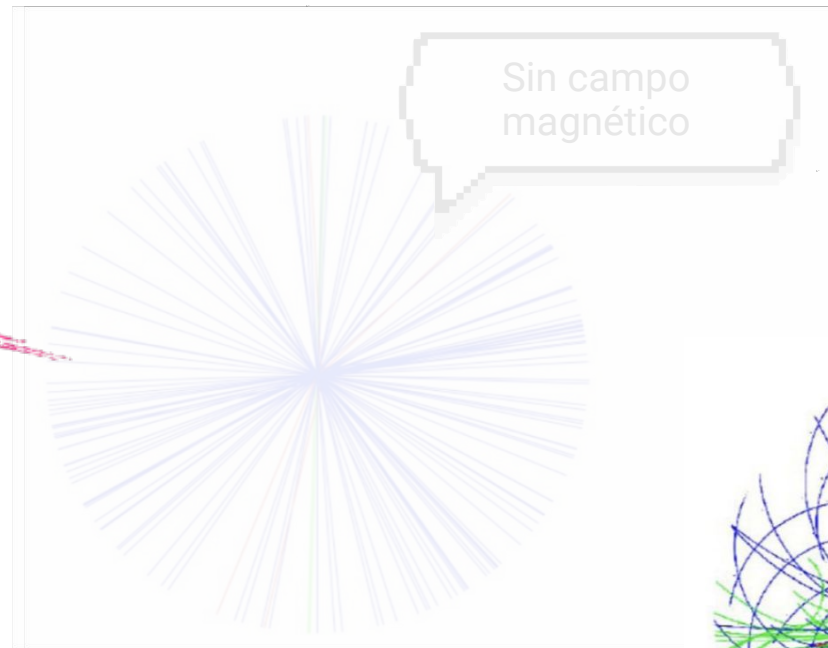
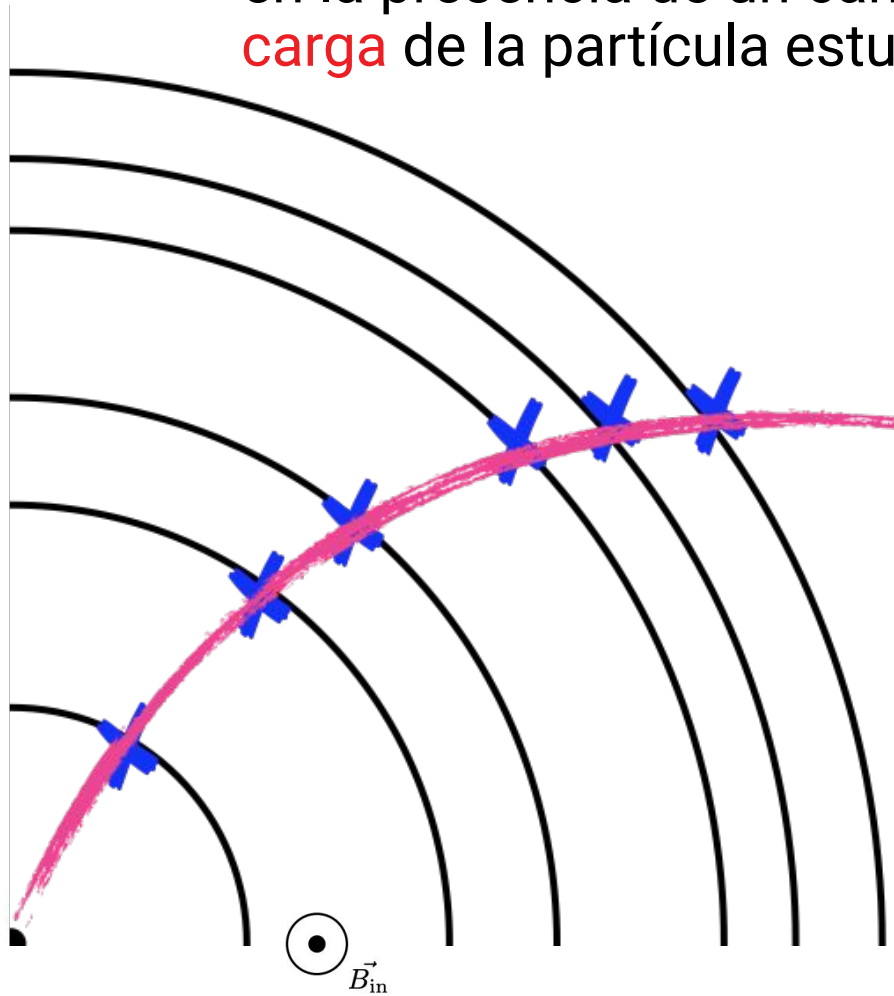
- Partículas cargadas atravesando un detector de ionización.
  - sin campo magnético.





# 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:*

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



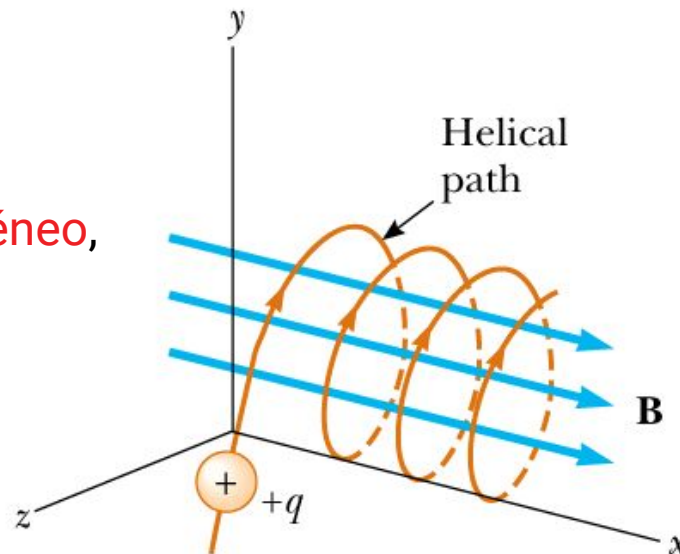
# Partículas cargadas en un campo magnético

- 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.

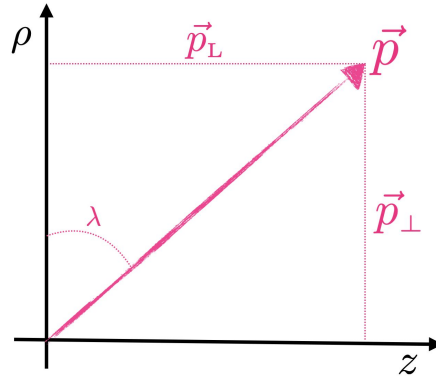
- En el caso de un campo magnético **homogéneo**, la trayectoria es dada por una hélice.





# Partículas cargadas en un campo magnético

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

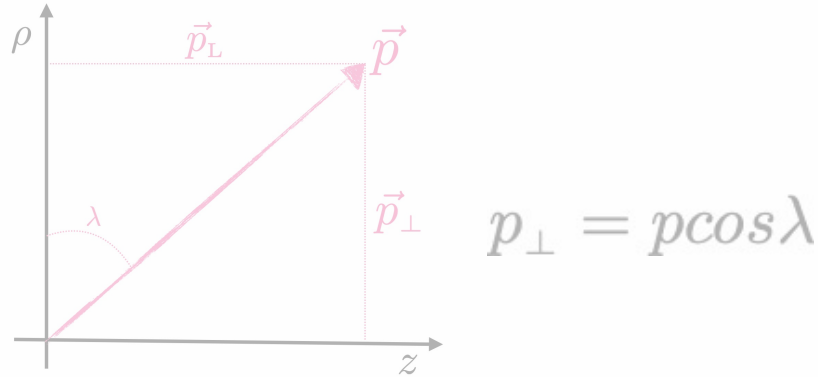


$$p_{\perp} = p \cos \lambda$$



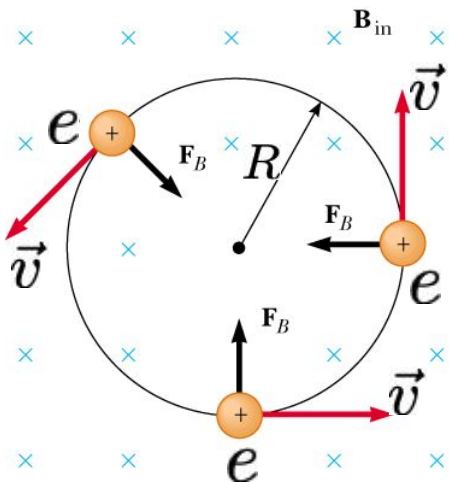
# Partículas cargadas en un campo magnético

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



- Una partícula de carga  $e$  viajando de forma transversal al campo magnético con velocidad  $\mathbf{u}$ , va a experimentar una fuerza  $\mathbf{Bev}$ , perpendicular a su trayectoria de movimiento.

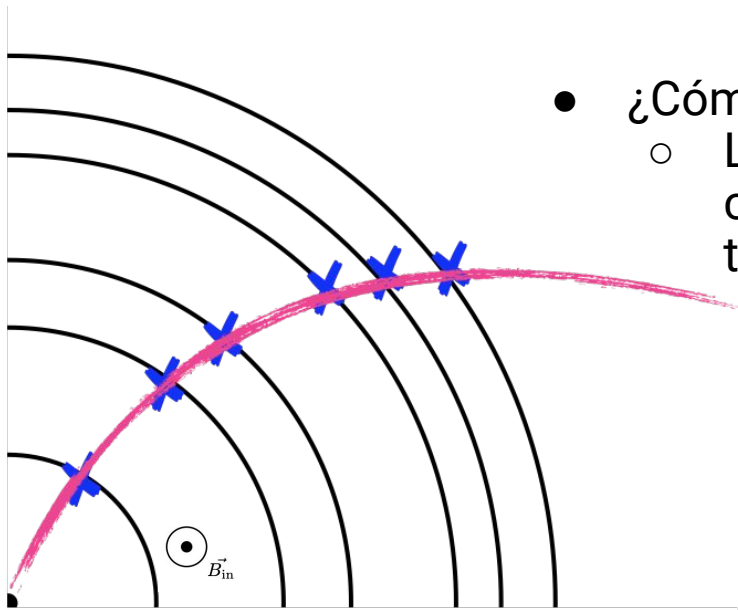
$$\vec{F}_B = e\vec{v} \times \vec{B}$$



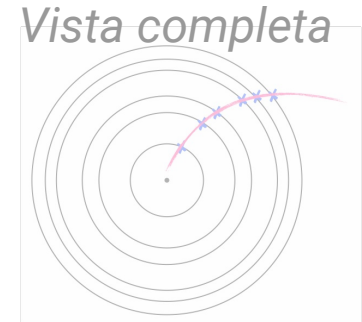
- La partícula seguirá una trayectoria circular de radio  $R$ .
- La aceleración de la partícula en esta trayectoria circular es:  $a = v^2/R$
- El movimiento de la partícula puede ser descrito por: 
$$Bev = \frac{mv^2}{R}$$
- Y componente perpendicular del momento:  $p_{\perp} = mv = (Be)R$ 
  - en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



# Partículas cargadas en un campo magnético



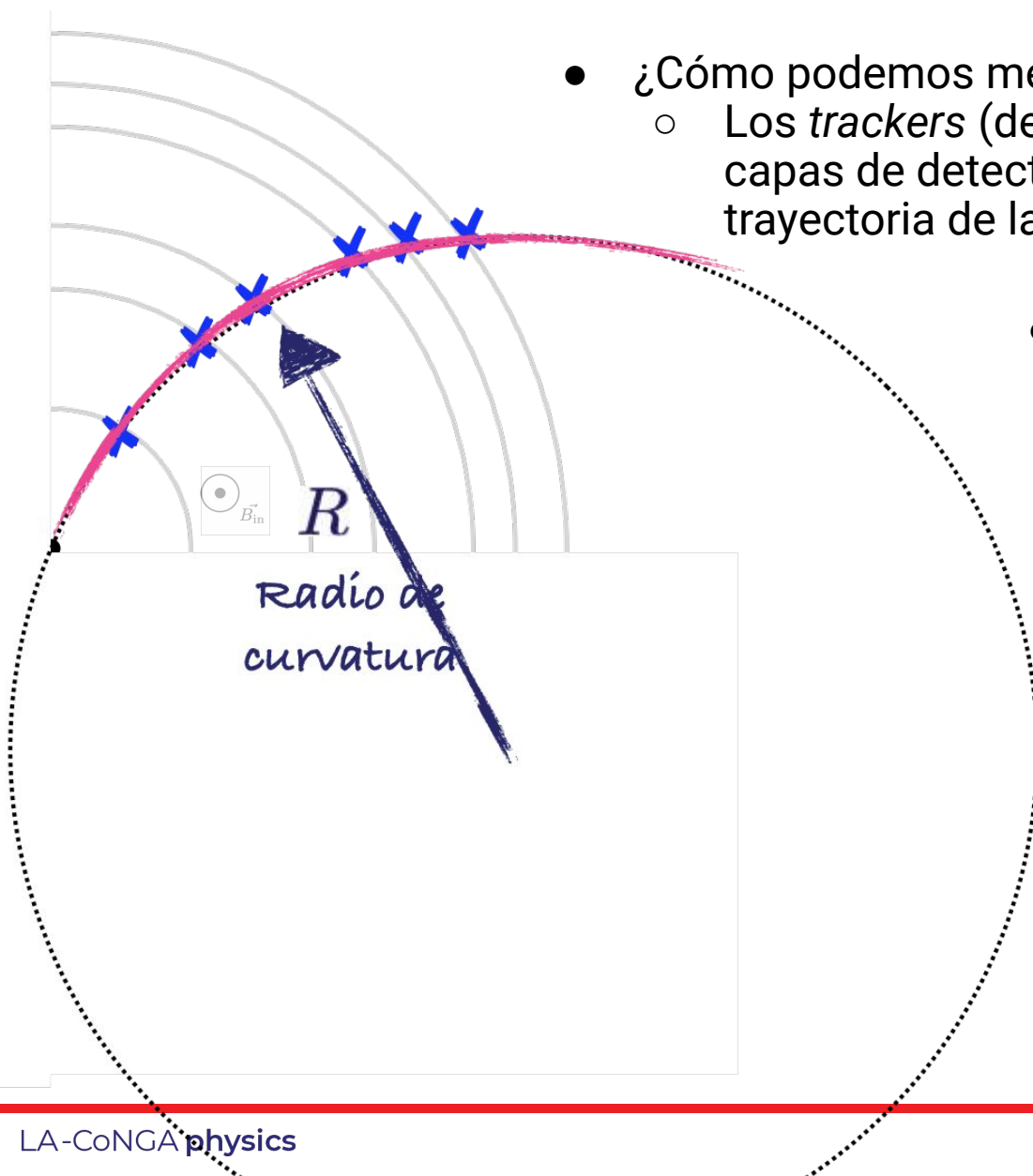
- ¿Cómo podemos medir la curvatura de la trayectoria?
  - Los *trackers* (detectores de trayectorias) están diseñados por capas de detectores/sensores sucesivos. Así podemos medir la trayectoria de la partícula en este detector.





