

# Aceleradores Circulares de Iones

Rafael Martín-Landrove  
Escuela de Física

Universidad Central de Venezuela



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



Cofinanciado por el  
programa Erasmus+  
de la Unión Europea





# Aspectos Básicos de la Trayectoria Circular de las Partículas

- La fuerza que actúa sobre las partículas cargadas es la **ley de fuerza de Lorentz**

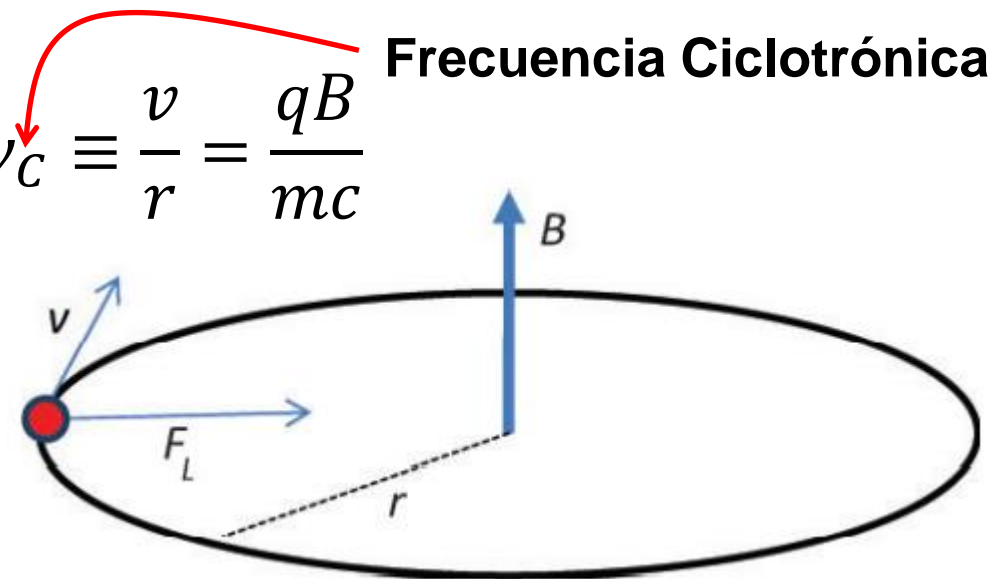
$$\vec{F}_L = q\vec{E} + \frac{q}{c}\vec{v} \times \vec{B} = q(\vec{E} + \vec{\beta} \times \vec{B}) = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad \vec{p} = \gamma m\vec{v} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

- Entonces en presencia de un campo magnético  $\vec{B}$ , la partícula va a seguir una **trayectoria circular** por la acción de una fuerza centrípeta de magnitud

Rigidez Magnética  $\rightarrow B_r \equiv$

$$F_c = \frac{mv^2}{r} = q\beta B \Rightarrow \omega_c = 2\pi\nu_c \equiv \frac{v}{r} = \frac{qB}{mc}$$

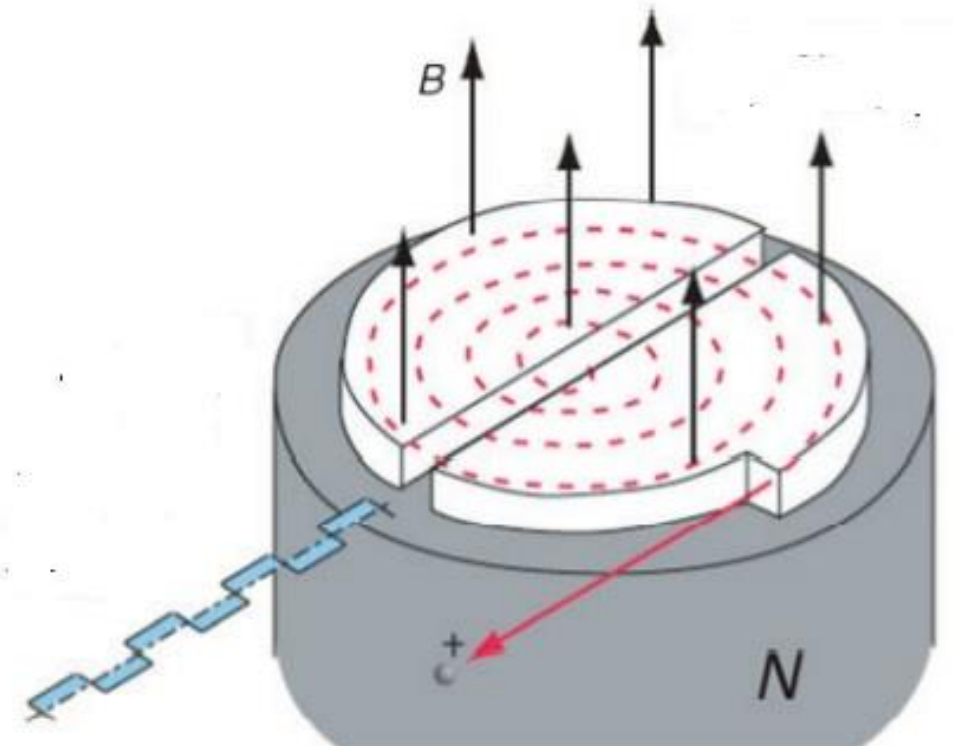
$$\left\{ \begin{array}{l} mv/q = p/q = \frac{rB}{c} \quad (\beta \ll 1) \\ \gamma mv/q = \gamma\beta mc/q = \frac{rB}{c} \quad (\beta \sim 1) \end{array} \right.$$





# Ciclotrón en su Concepción Básica (Caso no Relativista)

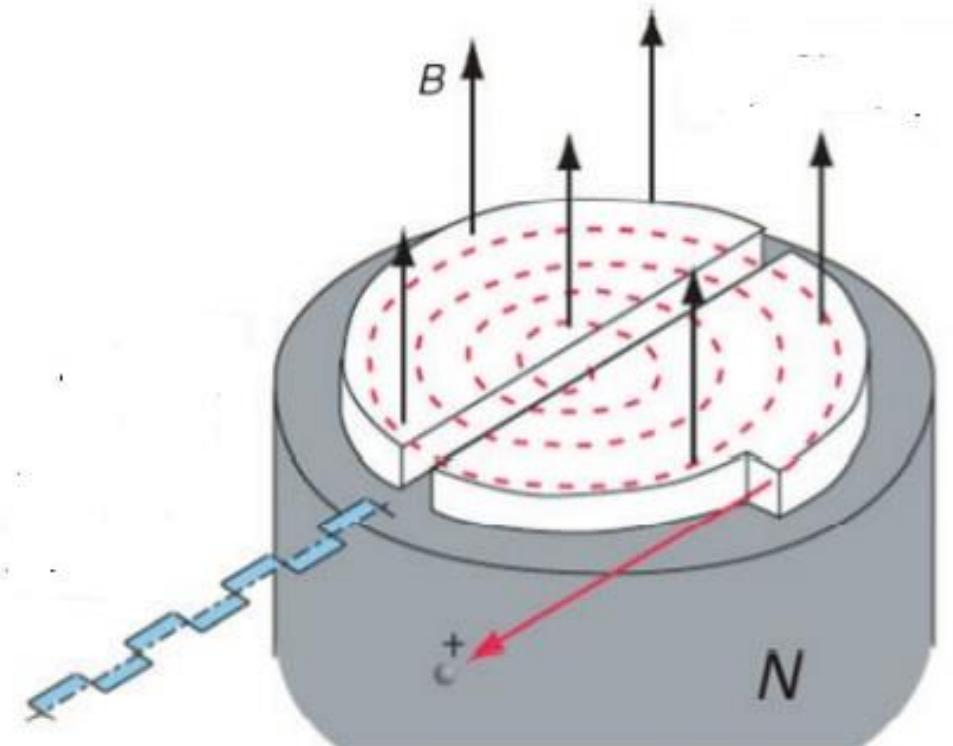
- Tiene un par de imanes grandes que proveen un campo magnético constante en la brecha que separa los polos.





# Ciclotrón en su Concepción Básica (Caso no Relativista)

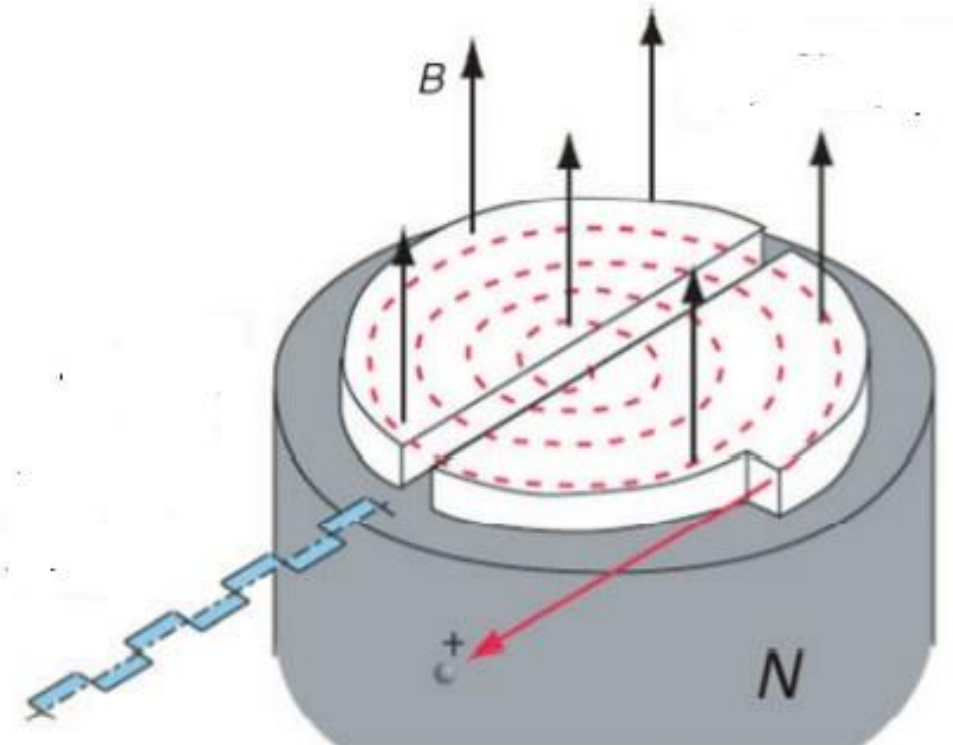
- Tiene un par de imanes grandes que proveen un campo magnético constante en la brecha que separa los polos.
- En el centro y rodeada por dos electrodos huecos en forma de “D”, hay una fuente de partículas.
- Los electrodos en forma de “D” están colocados entre los polos del imán.





# Ciclotrón en su Concepción Básica (Caso no Relativista)

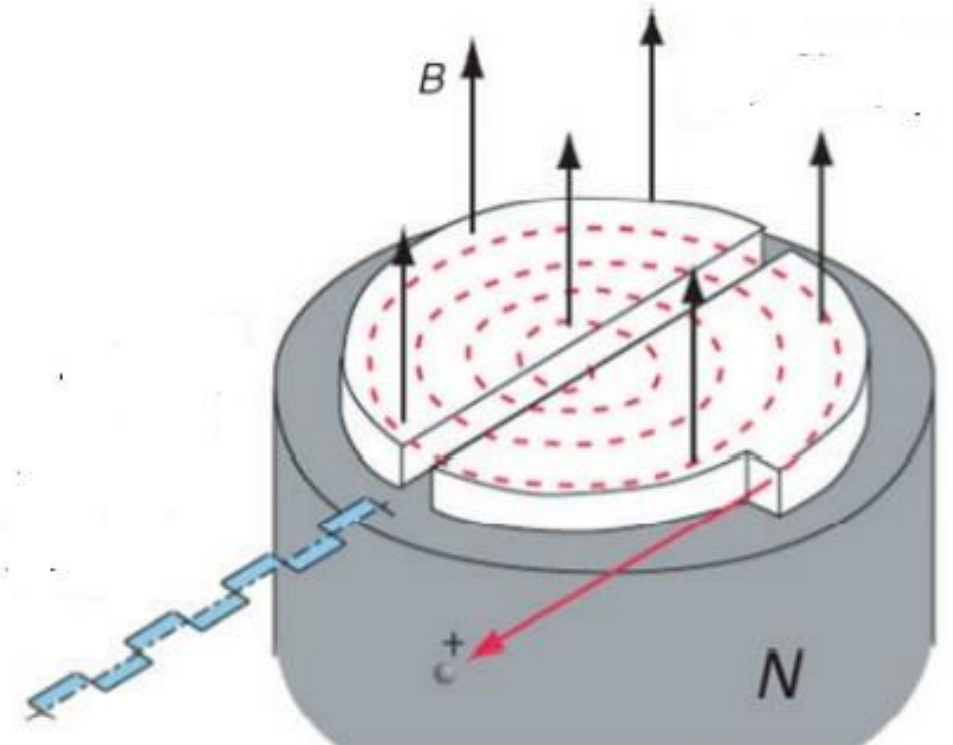
- Tiene un par de imanes grandes que proveen un campo magnético constante en la brecha que separa los polos.
- En el centro y rodeada por dos electrodos huecos en forma de “D”, hay una fuente de partículas.
- Los electrodos en forma de “D” están colocados entre los polos del imán.
- Mientras la partícula está dentro de las “D” está blindada del campo eléctrico oscilante que producen los electrodos (efecto de jaula de Faraday) y solamente actúa el campo magnético.





# Ciclotrón en su Concepción Básica (Caso no Relativista)

- Tiene un par de imanes grandes que proveen un campo magnético constante en la brecha que separa los polos.
- En el centro y rodeada por dos electrodos huecos en forma de “D”, hay una fuente de partículas.
- Los electrodos en forma de “D” están colocados entre los polos del imán.
- Mientras la partícula está dentro de las “D” está blindada del campo eléctrico oscilante que producen los electrodos (efecto de jaula de Faraday) y solamente actúa el campo magnético.
- La diferencia de potencial entre las “D”, en forma de onda cuadrada (RF) está sincronizada con el movimiento de la partícula para acelerarla.

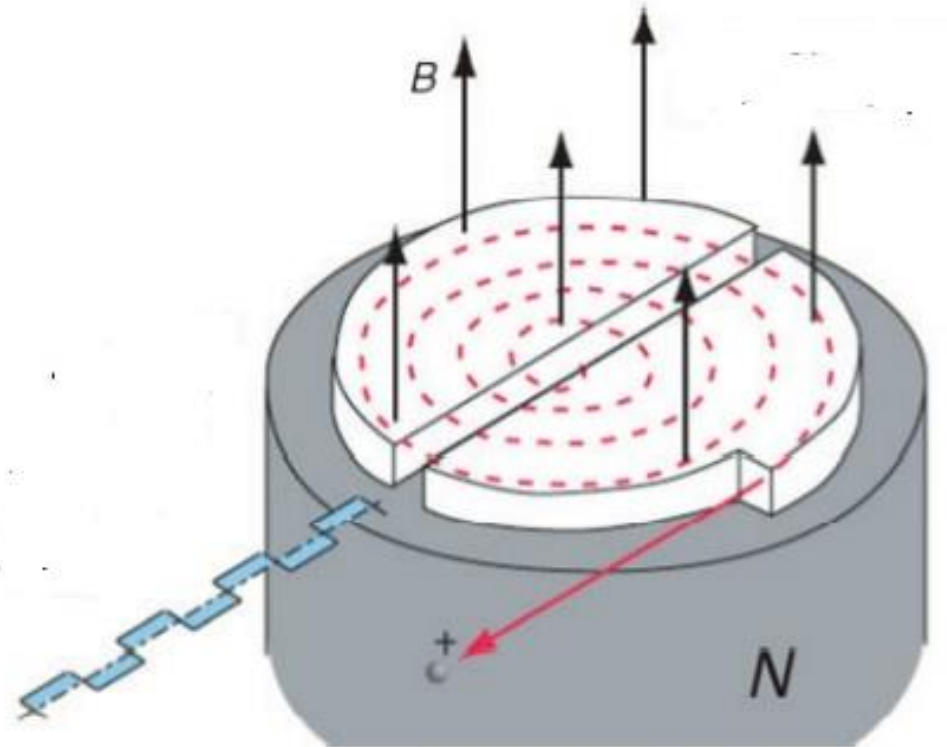






# Ciclotrón en su Concepción Básica (Caso no Relativista)

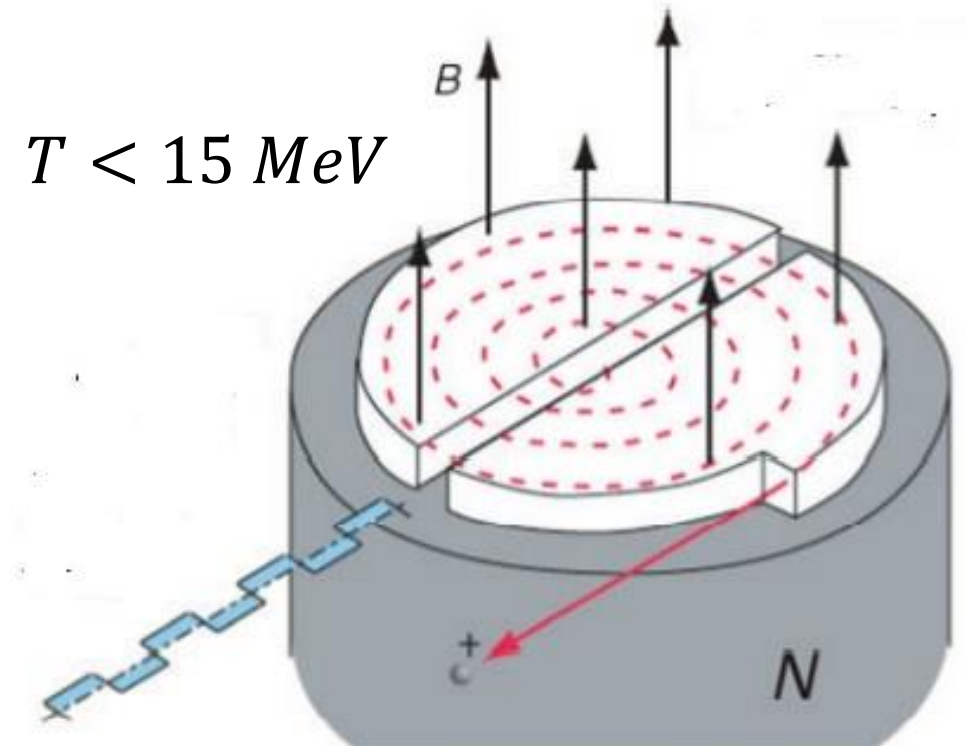
- Tiene un par de imanes grandes que proveen un campo magnético constante en la brecha que separa los polos.
- En el centro y rodeada por dos electrodos huecos en forma de “D”, hay una fuente de partículas.
- Los electrodos en forma de “D” están colocados entre los polos del imán.
- Mientras la partícula está dentro de las “D” está blindada del campo eléctrico oscilante que producen los electrodos (efecto de jaula de Faraday) y solamente actúa el campo magnético.
- La diferencia de potencial entre las “D”, en forma de onda cuadrada (RF) está sincronizada con el movimiento de la partícula para acelerarla.
- El radio de la órbita crece hasta llegar al punto de eyección.





# Ciclotrón en su Concepción Básica (Caso no Relativista)

- Tiene un par de imanes grandes que proveen un campo magnético constante en la brecha que separa los polos.
- En el centro y rodeada por dos electrodos huecos en forma de “D”, hay una fuente de partículas.
- Los electrodos en forma de “D” están colocados entre los polos del imán.
- Mientras la partícula está dentro de las “D” está blindada del campo eléctrico oscilante que producen los electrodos (efecto de jaula de Faraday) y solamente actúa el campo magnético.
- La diferencia de potencial entre las “D”, en forma de onda cuadrada (RF) está sincronizada con el movimiento de la partícula para acelerarla.
- El radio de la órbita crece hasta llegar al punto de eyección.



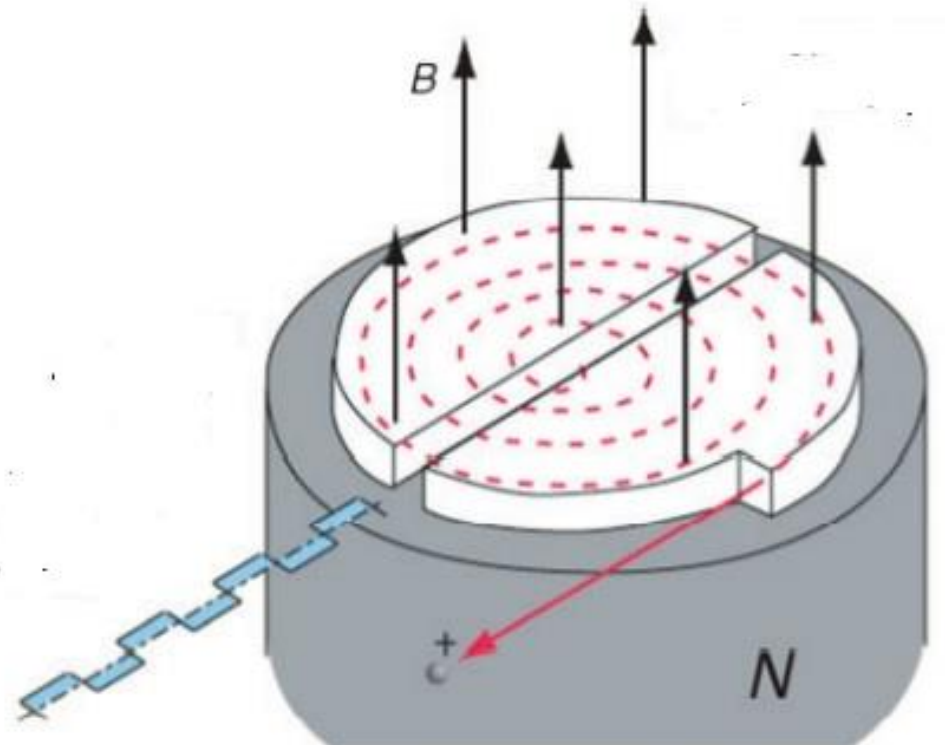




# Efectos Relativistas Llevan a Cambios

- Para poder llevar las partículas a mayor energía hay dos opciones:

$$\gamma\beta mc/q = \frac{rB}{c}$$



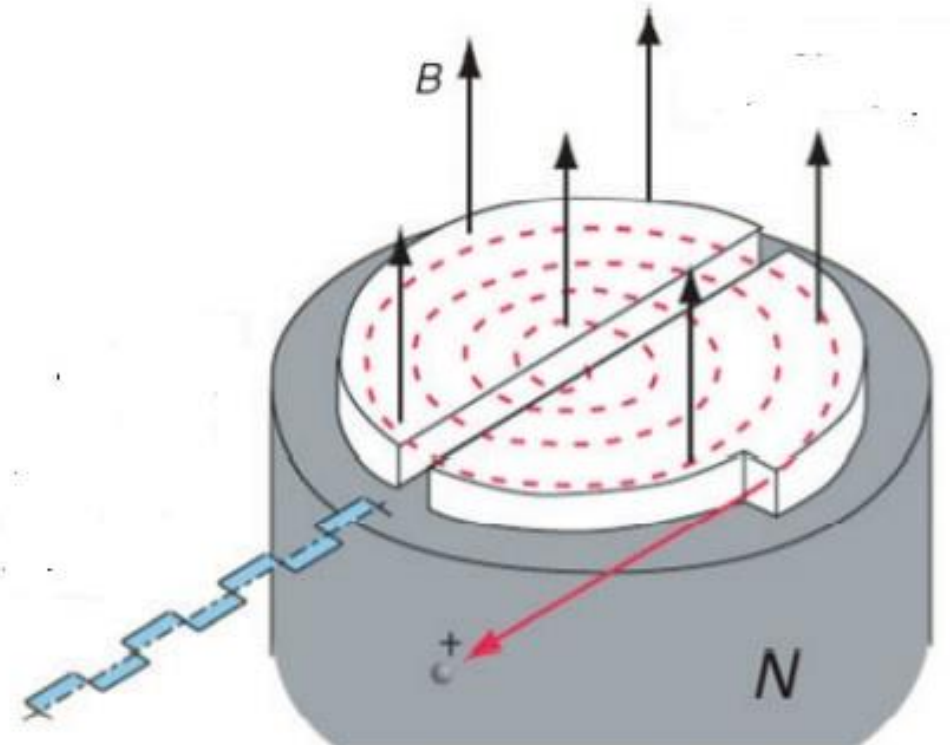


# Efectos Relativistas Llevan a Cambios

- Para poder llevar las partículas a mayor energía hay dos opciones:

1. Cambiar la magnitud de  $B$  en función de  $r$ , según la rigidez magnética  $B_r$ .

$$\gamma\beta mc/q = \frac{rB}{c}$$

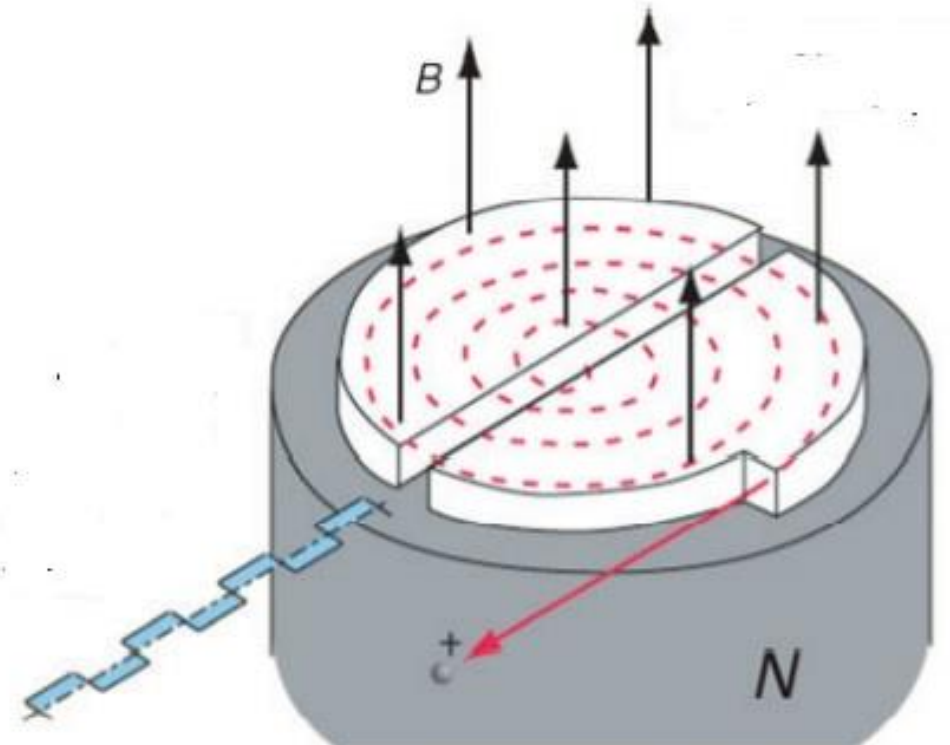




# Efectos Relativistas Llevan a Cambios

- Para poder llevar las partículas a mayor energía hay dos opciones:
  1. Cambiar la magnitud de  $B$  en función de  $r$ , según la rigidez magnética  $B_r$ .
  2. Variar la RF del campo eléctrico acelerador.