# Partículas cargadas en un campo magnético

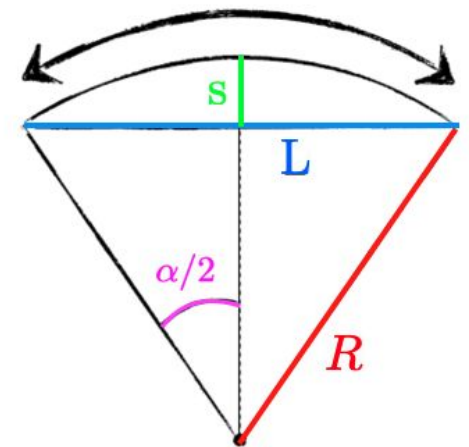
- ¿Cómo podemos medir la curvatura de la trayectoria?
  - Los *trackers* (detectores de trayectorias) están diseñados por capas de detectores/sensores sucesivos. Así podemos medir la trayectoria de la partícula en este detector.



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

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

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

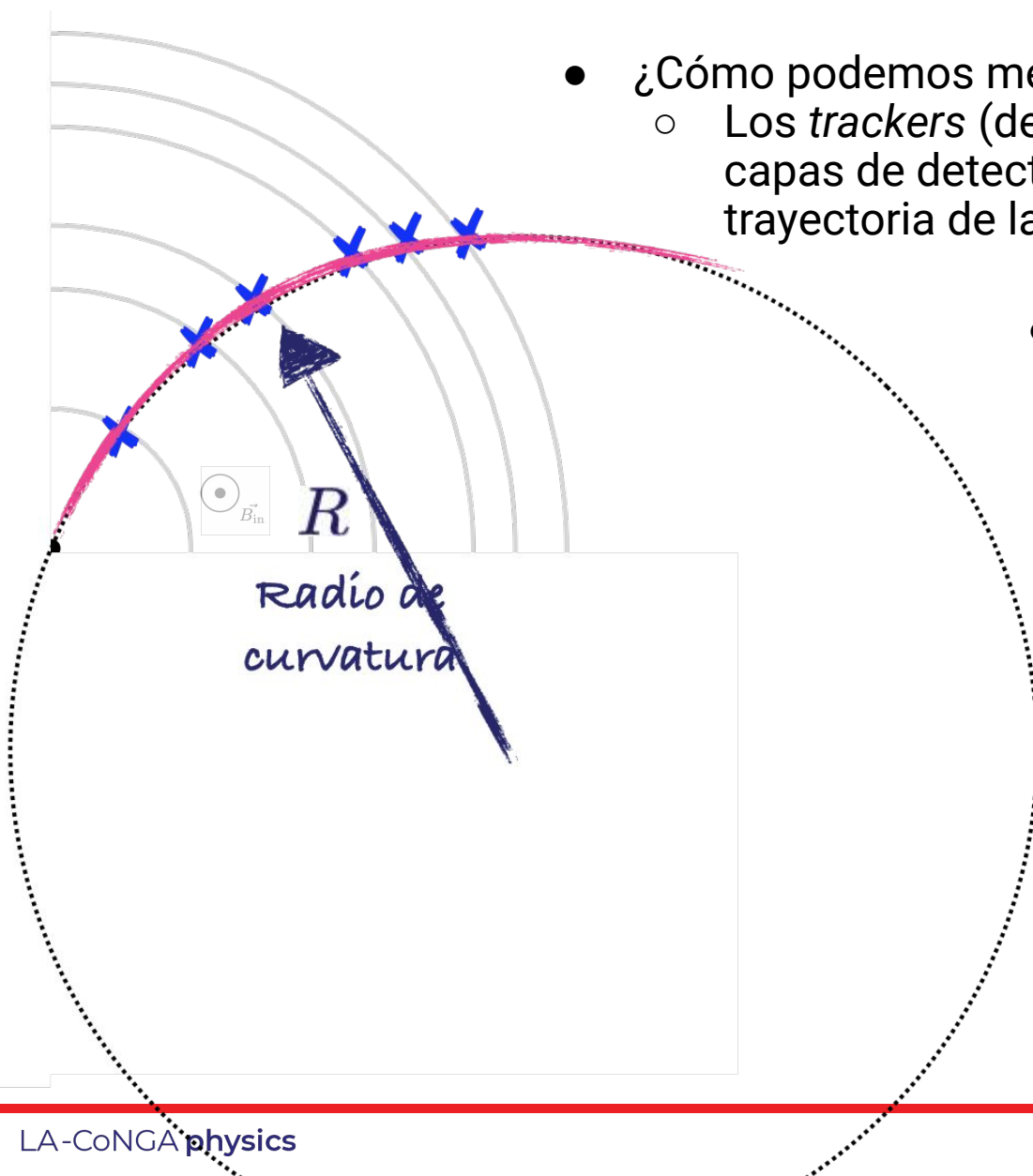
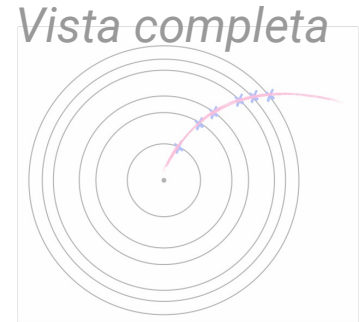






# Partículas cargadas en un campo magnético

- ¿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.



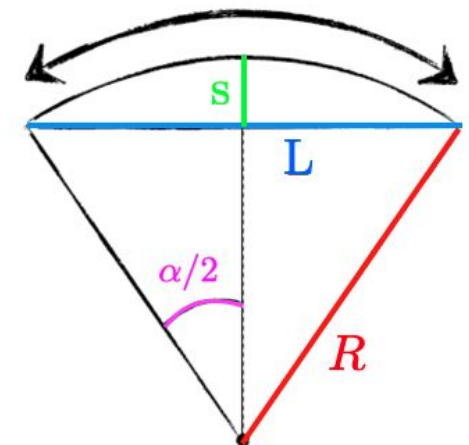
- Podemos medir la sagita,  $s$ , para calcular el radio  $R$ .

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

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

Para ángulos pequeños hacemos una expansión de series del coseno:

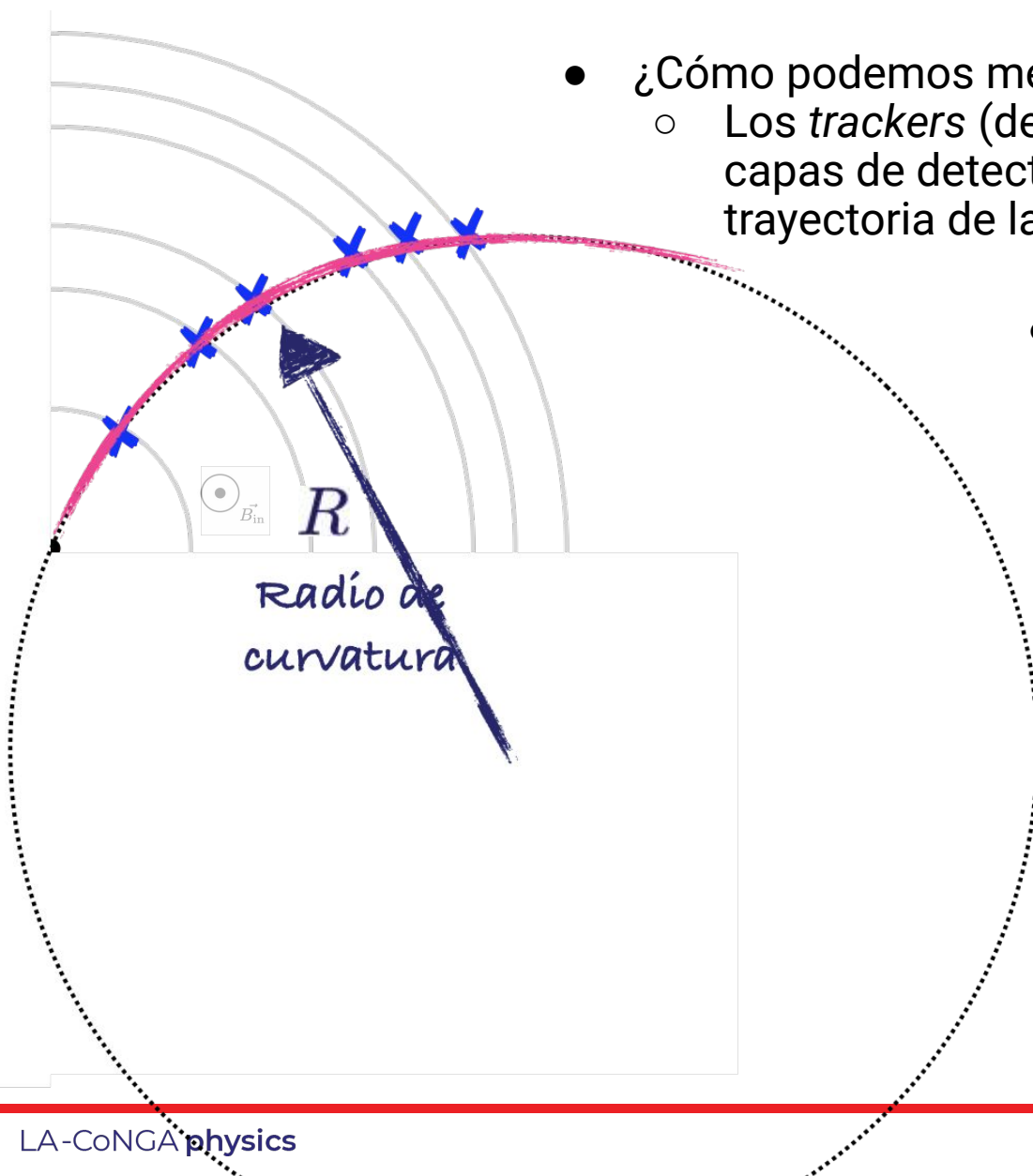
$$\cos(x) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \dots$$





# 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.

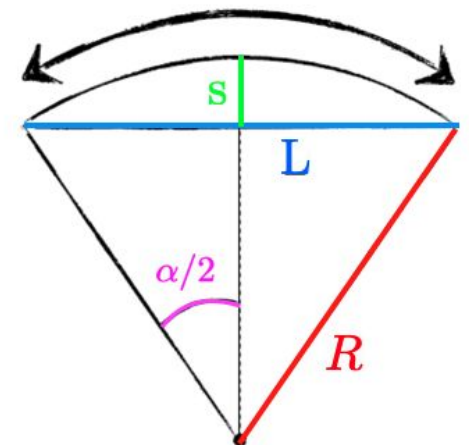


- Podemos medir la sagita,  $s$ , para calcular el radio  $R$ .