$$\gamma\beta mc/q = \frac{rB}{c}$$



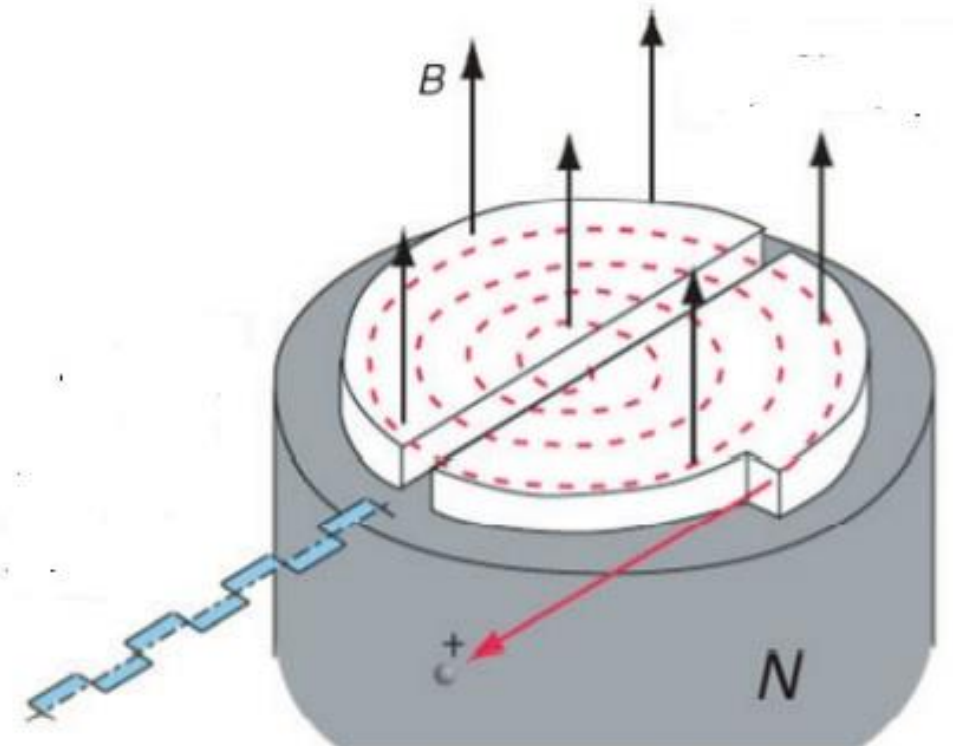


# Efectos Relativistas Llevan a Cambios

- Para poder llevar las partículas a mayor energía hay dos opciones:
  1. Cambiar la magnitud de  $B$  en función de  $r$ , según la rigidez magnética  $B_r$ .
  2. Variar la RF del campo eléctrico acelerador.

- Ciclotrones Isocronos: Son la mayoría de los ciclotrones modernos, modifican  $B$  y mantienen una  $\omega_C$  constante. El haz de salida es continuo y de alta intensidad.

$$\gamma\beta mc/q = \frac{rB}{c}$$



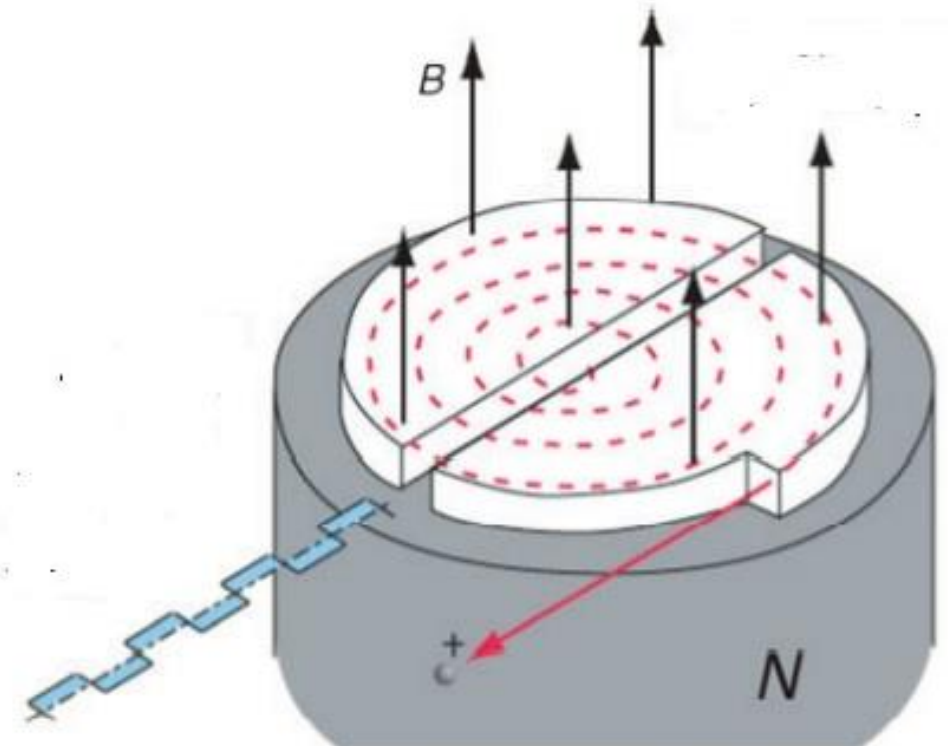


# Efectos Relativistas Llevan a Cambios

- Para poder llevar las partículas a mayor energía hay dos opciones:
  1. Cambiar la magnitud de  $B$  en función de  $r$ , según la rigidez magnética  $B_r$ .
  2. Variar la RF del campo eléctrico acelerador.

$$\gamma\beta mc/q = \frac{rB}{c}$$

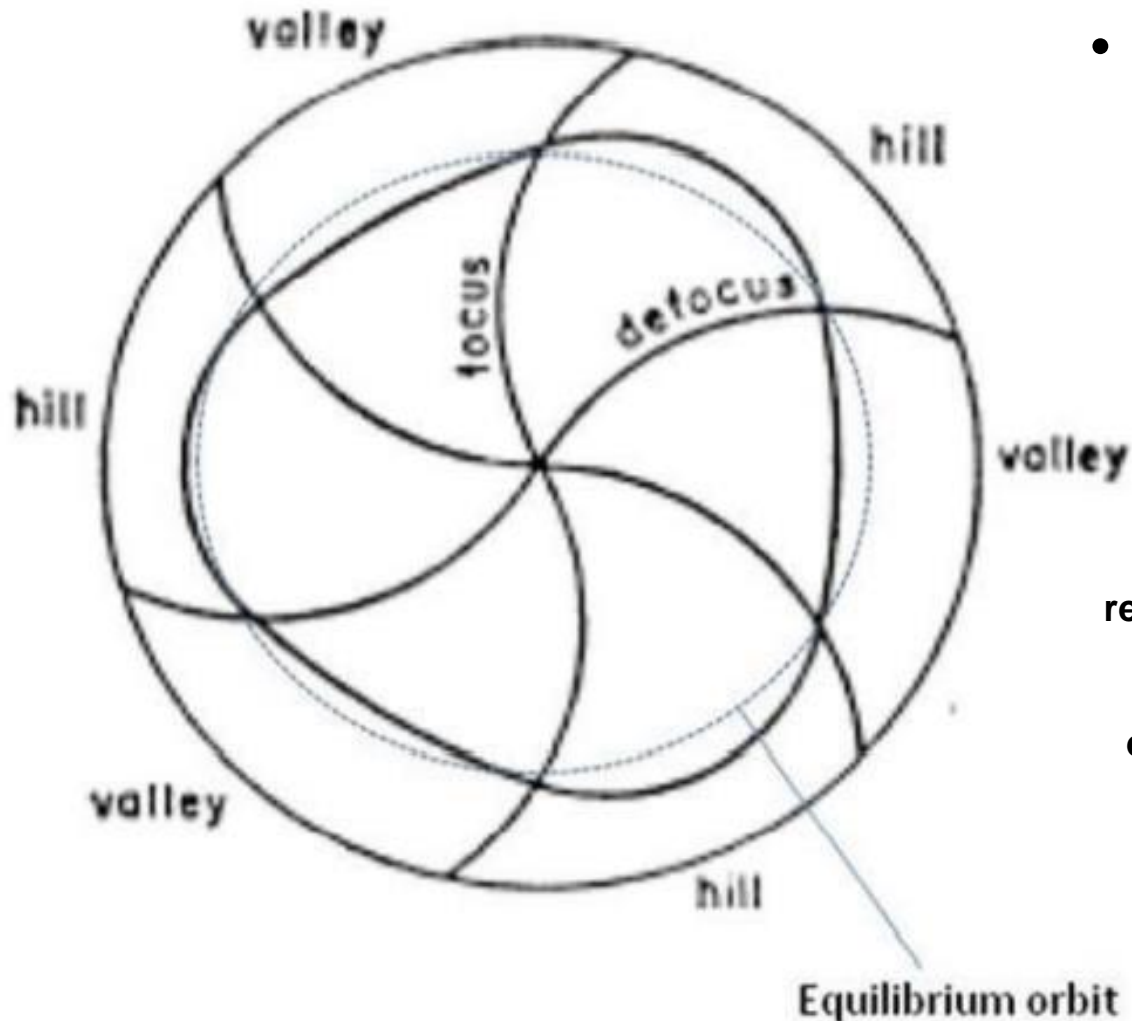
- **Ciclotrones Isocronos**: Son la mayoría de los ciclotrones modernos, modifican  $B$  y mantienen una  $\omega_C$  constante. El haz de salida es continuo y de alta intensidad.
- **Sincrociclotrones**: La caída de  $\omega_C$  por efectos relativistas se compensa por sincronización con la RF.



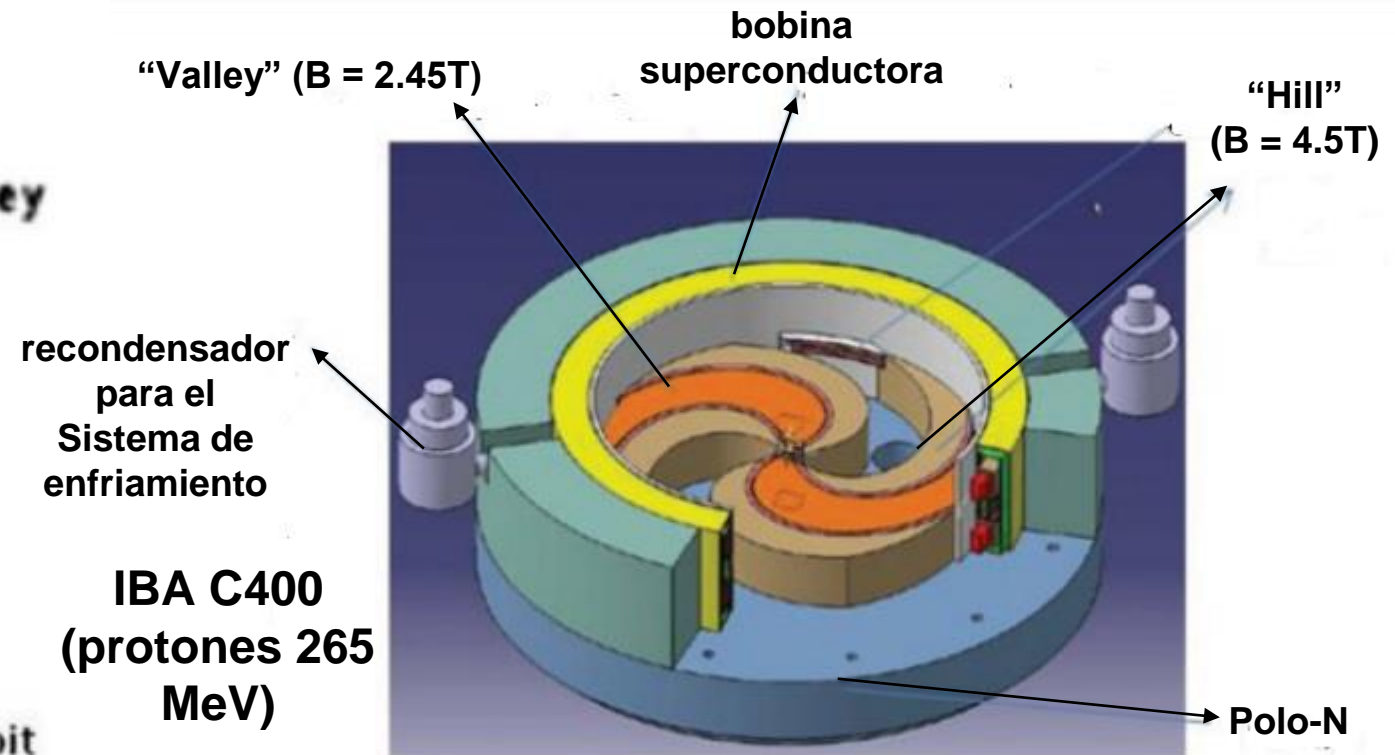


# Ciclotrón Isocrono

- Dándole forma a las caras de los polos, mediante un diseño apropiado, se puede lograr incrementar  $B$  para compensar por los efectos relativistas.



- Con sectores (“valleys” & “hills”) se logra focalización del haz para compensar la divergencia por incremento de  $B$ .





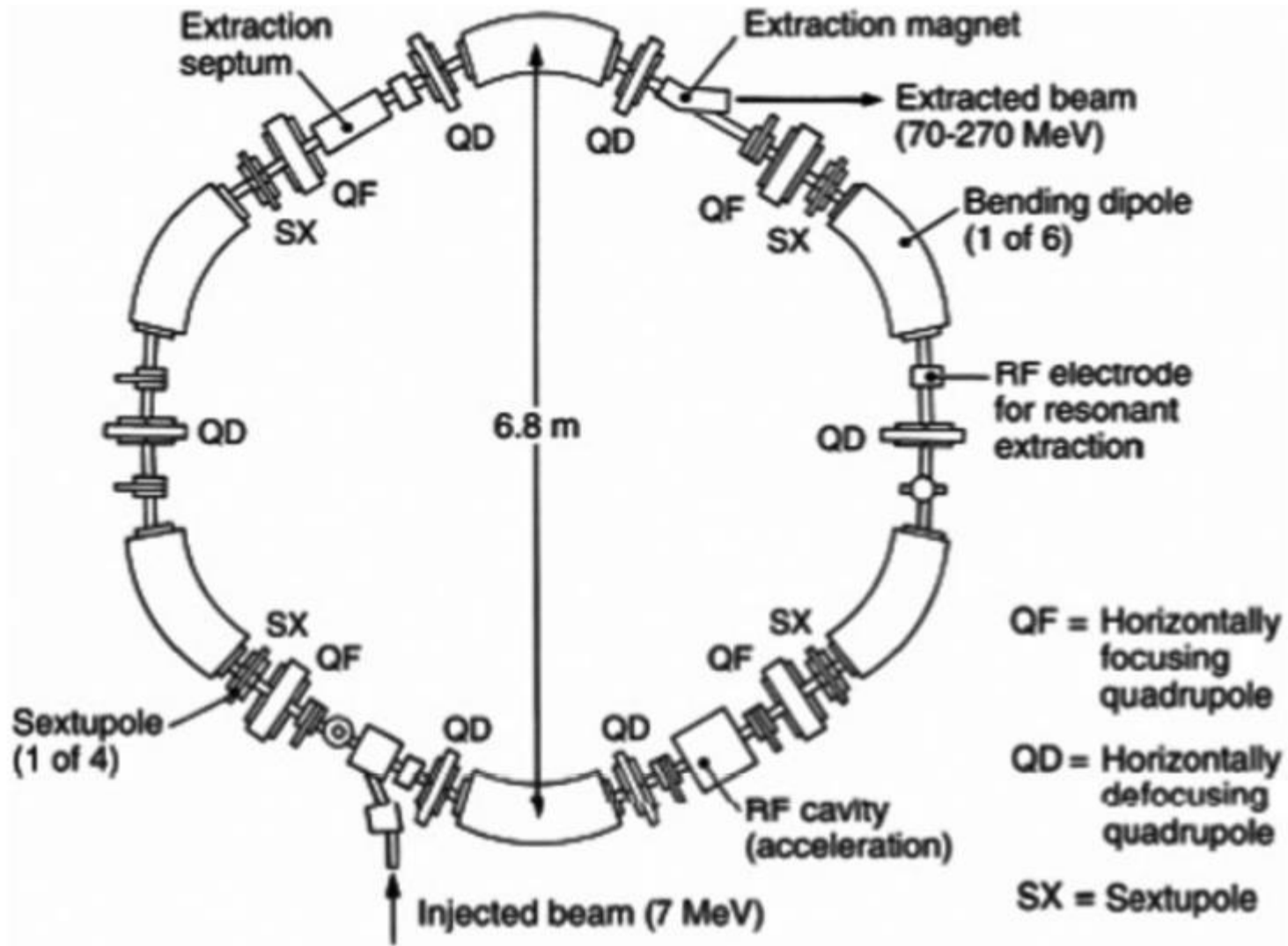


# Sincrotrón

- **Con el ciclotrón hay limitaciones porque si queremos energías más altas, requerimos mayor tamaño que supone problemas de costo.**



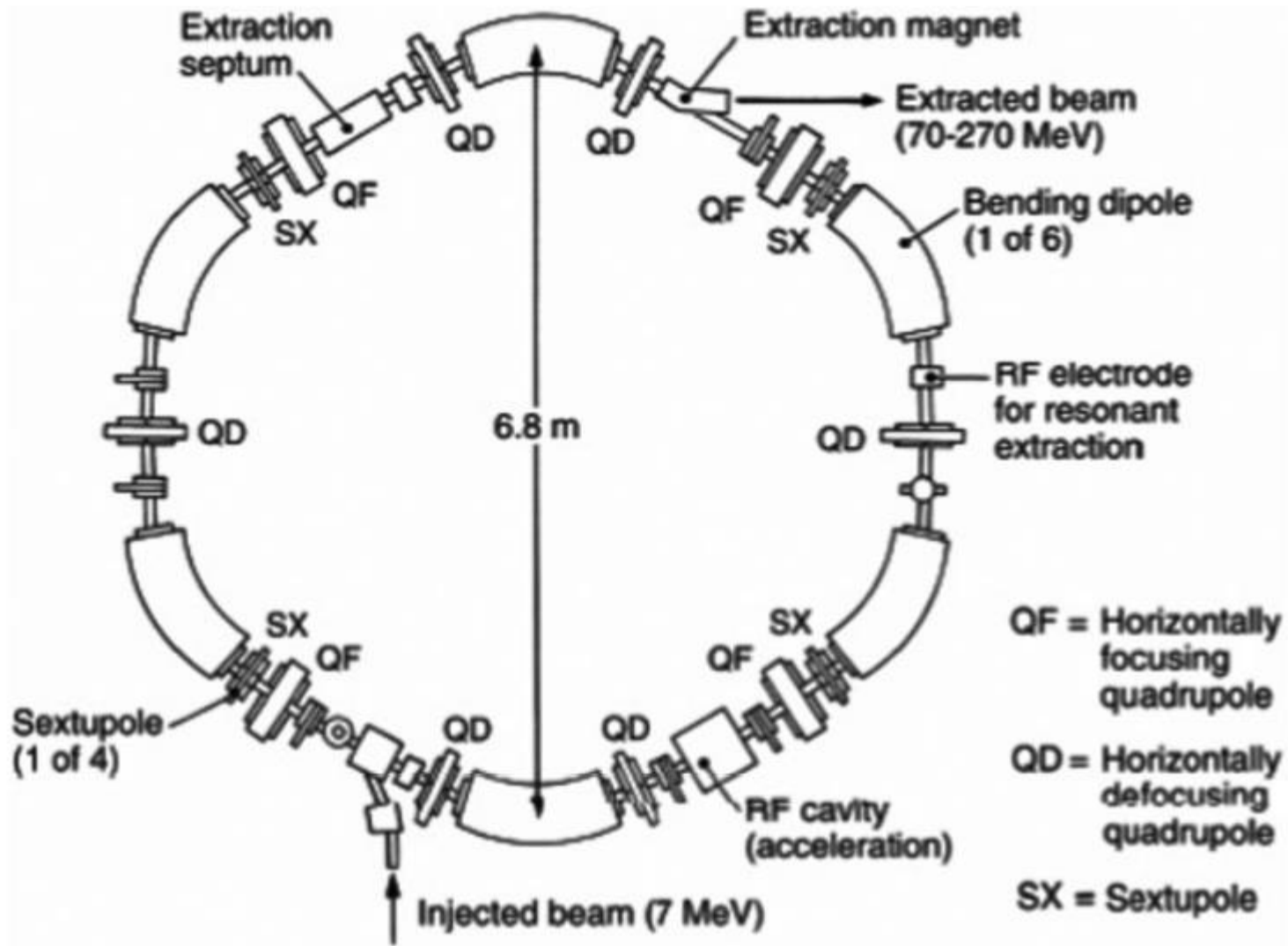
# Sincrotrón



- Con el ciclotrón hay limitaciones porque si queremos energías más altas, requerimos mayor tamaño que supone problemas de costo.
- El sincrotrón es el que responde al problema: La órbita es fija.



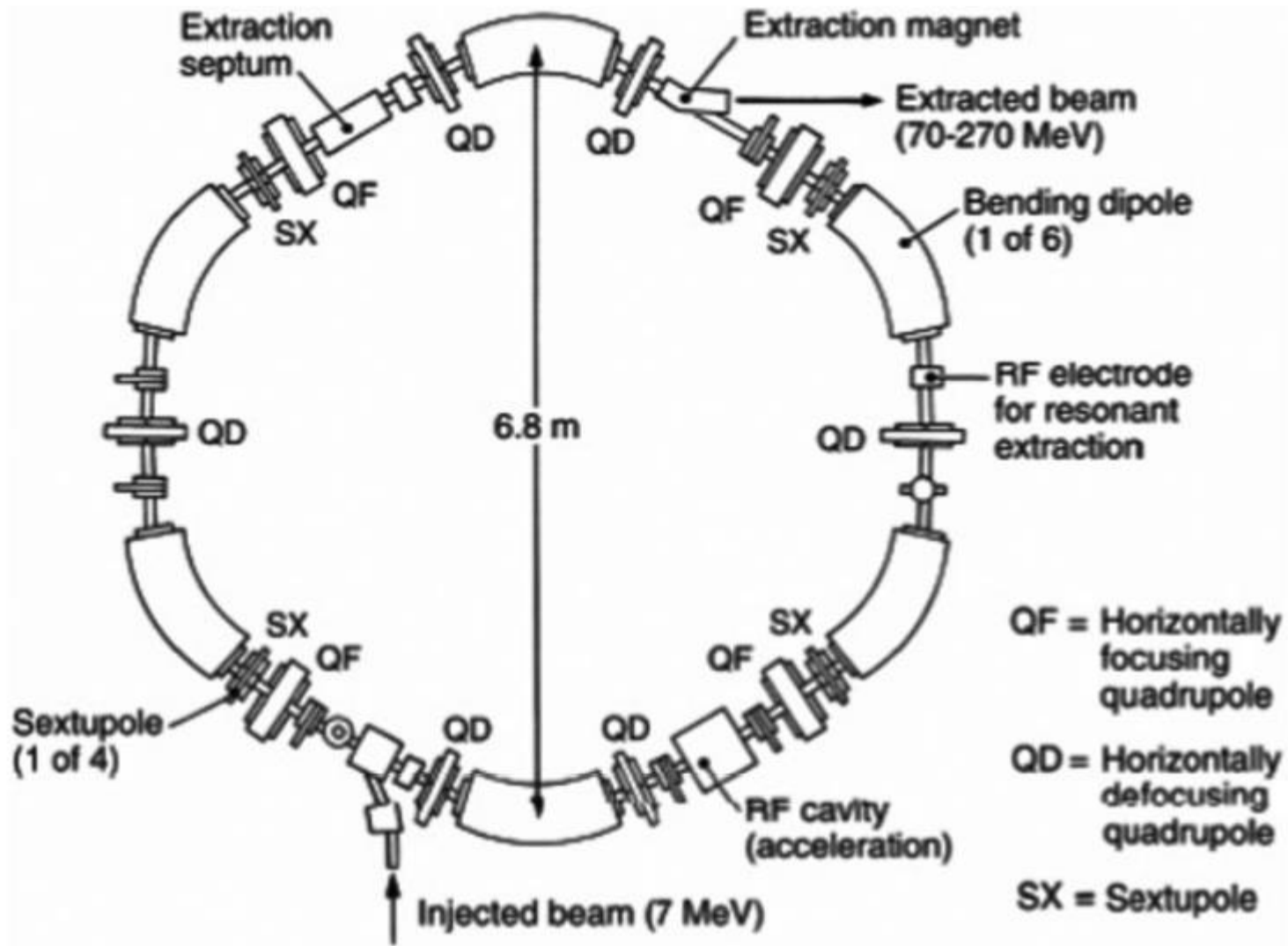
# Sincrotrón



- Con el ciclotrón hay limitaciones porque si queremos energías más altas, requerimos mayor tamaño que supone problemas de costo.
- El sincrotrón es el que responde al problema: La órbita es fija.
- Mayor complejidad: (1) Se varia campo  $B$  para acelerar.



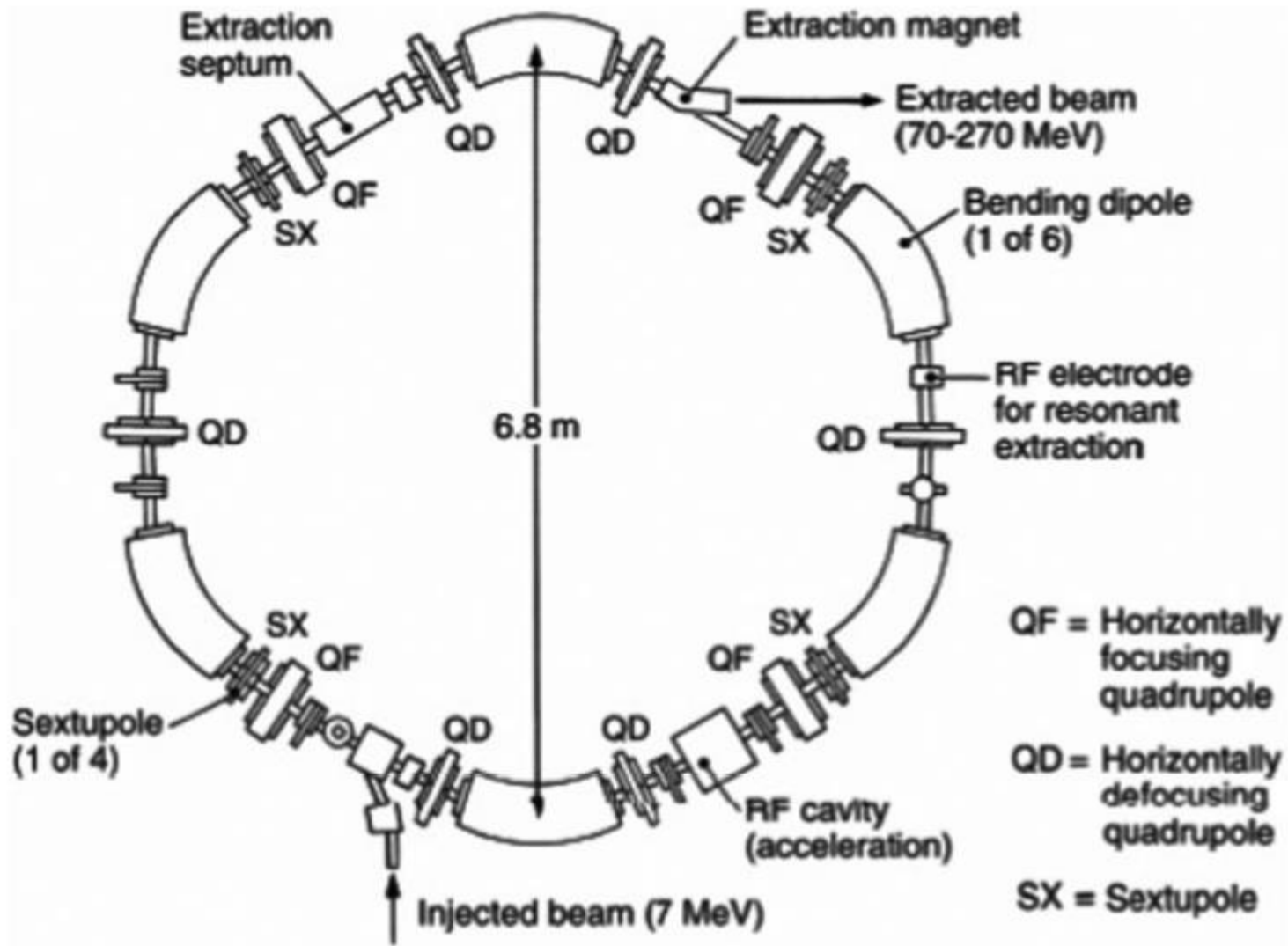
# Sincrotrón



- Con el ciclotrón hay limitaciones porque si queremos energías más altas, requerimos mayor tamaño que supone problemas de costo.
- El sincrotrón es el que responde al problema: La órbita es fija.
- Mayor complejidad: (1) Se varía campo  $B$  para acelerar. (2) RF se varía también para lograr el sincronismo.