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

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

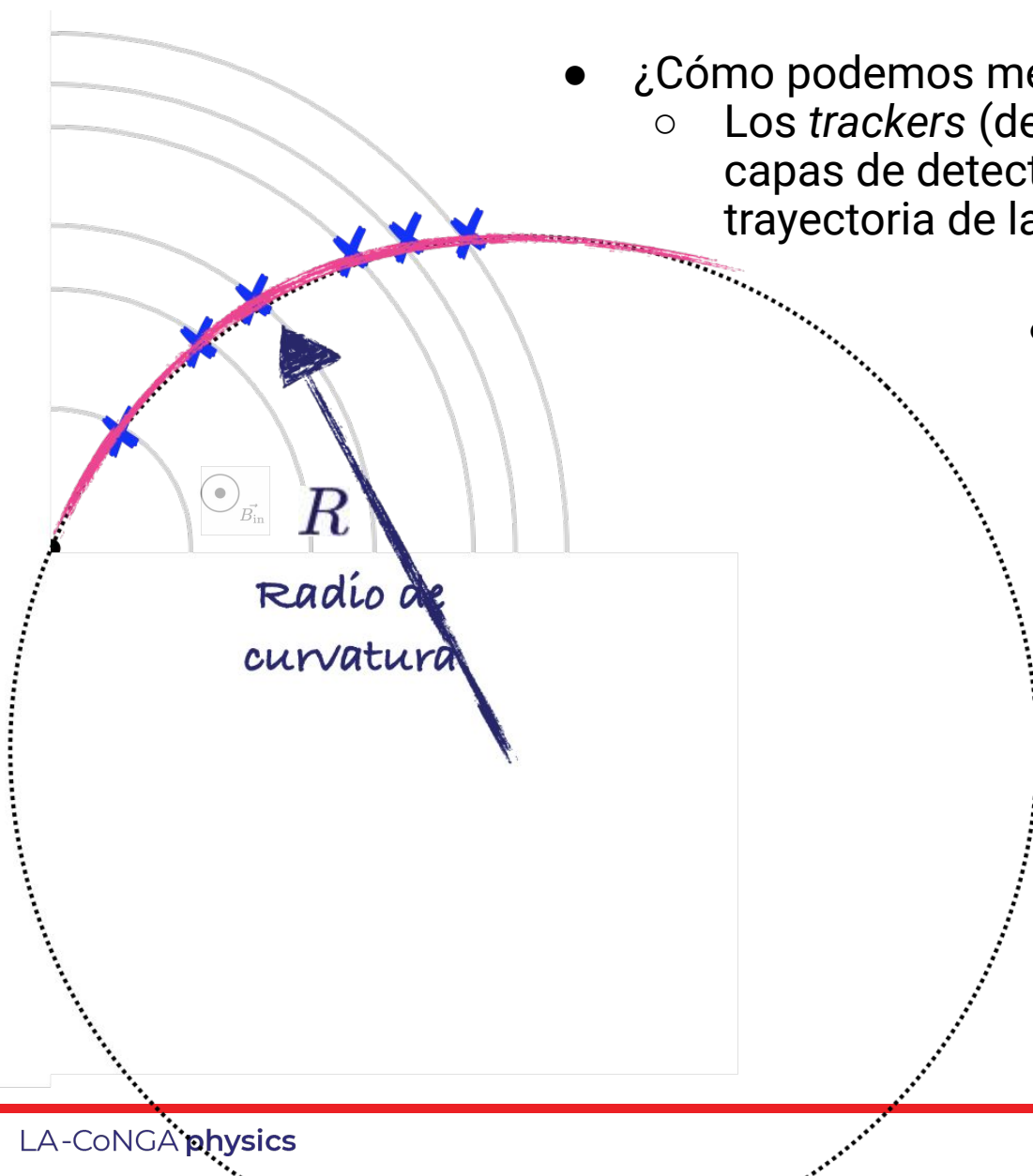
$$s \approx \frac{R\alpha^2}{8}$$





# 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  $R$ .

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

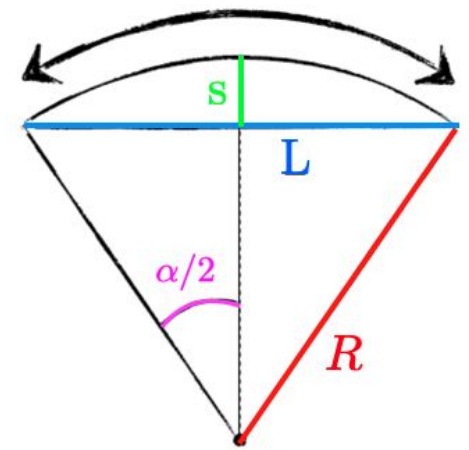
$$s = R - R \cos(\alpha/2) \approx R - R \left(1 - \frac{\alpha^2}{8}\right)$$

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

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

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

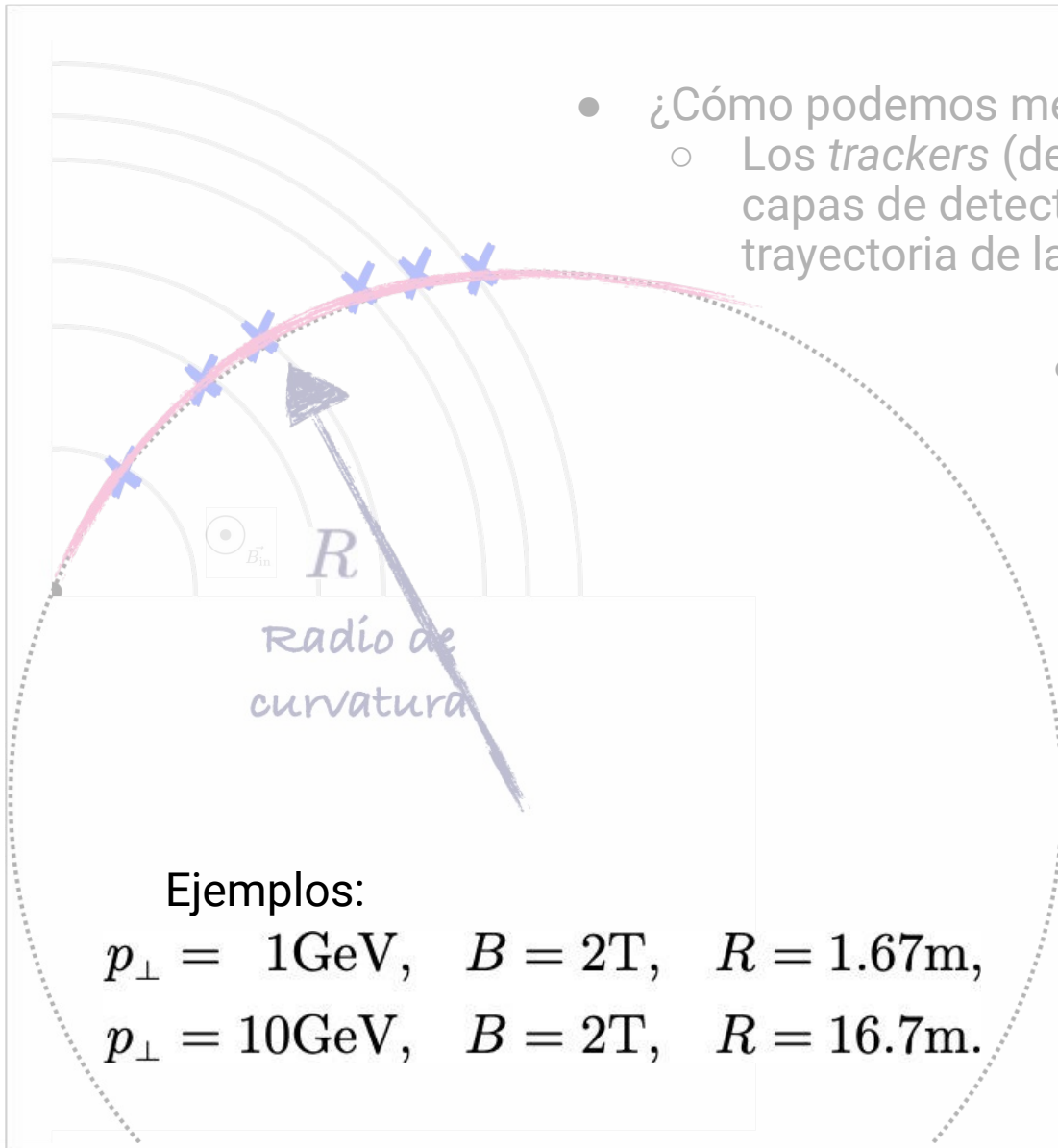
$$R = \frac{L^2}{8s}$$





# 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  $R$ .

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

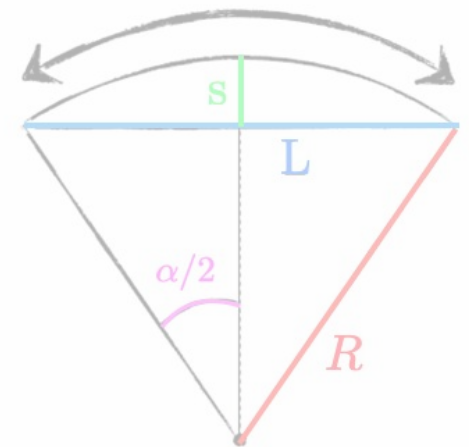
$$s = R - R \cos(\alpha/2) \approx R - R \left(1 - \frac{\alpha^2}{8}\right)$$

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

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

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

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





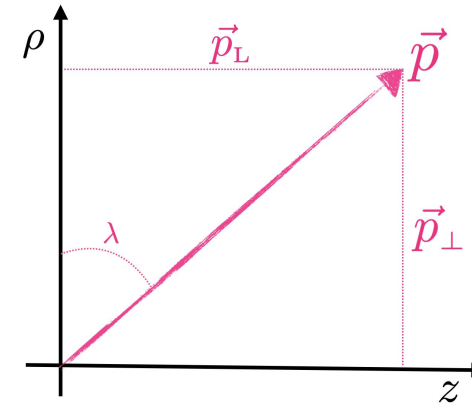
# Partículas cargadas en un campo magnético

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

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

Momento total:

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



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

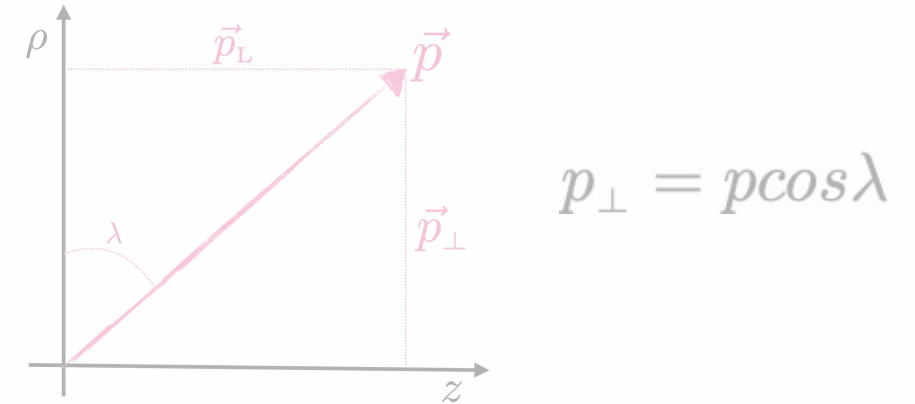
$$p[\text{GeV}/c] = \frac{0.3BR}{\cos \lambda}$$



# 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*).  $\left(\frac{\sigma_p}{p^2}\right)^2 = \text{const.} \left(\frac{p_T}{BL^2}\right)^2 + \text{const.} \left(\frac{1}{B\sqrt{LX_0}}\right)^2$





# Incertidumbre en la medición del momento

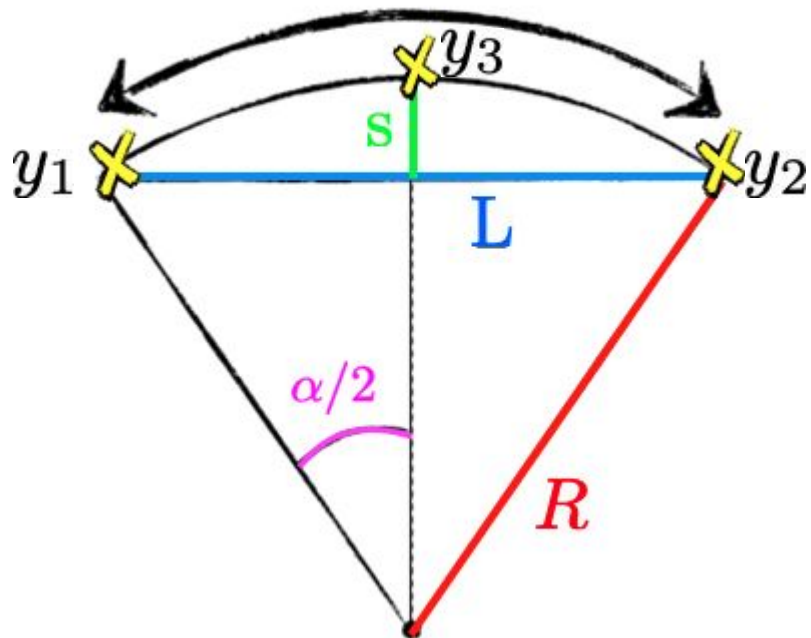
- Error en la medición del radio de curvatura (R):  $\frac{\Delta p}{p} \propto \frac{\Delta R}{R} = \frac{L^2}{8s} \cdot \frac{\Delta s}{s}$

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

$$\frac{\sigma_p}{p} = \frac{L^2}{8Rs} \cdot \frac{\sigma_s}{s} = \frac{L^2}{8R} \cdot \frac{\sigma_s}{L^4/64R^2} = \frac{\sigma_s}{L^2} \cdot 8R = \frac{\sigma_s}{L^2} \cdot \frac{8p}{eB} \sim p \cdot \frac{\sigma_s}{BL^2}$$

Buena resolución en el momento:

- buena medición de la sagita,
- alto campo magnético,
- longitud de la trayectoria larga.