# Sincrotrón



- Con el ciclotrón hay limitaciones porque si queremos energías más altas, requerimos mayor tamaño que supone problemas de costo.
- El sincrotrón es el que responde al problema: La órbita es fija.
- Mayor complejidad: (1) Se varía campo  $B$  para acelerar. (2) RF se varía también para lograr el sincronismo.

- Más barato por los imanes y las cavidades de RF empleadas.



# Ejemplo de Instalacion Clínica con un Sincrotrón





# HIT (Heilderberg Ionenstrahl-therapie) con Iones







# GENERADORES DE IONES ( $p, ^{12}C$ )







# ACCELERADOR LINEAL ( $p, ^{12}\text{C}$ , 7 MeV/A)







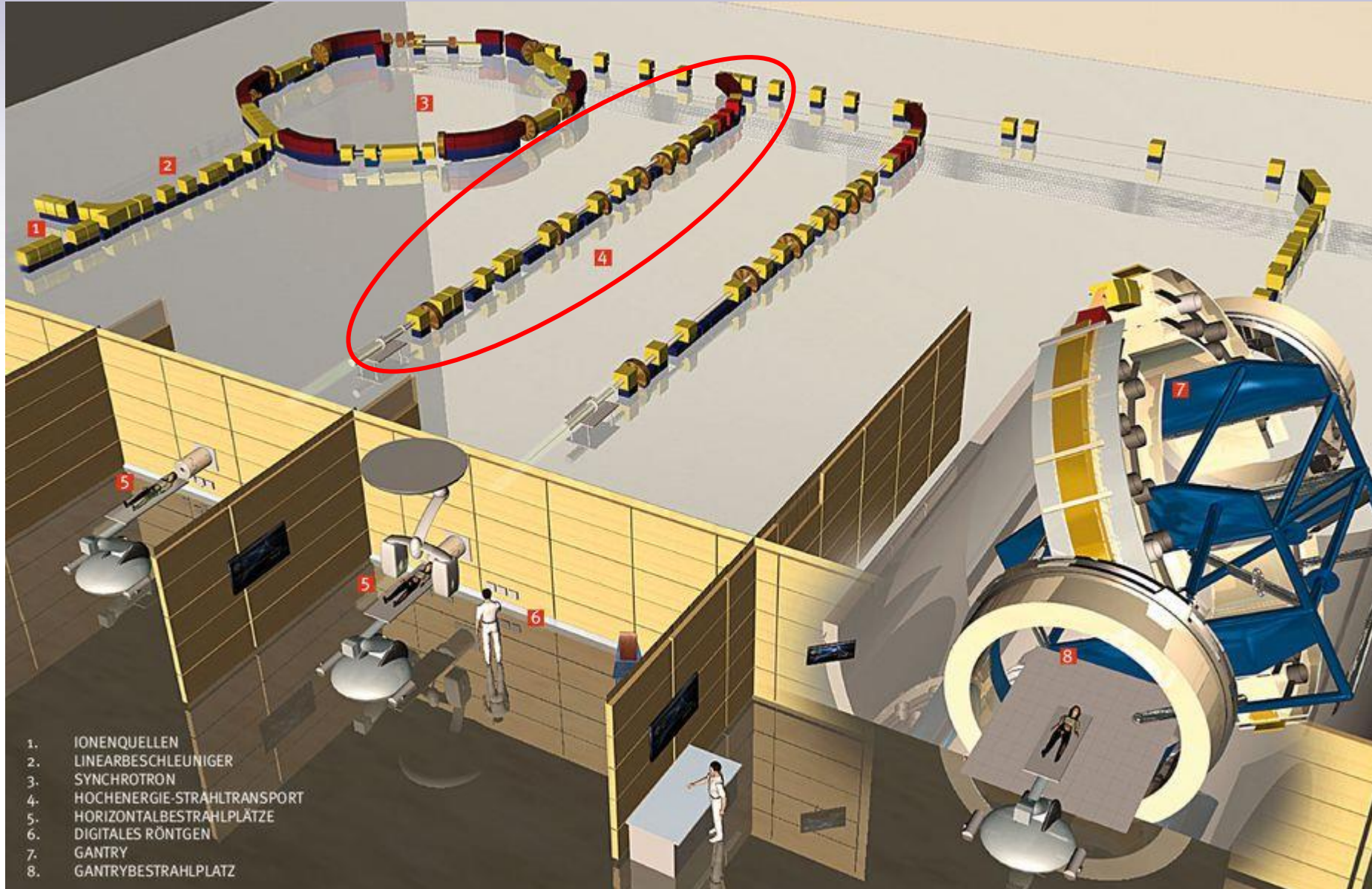
# Sincrotrón







# Canal de Extracción







# Sala de Tratamiento Horizontal







# “Gantry” (Para Tratamiento en Arco)







# Sala de Tratamiento del "Gantry"







# “Gantry” para Iones Pesados





# Bobinas que Orientan y Enfocan El Haz de Iones en el "Gantry"







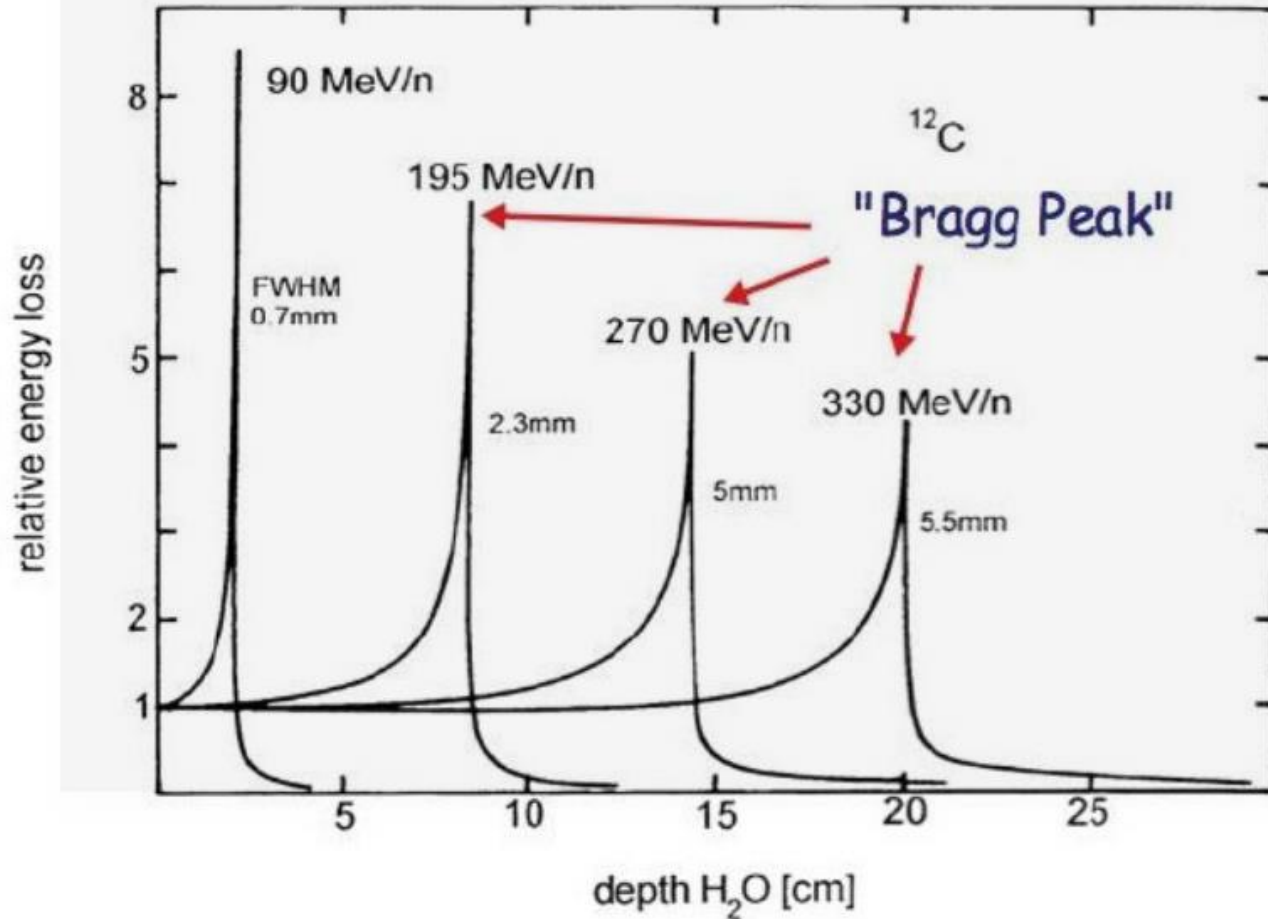
# Sala de Tratamiento del "Gantry"



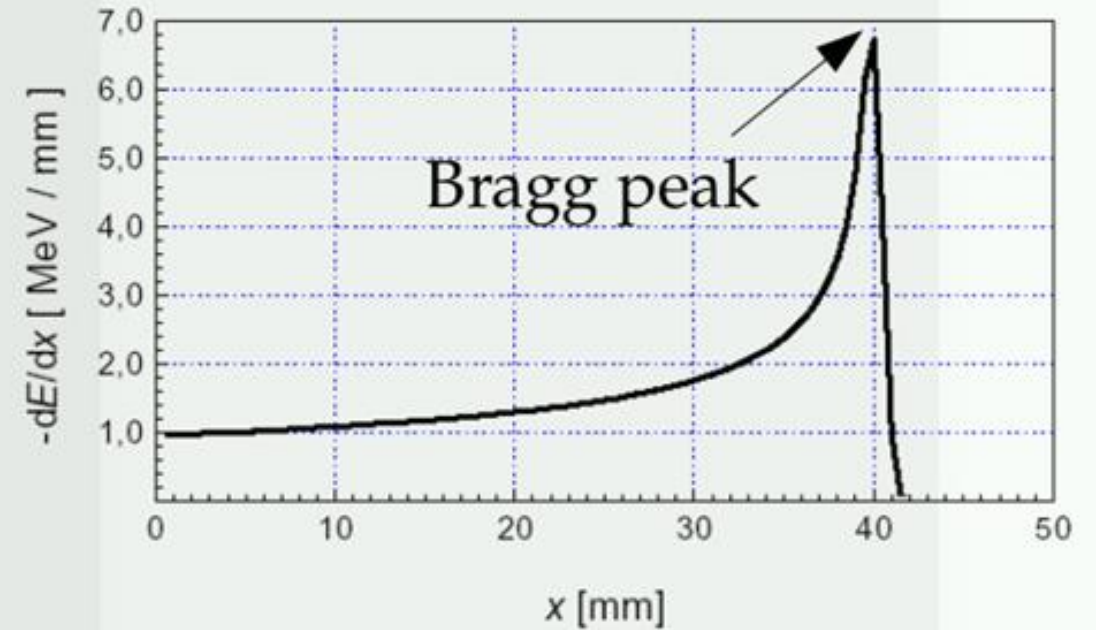


# Entrega de Energía de Protones y $^{12}\text{C}$

Ionisation profile for  $^{12}\text{C}$  ions in water



70 MeV protons in water







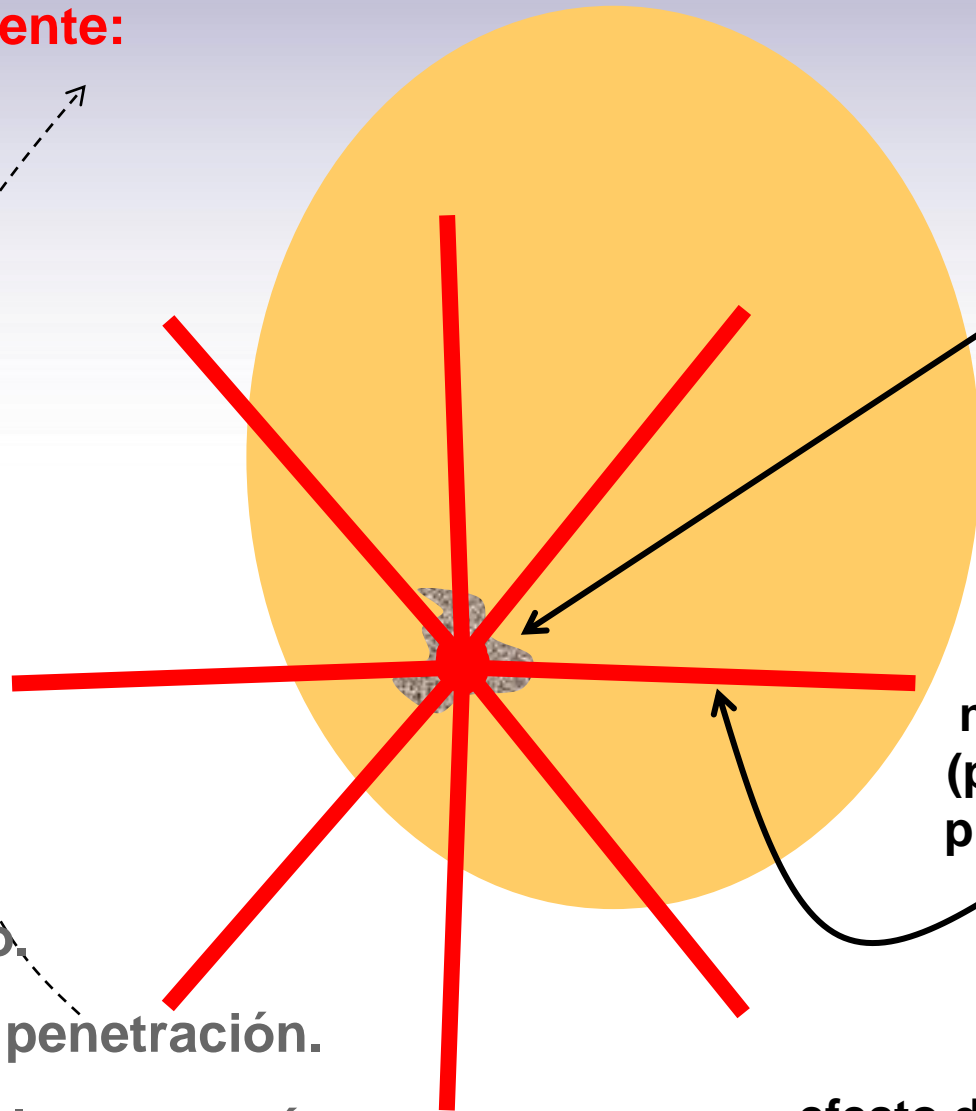
# El "Gantry" Sigue una Estrategia de Tratamiento en Arco

## Único inconveniente:

El costo

giro del arco

- Preciso.
- Ambulatorio.
- Se controla penetración.
- Se adapta a la geometría.

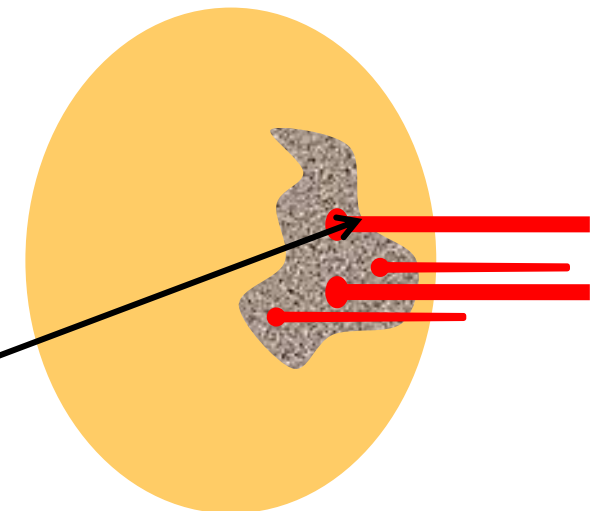


máxima dosis  
(superposición  
de todos los  
haces)

mínima dosis  
(por efecto del  
pico de Bragg)

efecto del pico de Bragg

Con la ayuda de  
tomografía  
computarizada se  
definen los contornos del  
volumen del tumor en 3D  
(rebanadas de 1mm de  
espesor vía software)

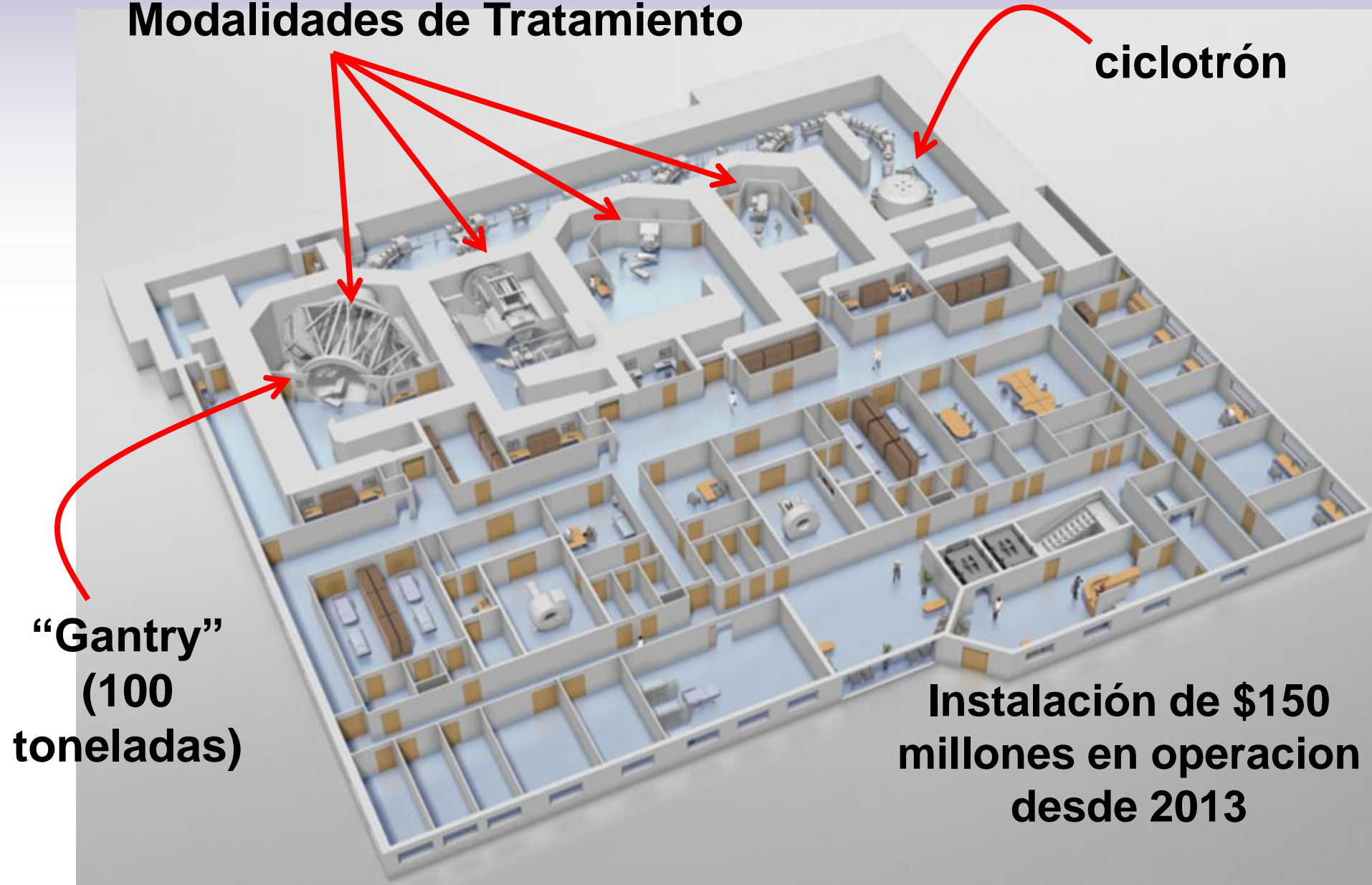


# Ejemplo de Instalación con un Ciclotrón



# Centro de Protones en Seattle, WA, USA

## Modalidades de Tratamiento



**ciclotrón**

**“Gantry”  
(100  
toneladas)**

**Instalación de \$150  
millones en operación  
desde 2013**

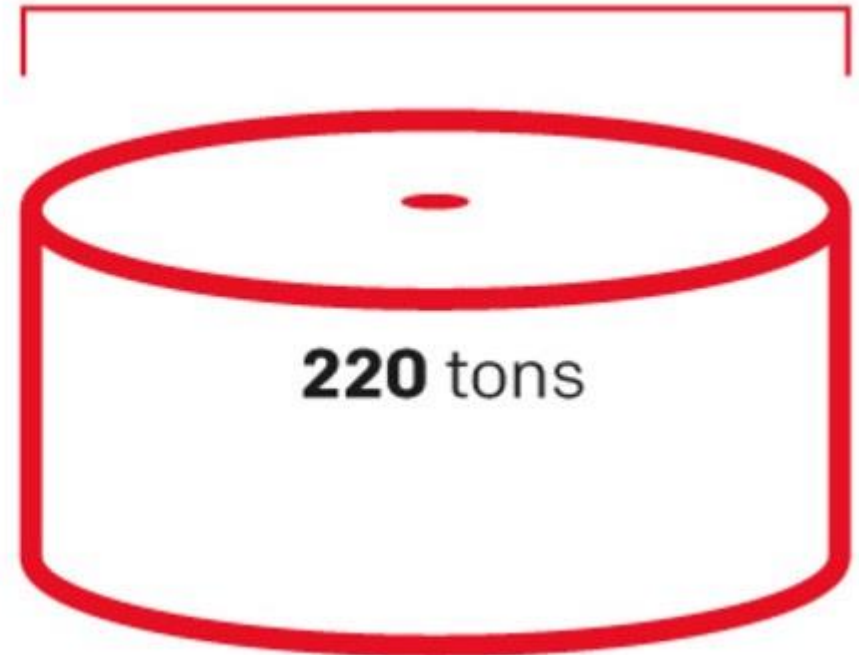




# Ciclotrón del Centro de Protones en Seattle



8 ft tall



220 tons

**Acelera protones  
(60% la  
velocidad de la  
luz)**

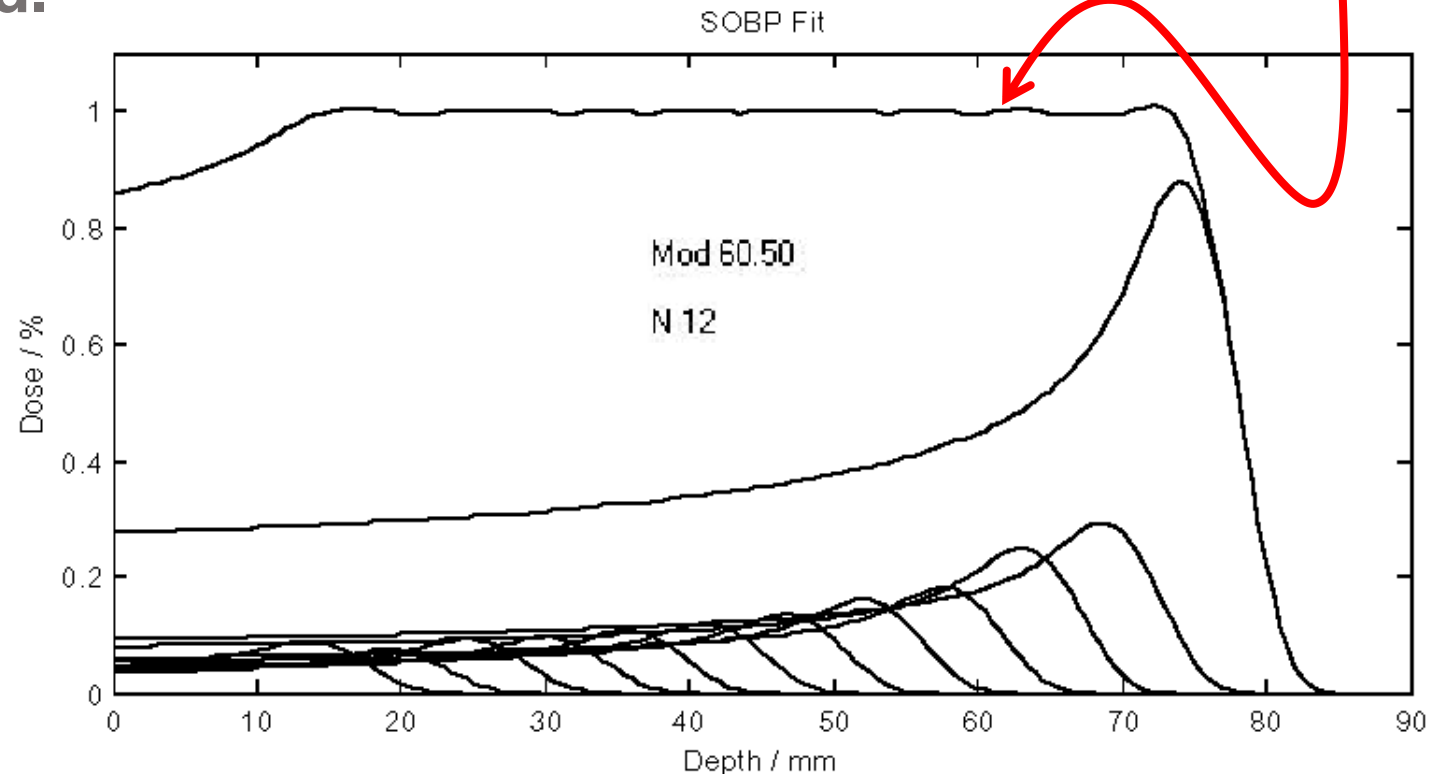


# Máxima Cobertura del Tumor a Profundidad

- El **SOBP (Spread Out Bragg Peak)** es el resultado de la **superposición de curvas de Bragg “puras” moduladas** en profundidad mediante un **modulador** a la salida del acelerador
- Permite una **máxima y uniforme cobertura del tumor a profundidad.**