Caso más sencillo: consideremos 3 *hits* (mediciones).

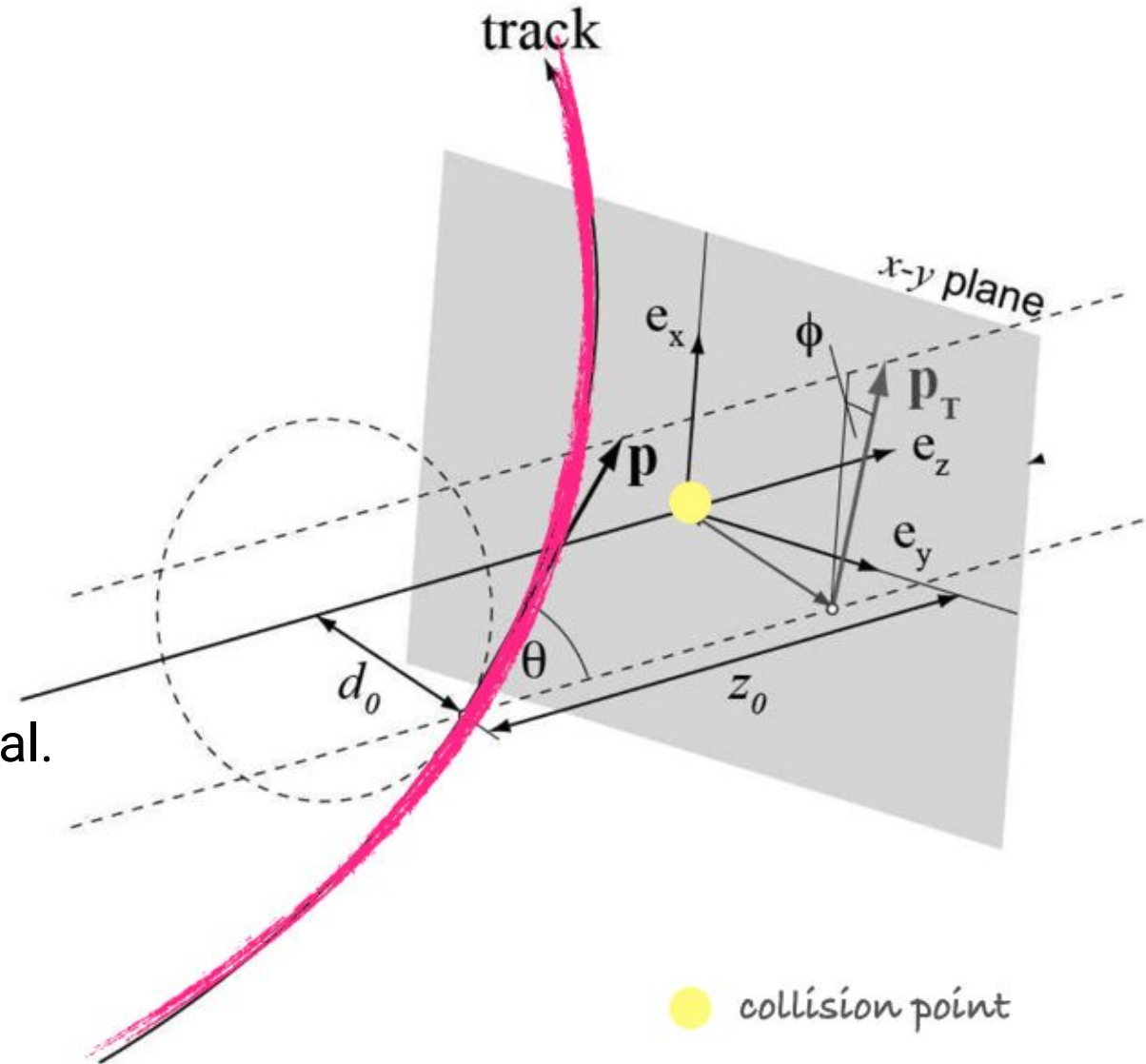
$$s = y_3 - \left( \frac{y_1 + y_2}{2} \right) \quad \sigma_s = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma_y \sim \sigma_y$$

$$\frac{\sigma_p}{p^2} \sim \frac{\sigma_y}{BL^2}$$



# Parámetros de una trayectoria

- Podemos parametrizar la trayectoria con:
  - $d_0$ , parámetro de impacto radial,
  - $z_0$ , parámetro de impacto longitudinal,
  - $\phi$ , ángulo azimutal,
  - $\theta_0$ , ángulo polar,
  - $q/p_T$ , carga sobre el momento transversal.

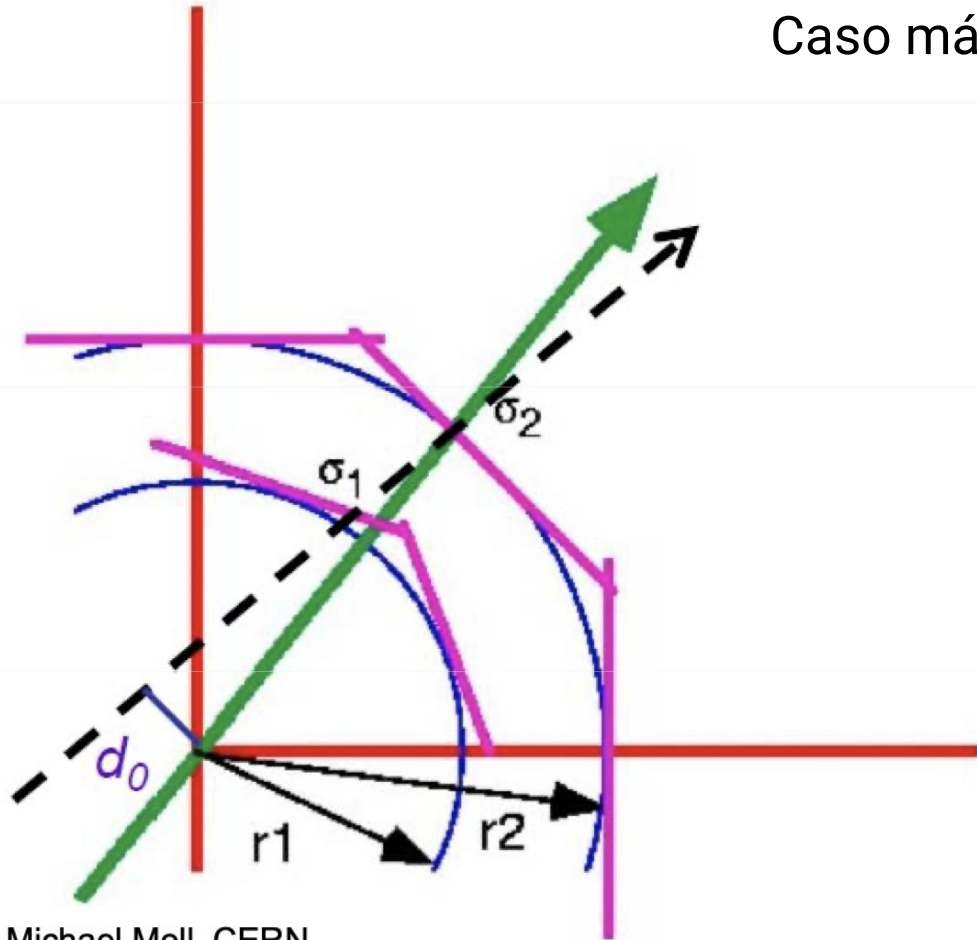


● collision point



# Resolución del parámetro de impacto

- Incertidumbre (resolución) en el parámetro de impacto,  $d_0$ , depende de la precisión del radio y de la precisión con la que medimos el *hit* con los detectores ( $\sigma_i$ ).



Caso más sencillo: dos capas de detector.

$$\sigma_{d_0}^2 = \frac{r_2^2 \sigma_1^2 + r_1^2 \sigma_2^2}{(r_2 - r_1)^2}$$

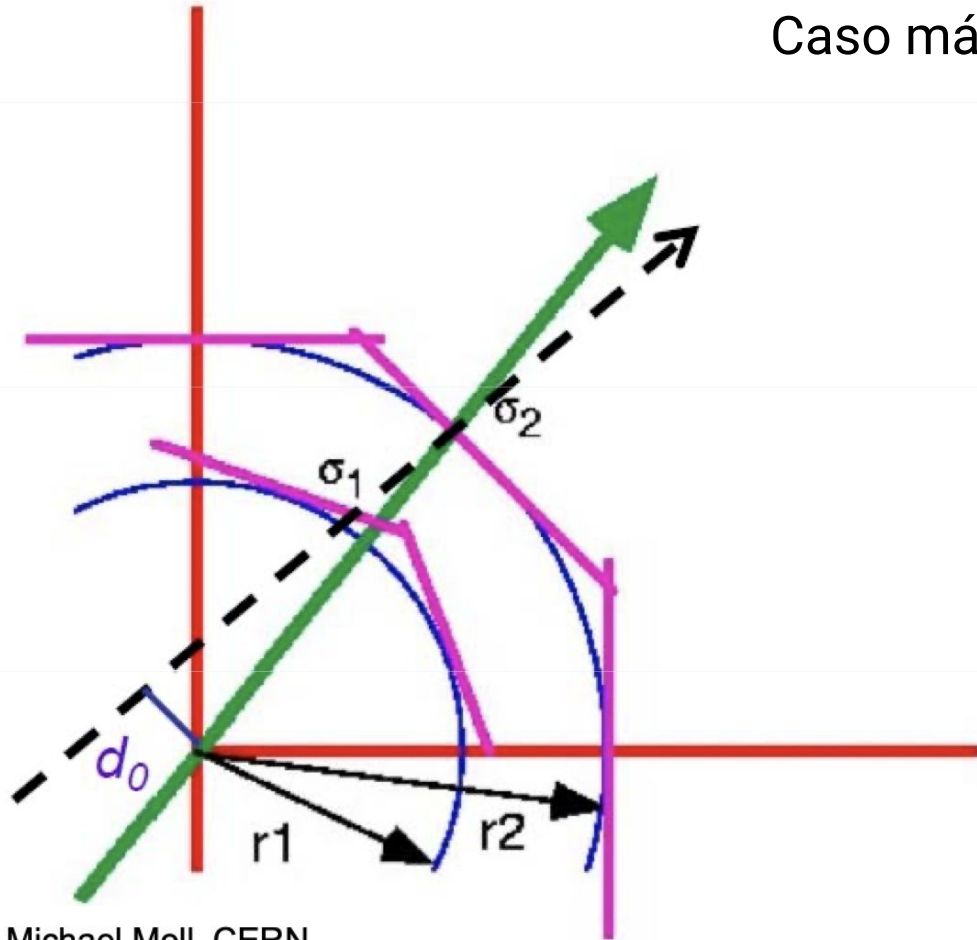
Sugiere que la resolución se puede optimizar con un radio interno  $r_1$  pequeño y un radio externo  $r_2$  grande; y buena resolución en la medición de los puntos de interacción de la partícula (hits).

From Michael Moll, CERN



# Resolución del parámetro de impacto

- Incertidumbre (resolución) en el parámetro de impacto,  $d_0$ , depende de la precisión del radio y de la precisión con la que medimos el *hit* con los detectores ( $\sigma_i$ ).



Caso más sencillo: dos capas de detector.

$$\sigma_{d_0}^2 = \frac{r_2^2 \sigma_1^2 + r_1^2 \sigma_2^2}{(r_2 - r_1)^2} + \sigma_{\text{MS}}^2$$

Sugiere que la resolución se puede optimizar con un radio interno  $r_1$  pequeño y un radio externo  $r_2$  grande; y buena resolución en la medición de los puntos de interacción de la partícula (hits).

Aquí también la precisión se degrada debido al *multiple scattering*.