pieza rotatoria  
con capas en  
secuencia de  
diferente  
grosor

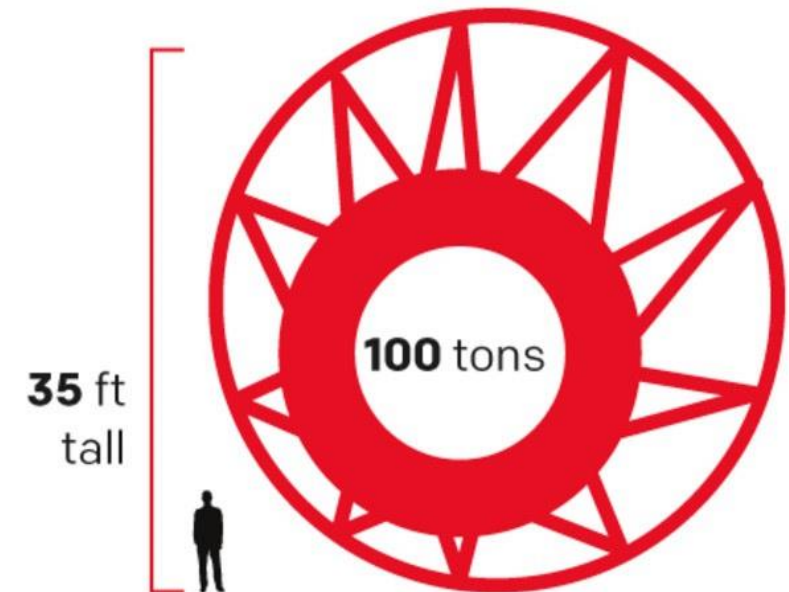




# Las Instalaciones son de Gran Tamaño



**“Gantry” presente en todas las instalaciones para la aplicación del haz de iones**







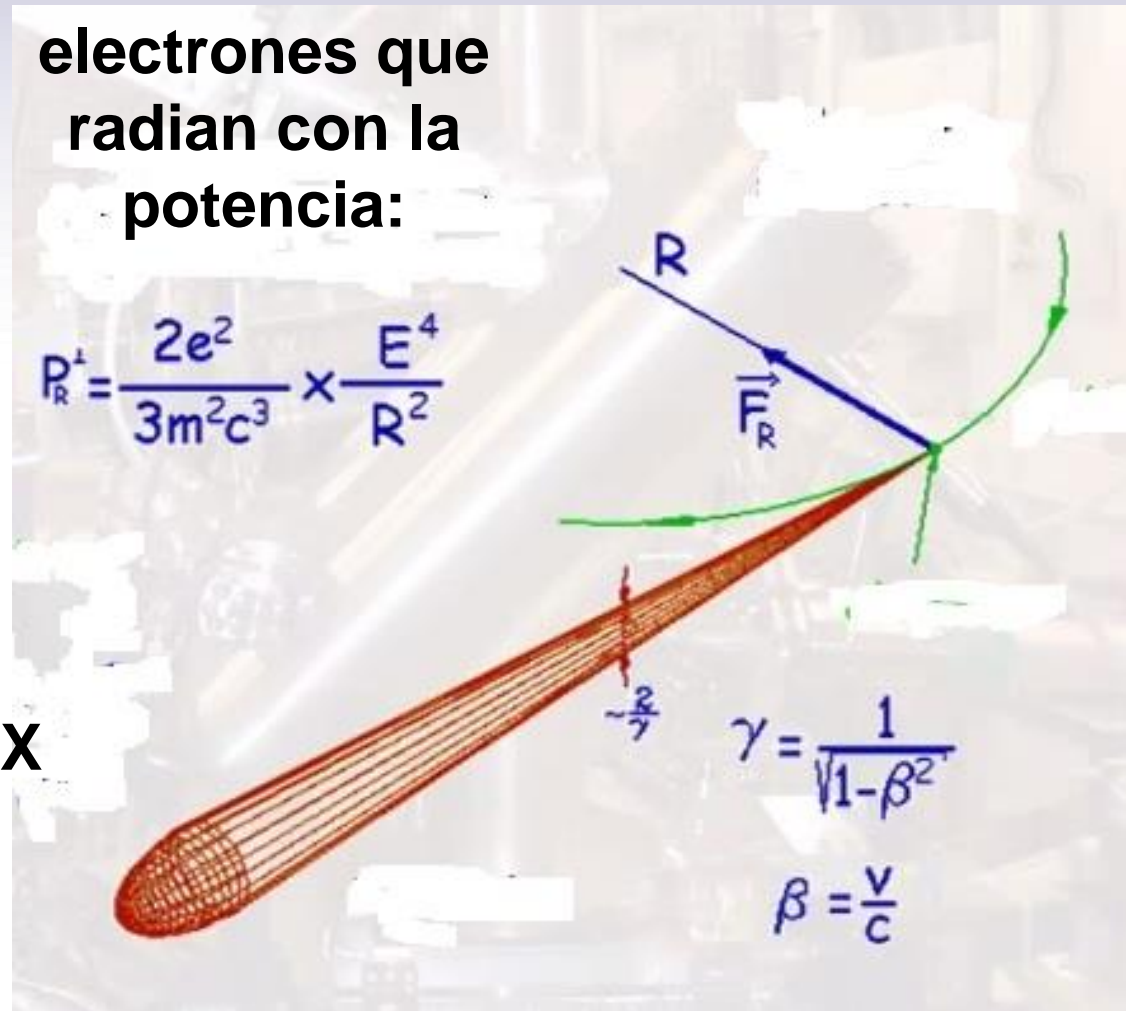
Sincrotrón con Electrones  
para Producir Rayos-X, ESRF,  
Saclay, Francia



# Los Sincrotrones se Pueden Usar con Electrones También

acelera  
electrones que  
radian con la  
potencia:

$$P_R = \frac{2e^2}{3m^2c^3} \times \frac{E^4}{R^2}$$



El haz de rayos-X  
sale con una  
distribución  
angular muy  
estrecha

Energía del  
Electrón:

$$E = \gamma mc^2$$

Radiación es  
monocromática



# “Beamlines” de Haces de Rayos-X y algunas para Tratamientos

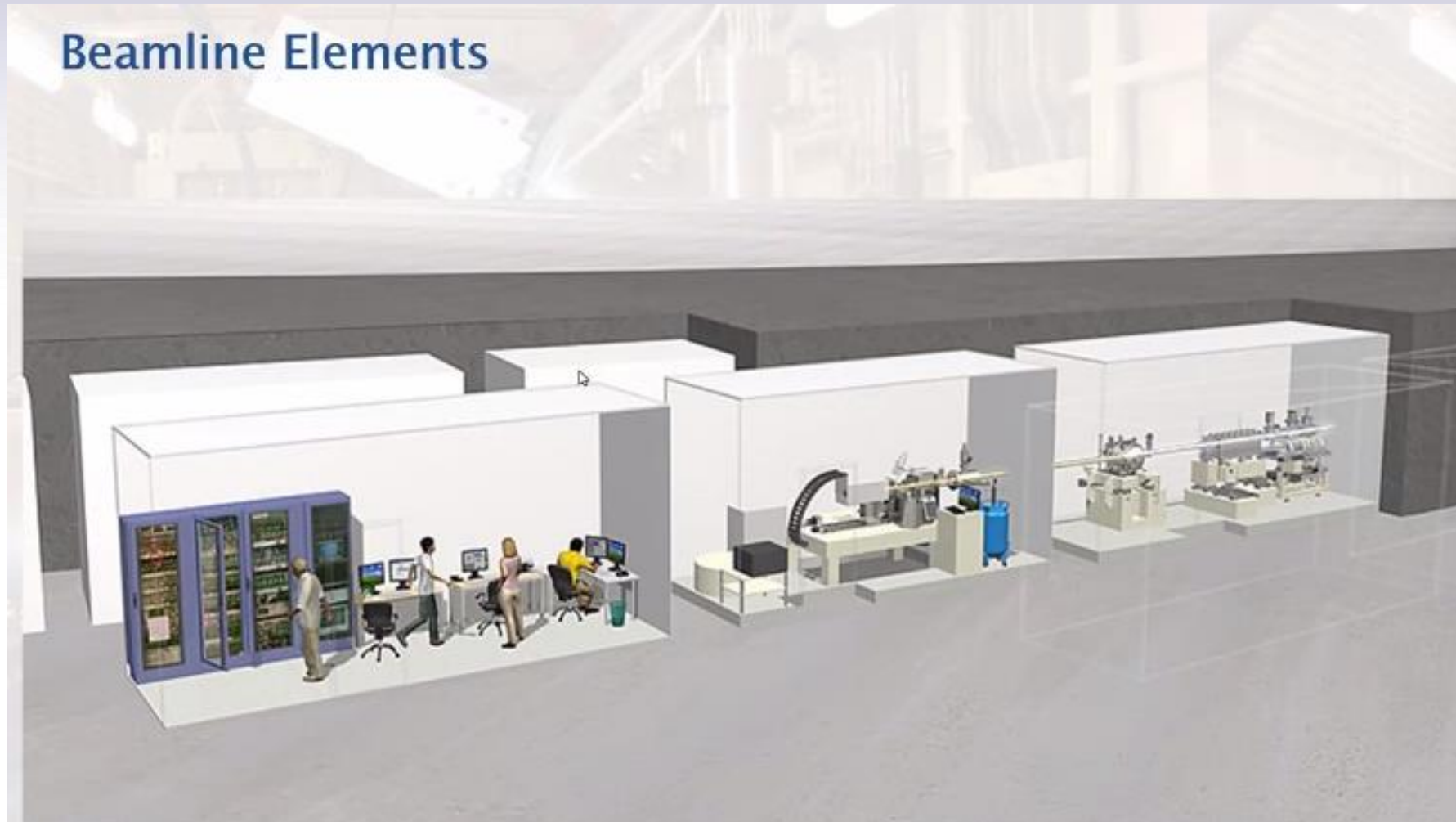


Cortesía del Dr. Germán R, Castro, ex-director e investigador jubilado del ESRF





# Una Salida Típica



**Cortesía del Dr. Germán R, Castro, ex-director e investigador jubilado del ESRF**

# Óptica de Haces de Partículas Cargadas





# Lentes Eléctricas y Magnéticas

• **Objetivo Fundamental:** El control del movimiento transversal de las partículas cargadas del haz a considerar mediante el empleo de campos eléctricos y/o magnéticos.





# Lentes Eléctricas y Magnéticas

- **Objetivo Fundamental:** El control del movimiento transversal de las partículas cargadas del haz a considerar mediante el empleo de campos eléctricos y/o magnéticos.
- Estos campos desvían los haces de partículas cargadas en la misma forma que lentes de vidrio desvían los rayos de luz. **Las ecuaciones que describen los dos procesos son similares.**



# Lentes Eléctricas y Magnéticas

- **Objetivo Fundamental:** El control del movimiento transversal de las partículas cargadas del haz a considerar mediante el empleo de campos eléctricos y/o magnéticos.
- Estos campos desvían los haces de partículas cargadas en la misma forma que lentes de vidrio desvían los rayos de luz. **Las ecuaciones que describen los dos procesos son similares.**
- **Aplicaciones:** Aceleradores de partículas, tubos de rayos catódicos, microscopia electrónica, etc.



# Lentes Eléctricas y Magnéticas

- **Objetivo Fundamental:** El control del movimiento transversal de las partículas cargadas del haz a considerar mediante el empleo de campos eléctricos y/o magnéticos.
- Estos campos desvían los haces de partículas cargadas en la misma forma que lentes de vidrio desvían los rayos de luz. **Las ecuaciones que describen los dos procesos son similares.**
- **Aplicaciones:** Aceleradores de partículas, tubos de rayos catódicos, microscopia electrónica, etc.
- **Óptica Lineal o Gaussiana de Partículas Cargadas:** Supone que tenemos componentes perpendiculares de la velocidad muy pequeñas comparadas con la componente paralela al eje de movimiento principal.





# Lentes Eléctricas y Magnéticas

- **Objetivo Fundamental:** El control del movimiento transversal de las partículas cargadas del haz a considerar mediante el empleo de campos eléctricos y/o magnéticos.
- Estos campos desvían los haces de partículas cargadas en la misma forma que lentes de vidrio desvían los rayos de luz. **Las ecuaciones que describen los dos procesos son similares.**
- **Aplicaciones:** Aceleradores de partículas, tubos de rayos catódicos, microscopía electrónica, etc.
- **Óptica Lineal o Gaussiana de Partículas Cargadas:** Supone que tenemos componentes perpendiculares de la velocidad muy pequeñas comparadas con la componente paralela al eje de movimiento principal.
- Bajo esta situación se puede hacer la aproximación de suponer que **fuerzas lineales gobiernan el comportamiento** del movimiento perpendicular de las partículas cargadas en el haz.



# ¿Producen Efectos las Componentes Transversales del Haz?

- Las partículas cargadas siempre van a tener **componentes perpendiculares** a la dirección principal por el **principio de incertidumbre**. No obstante, estas componentes pueden ser muy pequeñas.