From Michael Moll, CERN



# Resolución del parámetro de impacto

- En un detector real (materia), las partículas se ven afectadas por la dispersión múltiple.
- El ángulo de dispersión es inversamente proporcional al momento, por lo que la contribución al error constante en  $1/p$ .

$$\sigma_{d0} \approx \sqrt{\frac{r_2^2 \sigma_1^2 + r_1^2 \sigma_2^2}{(r_2 - r_1)^2}} \oplus \frac{r}{p \sin^{3/2} \theta} 13.6 \text{ MeV} \sqrt{\frac{\chi}{\chi_0}} \quad \frac{\chi}{\chi_0} \quad \begin{array}{l} \text{longitud de radiación} \\ \text{que atraviesa la} \\ \text{partícula} \end{array}$$



# Resolución del parámetro de impacto

- En un detector real (materia), las partículas se ven afectadas por la dispersión múltiple.
- El ángulo de dispersión es inversamente proporcional al momento, por lo que la contribución al error constante en  $1/p$ .

$$\sigma_{d0} \approx \sqrt{\frac{r_2^2 \sigma_1^2 + r_1^2 \sigma_2^2}{(r_2 - r_1)^2}} \oplus \frac{r}{p \sin^{3/2} \theta} 13.6 \text{ MeV} \sqrt{\frac{\chi}{\chi_0}} \quad \frac{\chi}{\chi_0} \text{ longitud de radiación que atraviesa la partícula}$$

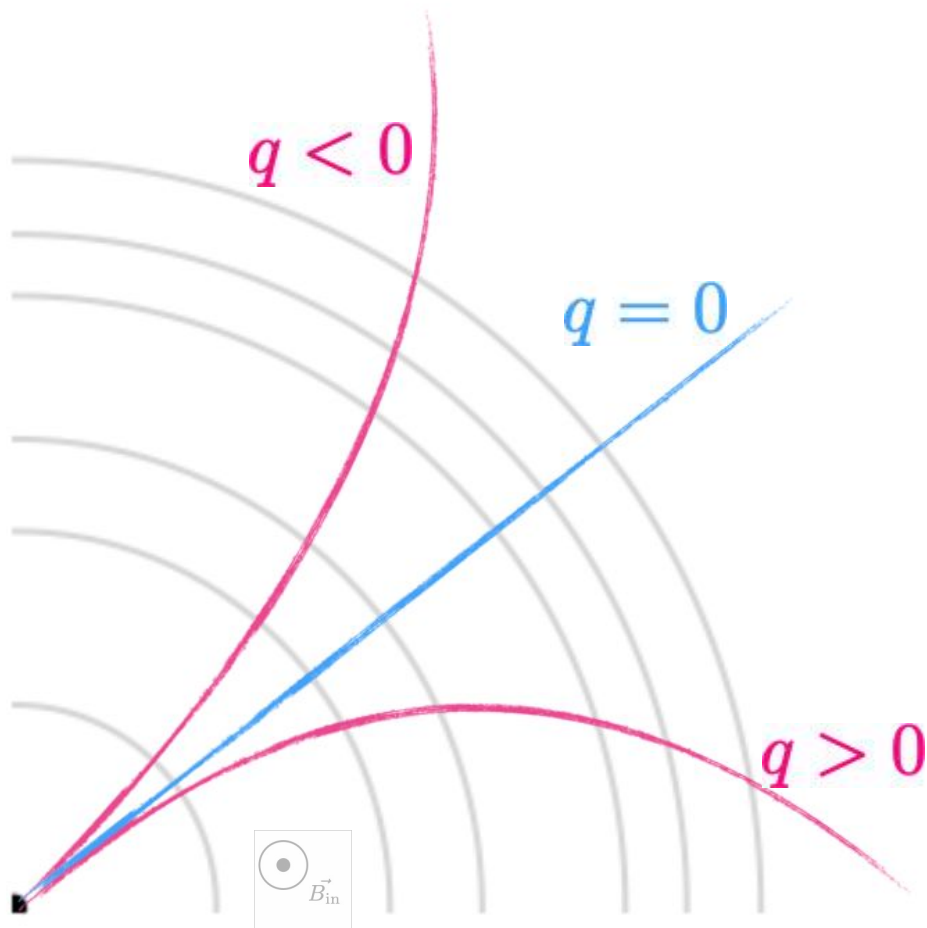
$$\sigma_{d0} \approx \alpha \oplus \frac{b}{p_T \sin^{1/2} \theta} \quad \text{a mayor momento, menos dispersión.}$$

- La mejor **precisión** se obtiene con un radio menor y menor espesor (del material).
  - Se necesita una medición muy precisa (hits), muy cerca del eje del haz.
  - para reducir la dispersión múltiple se requiere un tubo del haz muy delgado (en términos de longitud de radiación).





# 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.



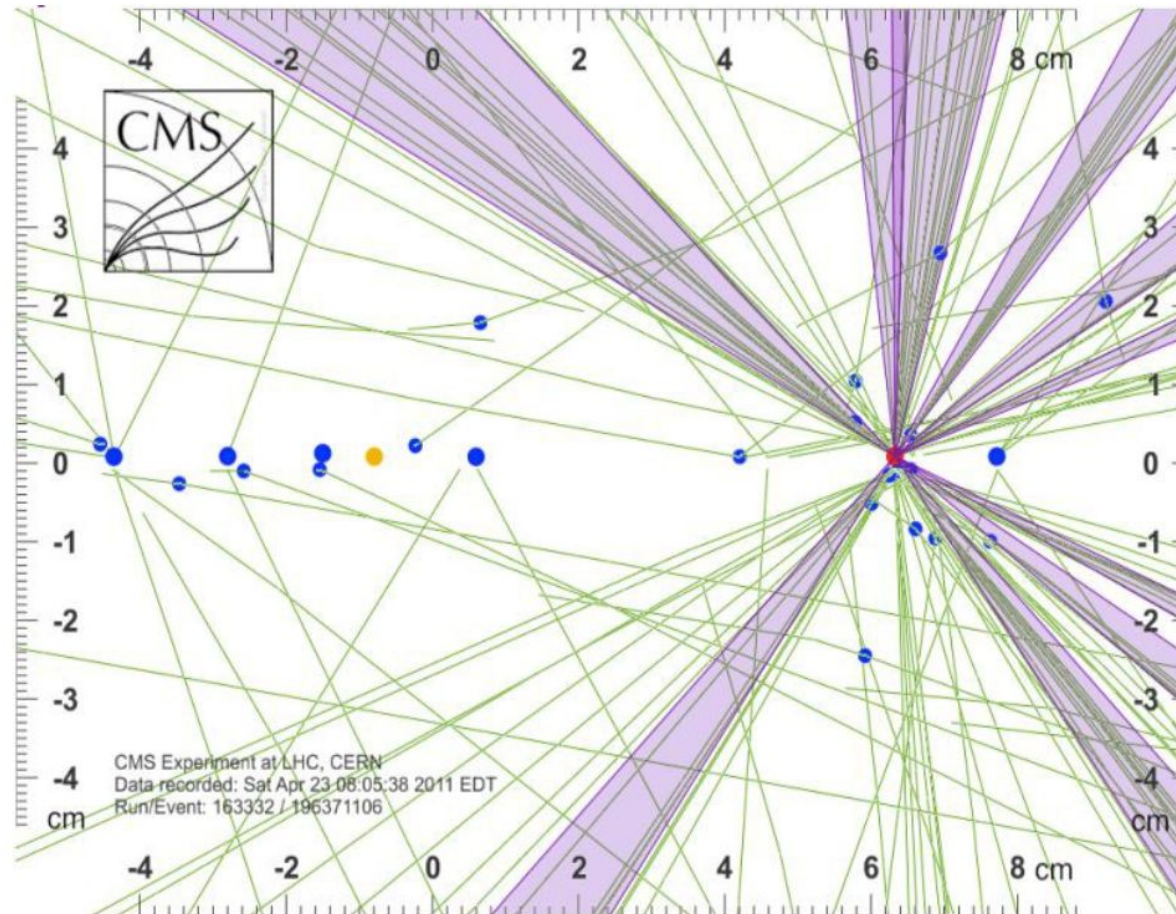
# Vertexing

The background features a dark blue field on the left, transitioning into a complex pattern of overlapping, semi-transparent triangles in various shades of blue and red on the right. The triangles vary in size and orientation, creating a dynamic, geometric composition.



# Vertexing

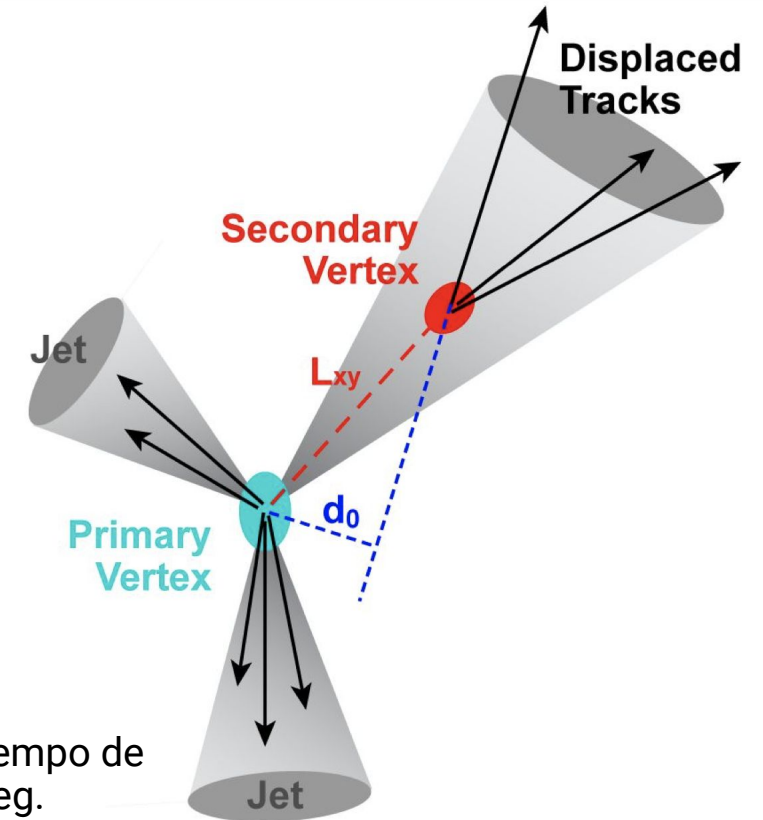
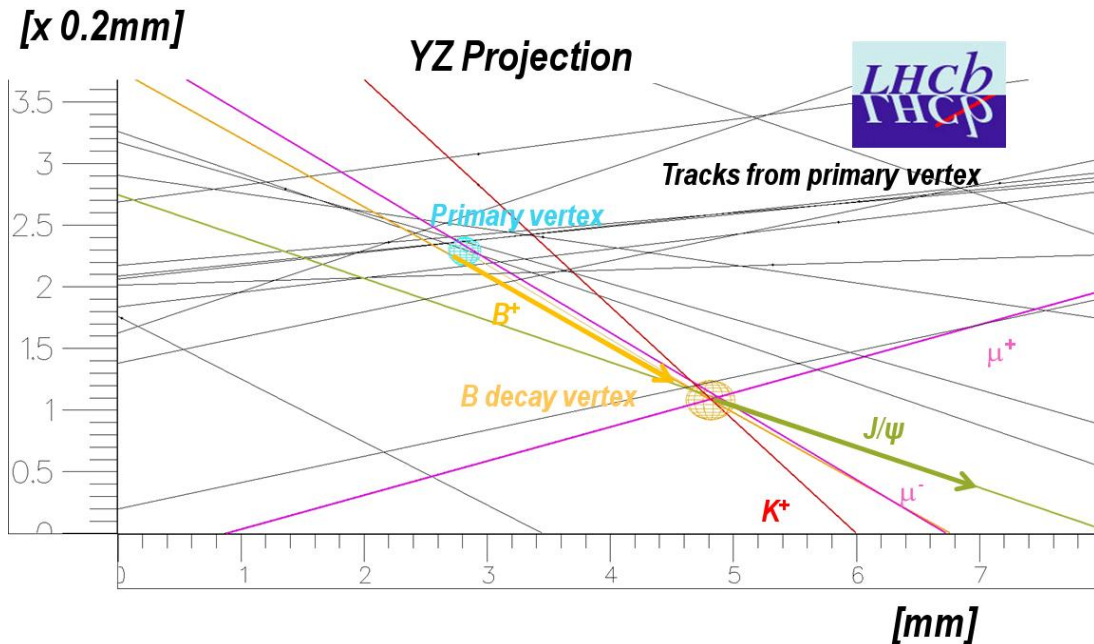
- Una vez identificadas las trayectorias:
  - identificamos las trayectorias ( $\geq 2$ ) originadas en el mismo vértice.
  - Medir las propiedades de los vértices (posición).





# Vertexing

- Una vez identificadas las trayectorias:
  - identificamos las trayectorias ( $\geq 2$ ) originadas en el mismo vértice.
  - Medir las propiedades de los vértices (posición).
- Los vértices nos ayudan a:
  - identificar las partículas no estables a partir del producto del decaimiento,



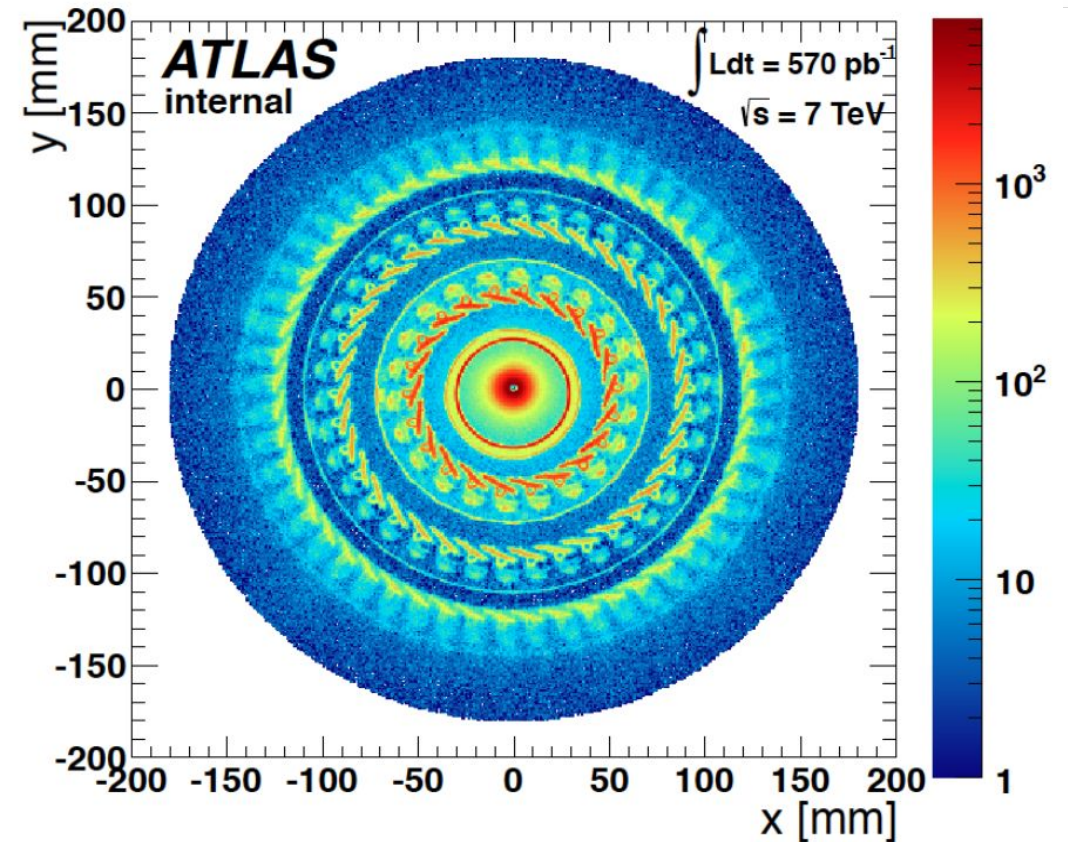
Los quark **b** tienen un tiempo de vida de  $1.5 \times 10^{-12}$  seg.

Viajarán alrededor de  $\sim 4700 \mu\text{m}$ .



# Vertexing

- Una vez identificadas las trayectorias:
  - identificamos las trayectorias ( $\geq 2$ ) originadas en el mismo vértice.
  - Medir las propiedades de los vértices (posición).
- Los vértices nos ayudan a:
  - identificar las partículas no estables a partir del producto del decaimiento,
  - estimar la resolución de la posición,
  - identificar donde y cuanto material tenemos en las capas del detector.







- Una vez identificadas las trayectorias:
  - identificamos las trayectorias ( $\geq 2$ ) originadas en el mismo vértice.
  - Medir las propiedades de los vértices (posición).
- Los vértices nos ayudan a:
  - identificar las partículas no estables a partir del producto del decaimiento,
  - estimar la resolución de la posición,
  - identificar donde y cuanto material tenemos en las capas del detector.
- Técnica para identificar los vértices (matemáticamente):
  - un vértice es el punto que minimiza, simultáneamente, la distancia de un conjunto de partículas.
- Diferentes métodos de fitting para vértices.
  - P. Billoir, S. Quian, [Fast vertex fitting with a local parametrization of tracks](#).
  - A. Strandlie, R. Frühwirth, [Track and vertex reconstruction: From classical to adaptive methods](#).



## 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:

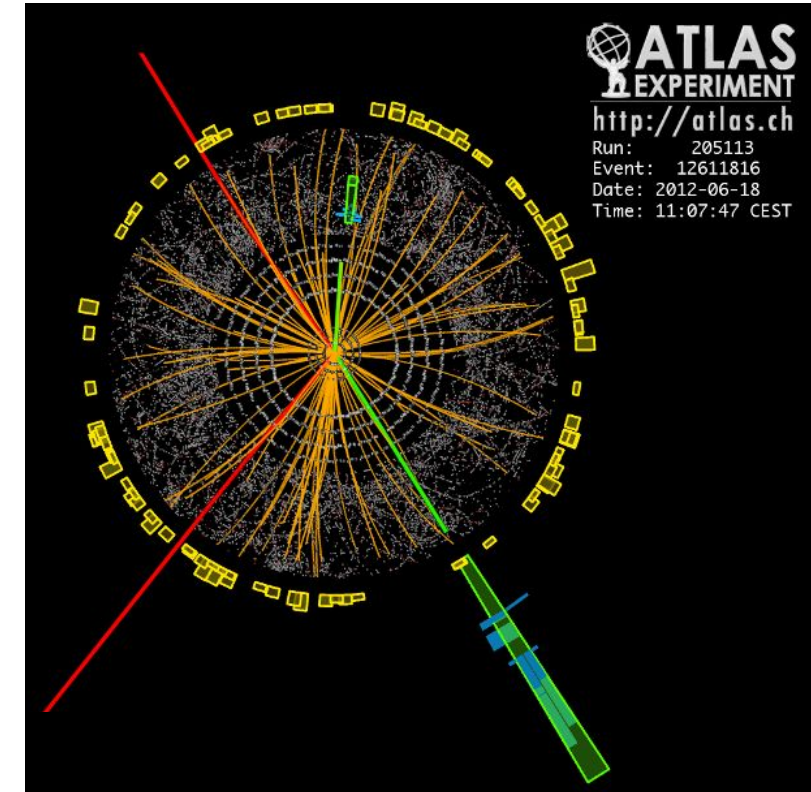
- Las partículas que intentamos reconstruir tienen un amplio rango de momento: desde MeV hasta TeV.
- El número de trayectorias que se deben reconstruir es bastante alto.
  - Alto número de puntos de interacción por colisión.
  - Esto también influye en el diseño del detector (¿más o menos granularidad?).
- 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.

Te lo resumo así nomás...



# Objetivos de los *tracking detectors*

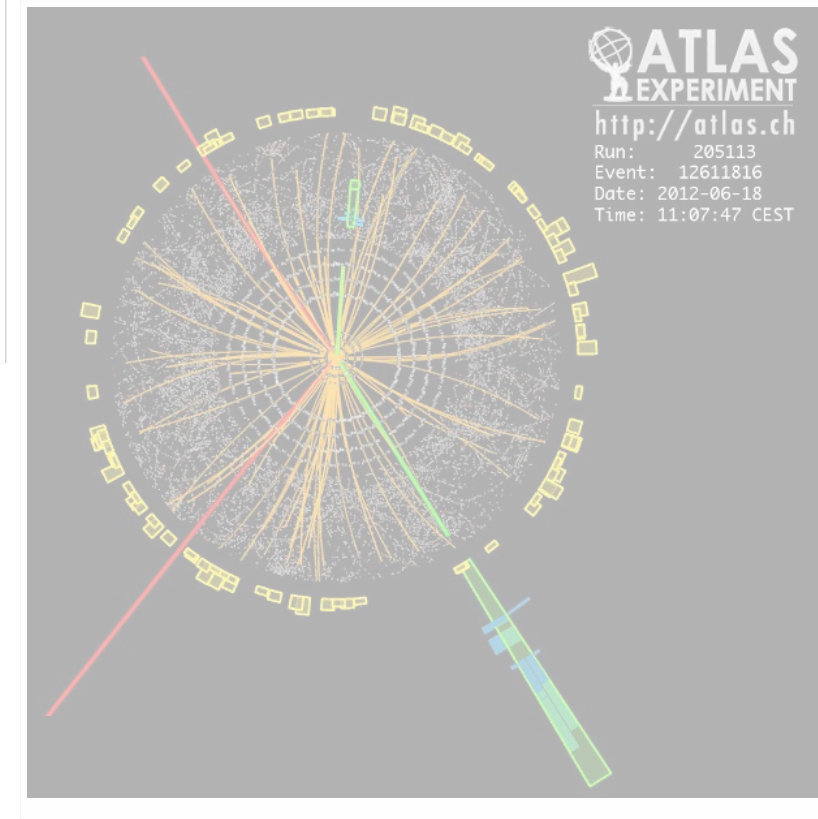
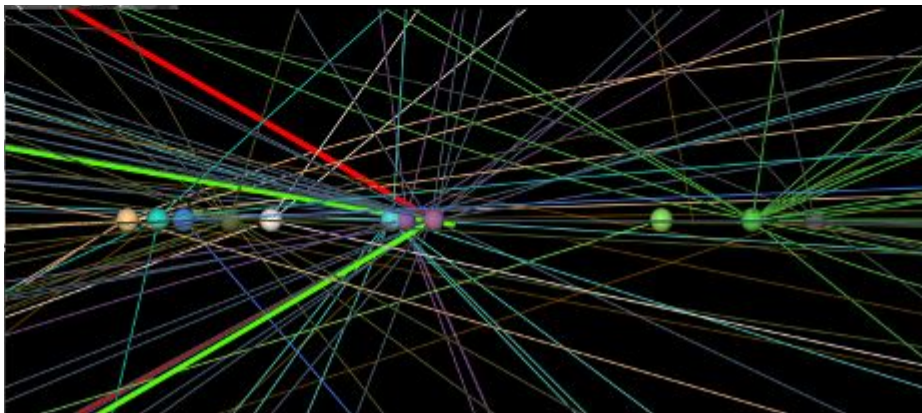
- **Medir la trayectoria** de una partícula cargada:
  - Identificar los diferentes puntos de interacción (*hits*) de la partícula con las capas/planos del detector.
  - Hacer un fit de esos *hits* (e.g. curva, línea recta).
  - Medir el **momento** y el signo de la **carga** de las partículas cargadas a partir de su curvatura dentro de un campo magnético.
  - La trayectoria se puede parametrizar en términos de 5 parámetros:  $d_0$ ,  $z_0$ ,  $\theta_0$ ,  $\phi$  y  $q/p_T$ .
    - La precisión de estos parámetros se ve afectada por la dispersión múltiple.
    - La resolución aumenta con el  $p_T$ .
  - Cuando reconstruimos muchas colisiones, la identificación de las trayectorias se complica.





# Objetivos de los *tracking detectors*

- **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):
  - **Vértices primarios:** donde ocurre la colisión.
    - La mayoría de las trayectorias son extrapoladas a estos vértices.
    - *hard interactions*.
  - **Vértices secundarios:**
    - Identifica decaimientos con vértice secundario, como el quark **b**, el quark **c**, o conversiones de fotones.

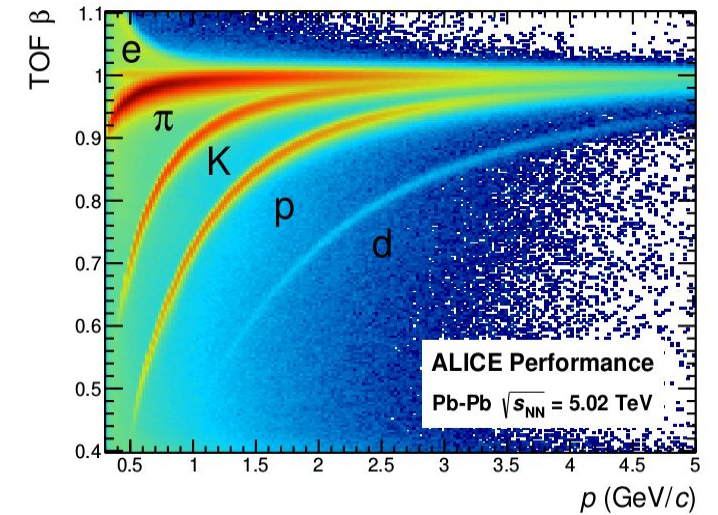




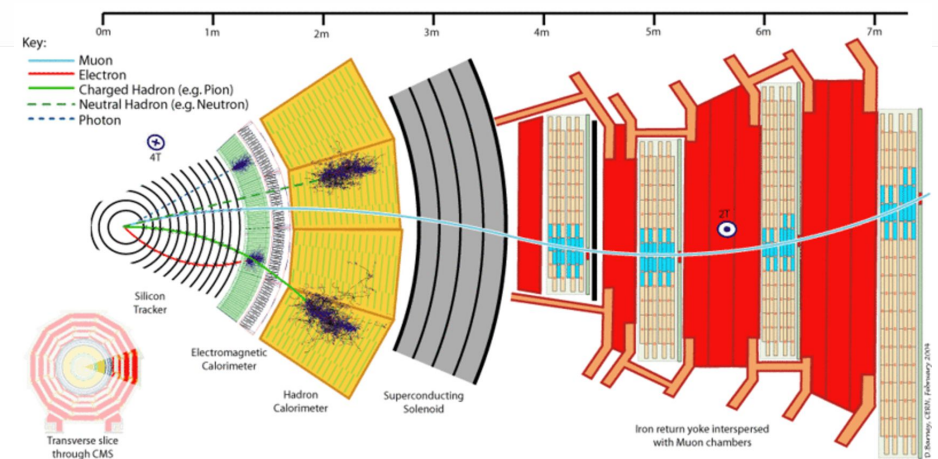


# Objetivos de los *tracking detectors*

- **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):
  - **Vértices primarios**: donde ocurre la colisión.
    - La mayoría de las trayectorias son extrapoladas a estos vértices.
    - *hard interactions*.
  - **Vértices secundarios**:
    - Identifica decaimientos con vértice secundario, como el **quark b**, el **quark c**, o conversiones de fotones.



- **Identificación de partículas.**
  - Midiendo la tasa de pérdida de energía ( $dE/dx$ ).
    - Ejemplo de la TOF de ALICE.
  - A través de la identificación de un vértice secundario.
  - Combinando información del *tracker* central con el detector de muones (detector externo).







- **Algunos libros:**
  - D. Green. The physics of particle detectors. Cambridge University Press.
  - C. Grupen, B. Schwartz. [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):**
  - CEVALE2VE. [Tracking and Vertexing](#). R. Camacho Toro.
  - 2012 Joint Fermilab-CERN Hadron Collider Physics Summer School. [Tracking Detectors](#). A. Korytov.
  - EIROforum School on Instrumentation. [Charged Particle Tracking in HEP](#). M. Moll.
  - Lectures. [Vertexing and Tracking detectors](#). E. Garutti.

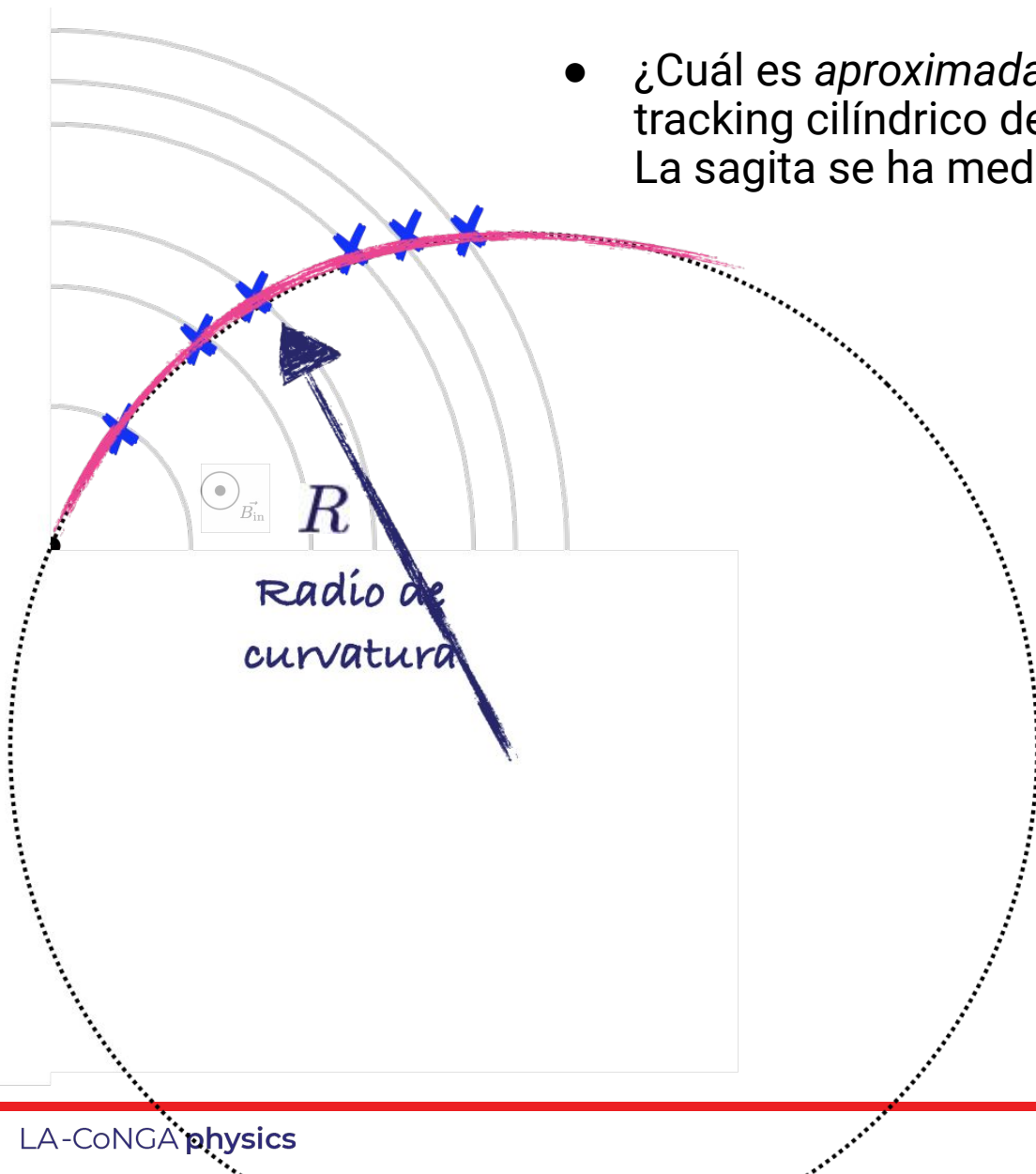
# Ejercicio

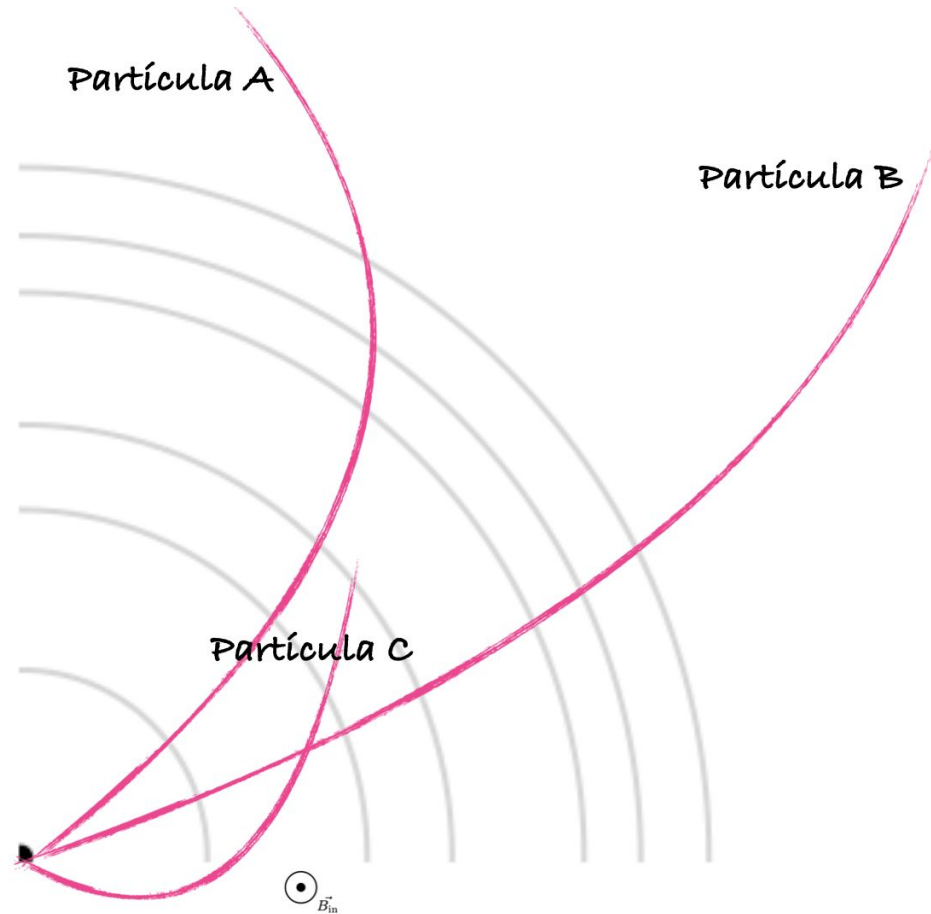




# Partículas cargadas en un campo magnético

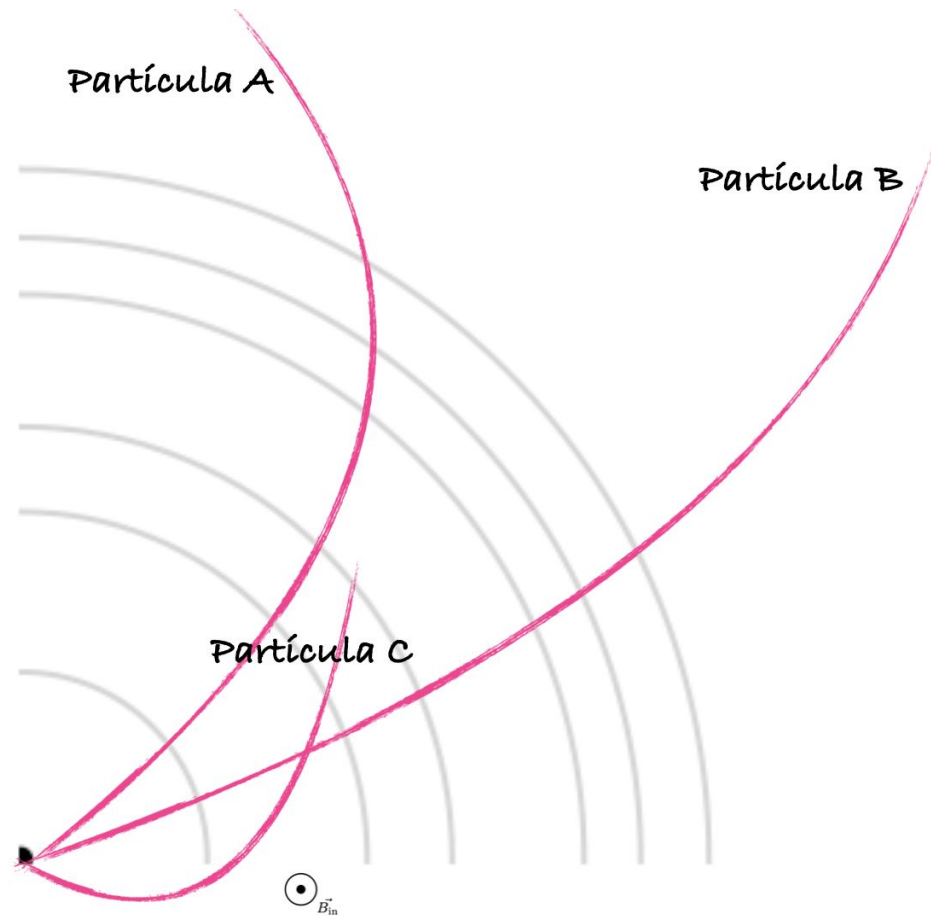
- ¿Cuál es *aproximadamente* el  $p_T$  máximo que se puede medir con un sistema de tracking cilíndrico de 1 m de radio, en un campo magnético  $B = 1$  T paralelo al eje  $z$ ? La sagita se ha medido  $s = 20 \mu\text{m}$ .





**Si se reconstruyen estas trayectorias dentro de un detector con un campo magnético uniforme, ¿qué partícula parece tener mayor  $p_T$ ?**

1. Partícula A
2. Partícula B
3. Partícula C
4. Todas tienen el mismo  $p_T$
5. No es posible saber sin conocer el valor del campo magnético.



**Si se reconstruyen estas trayectorias dentro de un detector con un campo magnético uniforme, ¿qué partícula parece tener mayor  $p_T$ ?**

1. Partícula A
2. Partícula B
3. Partícula C
4. Todas tienen el mismo  $p_T$
5. No es posible saber sin conocer el valor del campo magnético.

Si las partículas están dentro de un campo magnético uniforme, su  $p_T$  esta dado por esta ecuación:

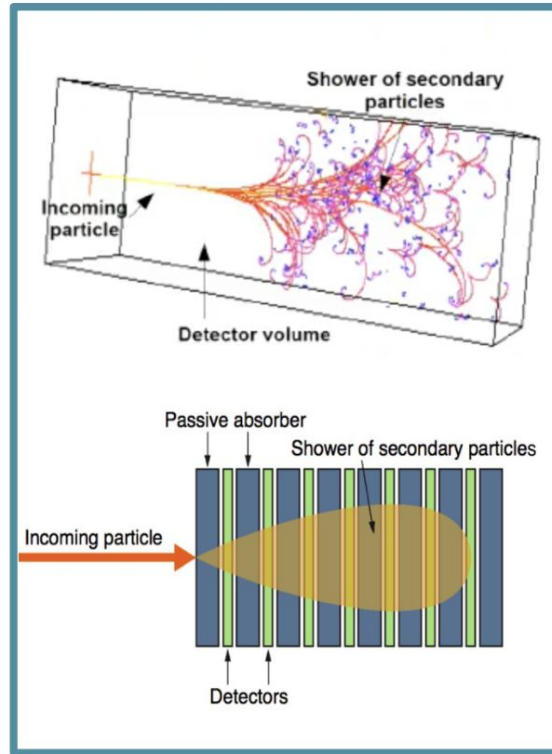
$$p_{\perp} = mv = (Be)R$$

Partícula B parece tener el mayor radio de curvatura.

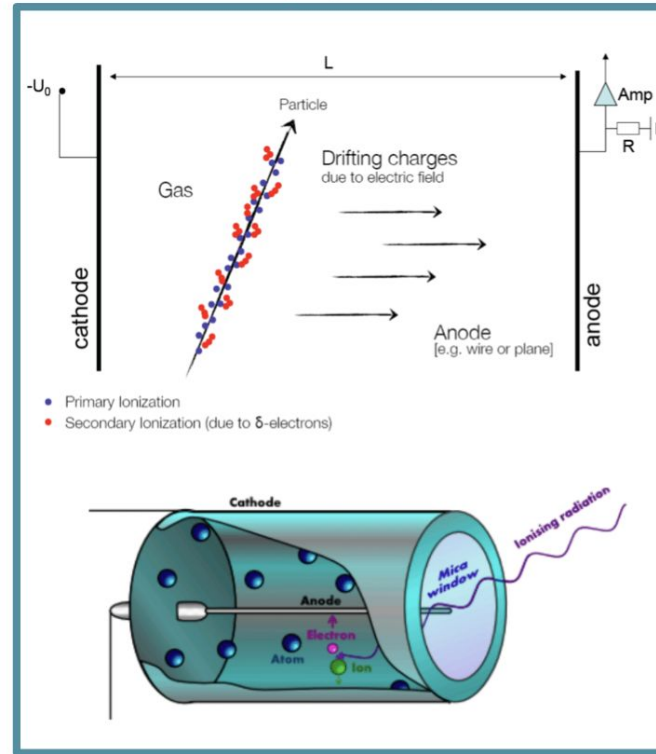




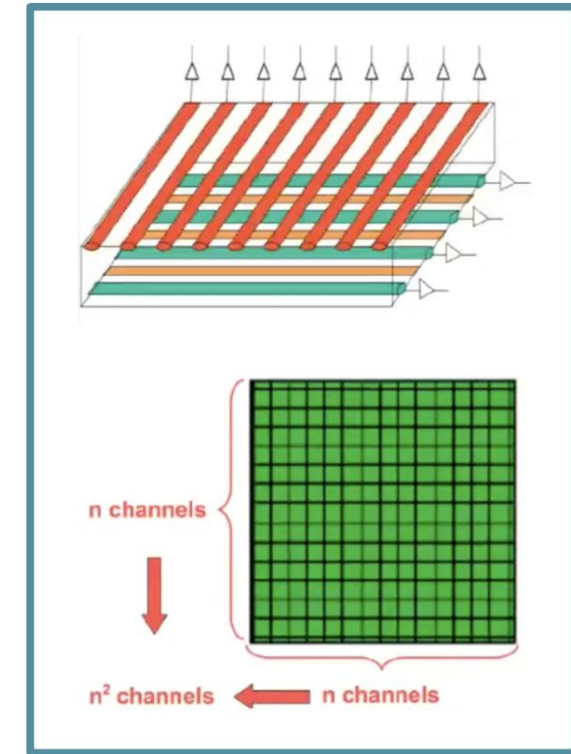
## Calorimeters



## Gas detectors



## Semiconductors



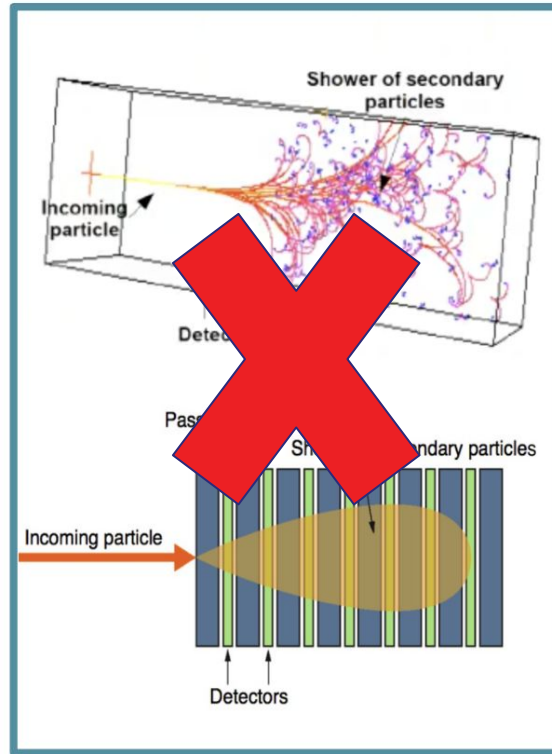
**¿Con cuál de estos tipos de detectores no podemos hacer tracking?**

1. Detectores de calorimetría,
2. Detectores de gas,
3. Detectores de semiconductores,
4. Todos nos permiten hacer tracking,
5. Ninguno sirve para hacer tracking

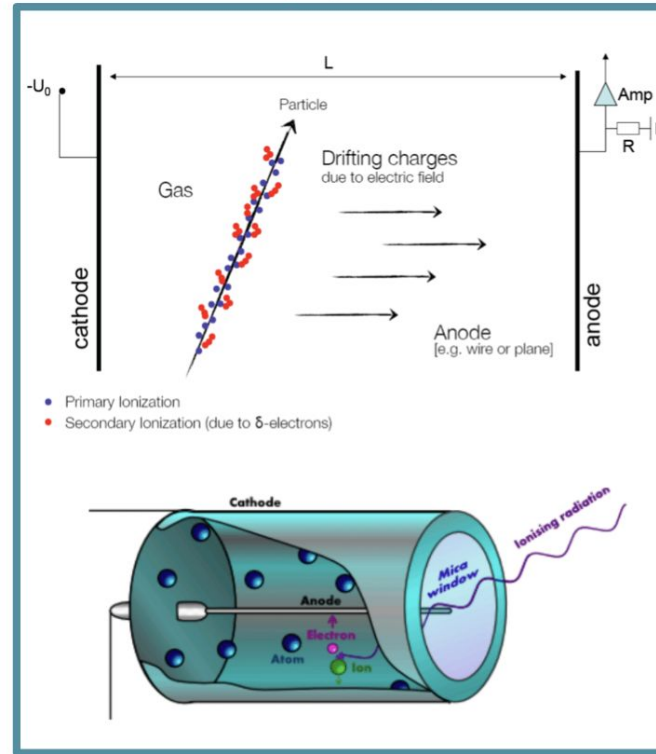


# Preguntas

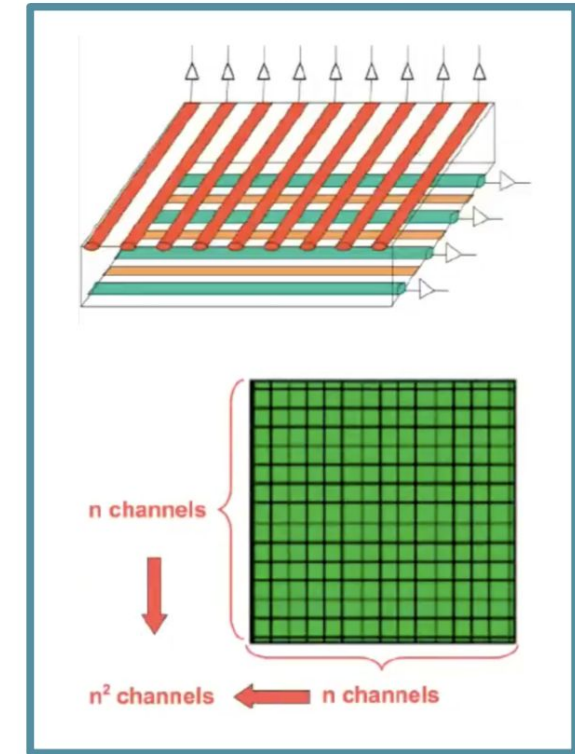
## Calorimeters



## Gas detectors



## Semiconductors



¿Con cuál de estos tipos de detectores no podemos hacer tracking?

1. Detectores de calorimetría,
2. Detectores de gas,
3. Detectores de semiconductores,
4. Todos nos permiten hacer tracking,
5. Ninguno sirve para hacer tracking



## ¿Qué opción es verdadera?

1. Solo podemos detectar partículas estables (tiempo de vida largo),
2. Los detectores de tracking hacen una medición no destructiva,
3. El campo magnético nos permite calcular el momento,
4. Todas las anteriores,
5. Ninguna de las anteriores.



## ¿Qué opción es verdadera?

1. Solo podemos detectar partículas estables (tiempo de vida largo),
2. Los detectores de tracking hacen una medición no destructiva,
3. El campo magnético nos permite calcular el momento,
4. Todas las anteriores,
5. Ninguna de las anteriores.



## ¿Cual de los siguientes diseños podría tener mejor resolución en la medición de los parámetros de la trayectoria?

1. Un detector cilíndrico de 2 capas: La capa interna tiene 0.4 m de radio y la capa externa tiene 2.5 m de radio, cada capa con un grosor de 10cm, y un campo magnético de 2T.
2. Un detector cilíndrico de 2 capas: La capa interna tiene 1 m de radio y la capa externa tiene 2 m de radio, cada capa con un grosor de 15cm, y un campo magnético de 2T.
3. Un detector cilíndrico de 2 capas: La capa interna tiene 0.4 m de radio y la capa externa tiene 2.5 m de radio, cada capa con un grosor de 10cm, y un campo magnético de 5T.
4. Un detector cilíndrico de 2 capas: La capa interna tiene 1 m de radio y la capa externa tiene 2m de radio, cada capa con un grosor de 15cm, y un campo magnético de 5T.
5. Un detector cilíndrico de 2 capas: La capa interna tiene 0.4 m de radio y la capa externa tiene 2.5 m de radio, cada capa con un grosor de 10cm, y un campo magnético de 5T.





## ¿Cual de los siguientes diseños podría tener mejor resolución en la medición de los parámetros de la trayectoria?

1. Un detector cilíndrico de 2 capas: La capa interna tiene 0.4 m de radio y la capa externa tiene 2.5 m de radio, cada capa con un grosor de 10cm, y un campo magnético de 2T.
2. Un detector cilíndrico de 2 capas: La capa interna tiene 1 m de radio y la capa externa tiene 2 m de radio, cada capa con un grosor de 15cm, y un campo magnético de 2T.
3. Un detector cilíndrico de 2 capas: La capa interna tiene 0.4 m de radio y la capa externa tiene 2.5 m de radio, cada capa con un grosor de 10cm, y un campo magnético de 5T.
4. Un detector cilíndrico de 2 capas: La capa interna tiene 1 m de radio y la capa externa tiene 2m de radio, cada capa con un grosor de 15cm, y un campo magnético de 5T.
5. Un detector cilíndrico de 2 capas: La capa interna tiene 0.4 m de radio y la capa externa tiene 2.5 m de radio, cada capa con un grosor de 10cm, y un campo magnético de 5T.

### Buena resolución en el momento:

- buena medición de la sagita,
- alto campo magnético,
- longitud de la trayectoria larga.

### Buena resolución en el parámetro de impacto:

- Para reducir la dispersión múltiple se requiere material de menor espesor,
- radio interno cerca del haz.

¡Gracias!





<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

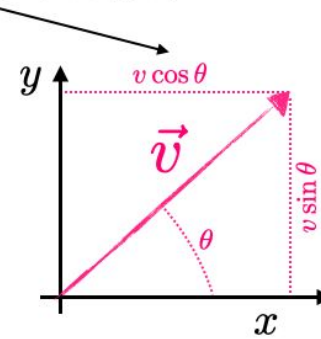
El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido, el cual refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.



# Partícula cargada en un campo magnético

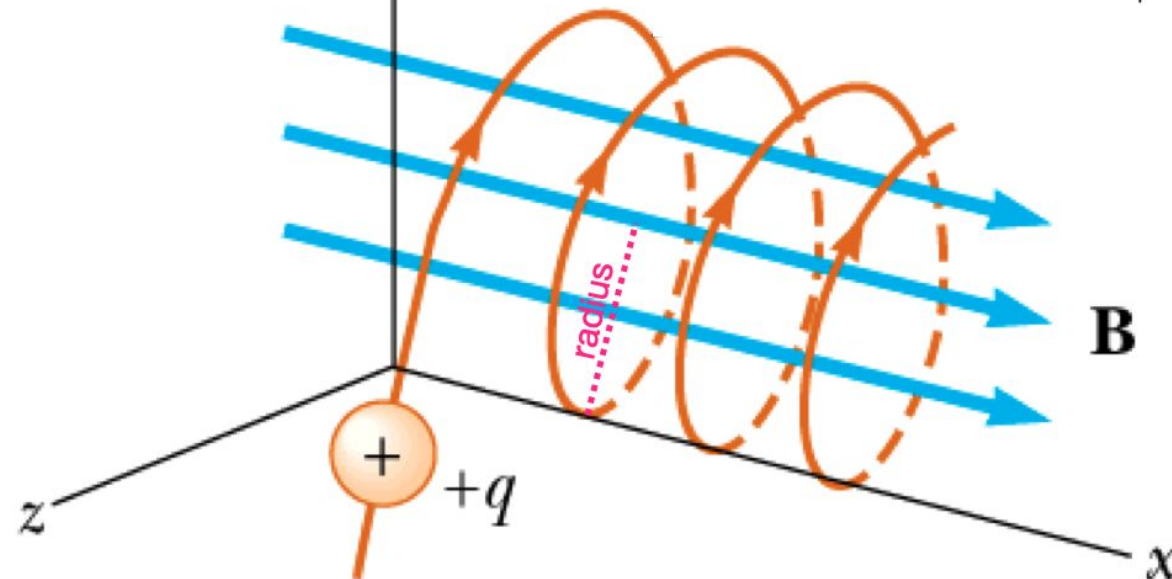
- En el caso de un campo magnético **homogéneo**, la trayectoria es dada por una hélice.

El componente paralelo al campo magnético no se ve afectado. La carga continúa moviéndose en esa dirección.



$\vec{v}$  es la velocidad de la carga en el punto de inicio.

Es el componente de la velocidad de la carga responsable por el movimiento circular (componente perpendicular al campo magnético)





# Quark b

- Debido a la dilatación del tiempo, el quark b viaja 0(cm) antes de hadronisarse.
- El tiempo de vida del quark b es de 1.5 ps (la luz viaja 0.5 mm en este tiempo).