# ¿Producen Efectos las Componentes Transversales del Haz?

- Las partículas cargadas siempre van a tener **componentes perpendiculares** a la dirección principal por el **principio de incertidumbre**. No obstante, estas componentes pueden ser muy pequeñas.
- Los efectos que producen contribuciones importantes en la generación de componentes transversales están relacionados a:



# ¿Producen Efectos las Componentes Transversales del Haz?

- Las partículas cargadas siempre van a tener **componentes perpendiculares** a la dirección principal por el **principio de incertidumbre**. No obstante, estas componentes pueden ser muy pequeñas.
- Los efectos que producen contribuciones importantes en la generación de componentes transversales están relacionados a:
  1. **Dispositivos de extracción o inyección** que tienen imperfecciones en la forma de los campos electromagnéticos. La presencia de **carga espacial** genera una fuerza de repulsión que contribuye a expandir el haz.





# ¿Producen Efectos las Componentes Transversales del Haz?

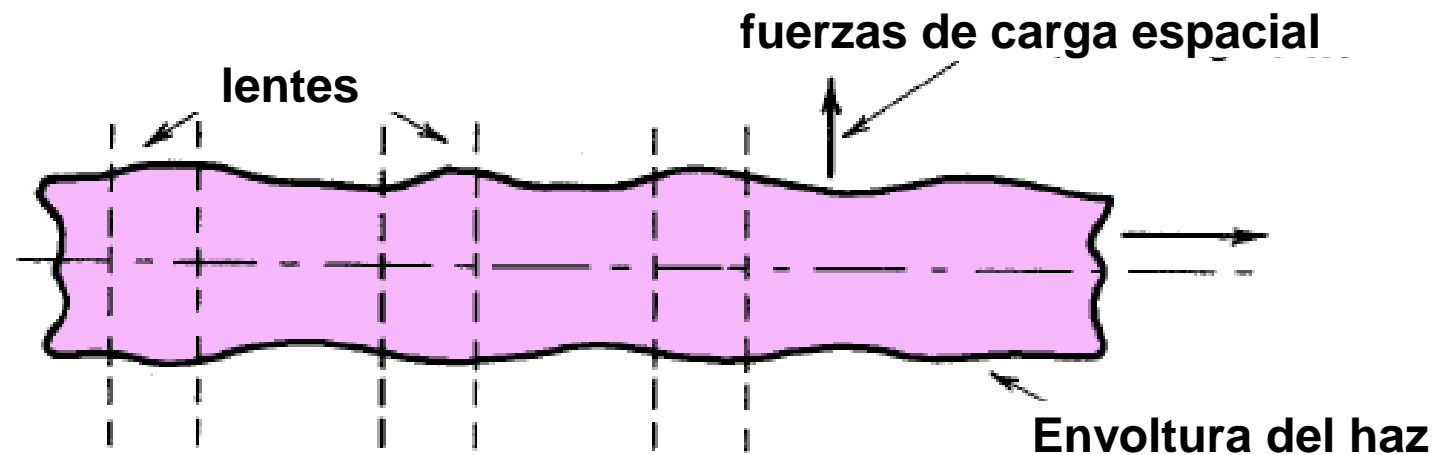
- Las partículas cargadas siempre van a tener **componentes perpendiculares** a la dirección principal por el **principio de incertidumbre**. No obstante, estas componentes pueden ser muy pequeñas.
- Los efectos que producen contribuciones importantes en la generación de componentes transversales están relacionados a:
  1. **Dispositivos de extracción o inyección** que tienen imperfecciones en la forma de los campos electromagnéticos. La presencia de **carga espacial** genera una fuerza de repulsión que contribuye a expandir el haz.
  2. **Alta temperatura** en dispositivos de extracción o inyección que contribuye con movimientos aleatorios de origen térmico.



# ¿Qué Tareas Llevan A Cabo Las Lentes Electromagnéticas?

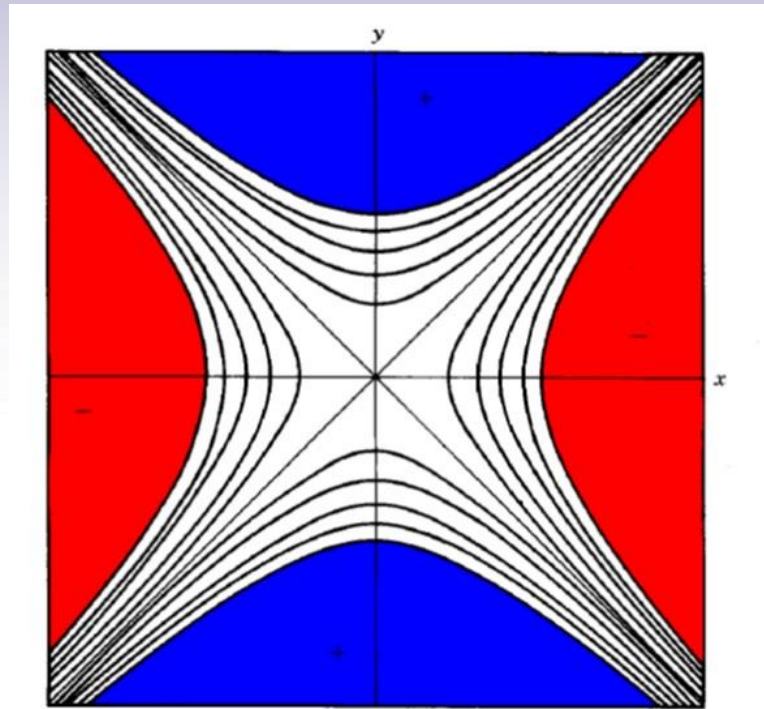
Son dos fundamentales:

- **Confinamiento del haz:** Esto es particularmente importante en aceleradores de alta energía donde las partículas viajan largas distancias y tienen que pasar por espacios muy reducidos.
- Normalmente se aspira a que el haz tenga una sección transversal con un radio que varía lentamente con la longitud y en forma oscilatoria. Esto se logra con un arreglo periódico de lentes o lo que haga sus veces.

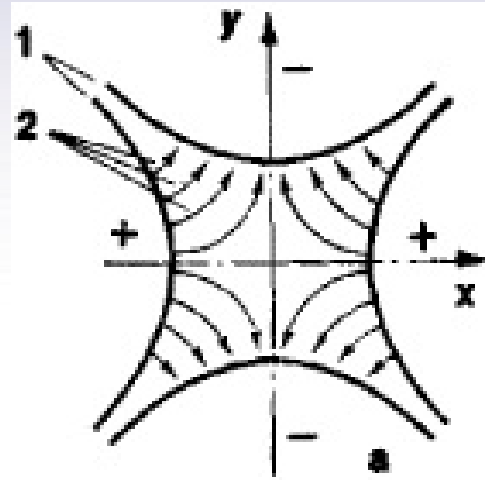




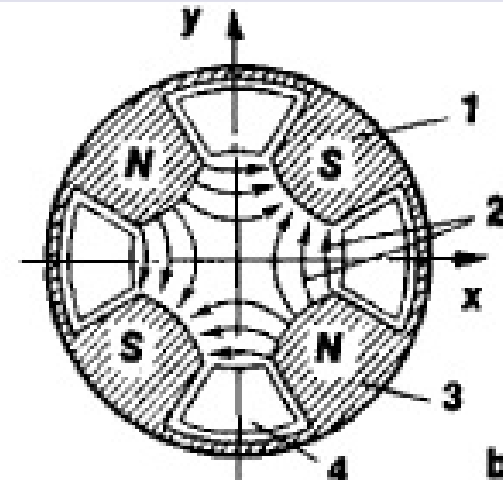
# Lentes Cuadrupolares Eléctricas y Magnéticas



**Eléctrica: Equipotenciales**



**Eléctrica:  
Campos**

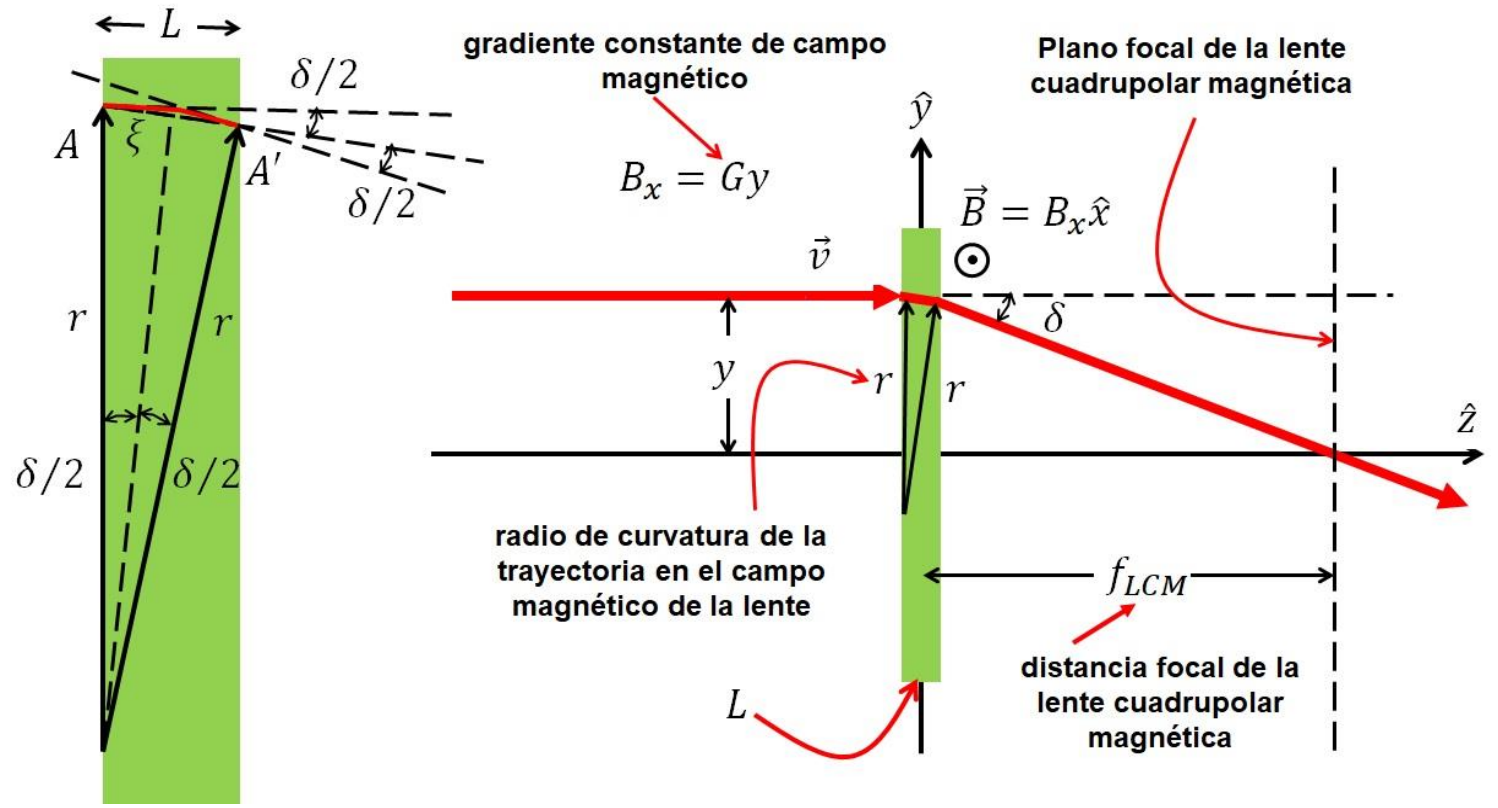


**Magnética:  
Campos**

**Eléctricas:** Vemos que el mecanismo de retorno al eje principal va funcionar solamente cerca del centro de la lente, siendo esa su limitación principal



# Lente Cuadripolar Magnética (Delgada)



$$\delta = \frac{L}{r} = \frac{qBL}{\beta E_{mec}}$$

$$= \frac{qGL}{\beta E_{mec}} y = \frac{y}{f_{LCM}}$$

$$f_{LCM} = \frac{\beta E_{mec}}{qGL} = \frac{\beta \gamma m c^2}{qGL}$$

**Signo de  $L_{LCM}$ :**  
 Positivo si el sentido del campo magnético es  $\odot$  y negativo cuando  $\otimes$ , si  $q > 0$

$$L = 2r \sin \frac{\delta}{2} \cos \frac{\delta}{2} = r \sin \delta \approx r \delta \quad \rightarrow \quad \delta \approx \frac{L}{r}$$

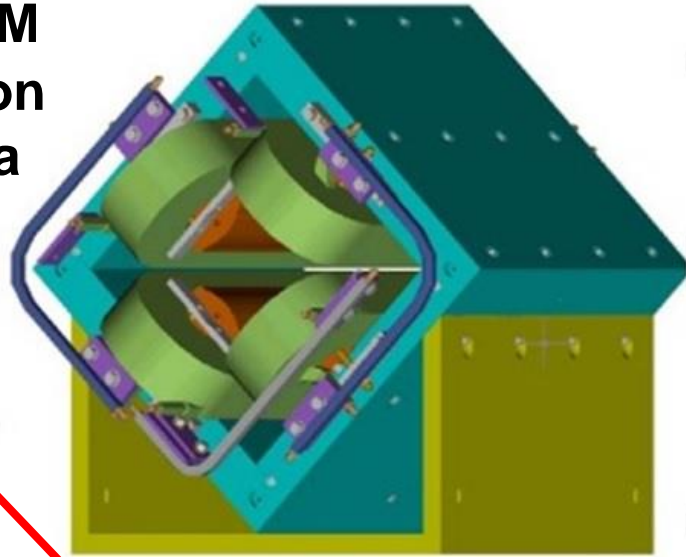
$$B_r = \frac{p}{r} = \frac{\gamma m v}{r} = \frac{\gamma m \beta c}{r} = \frac{qB}{c} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{r} = \frac{qB}{\beta \gamma m c^2} = \frac{qB}{\beta E_{mec}}$$





# Lente Cuadripolar Magnética (LCM): Converge y Diverge

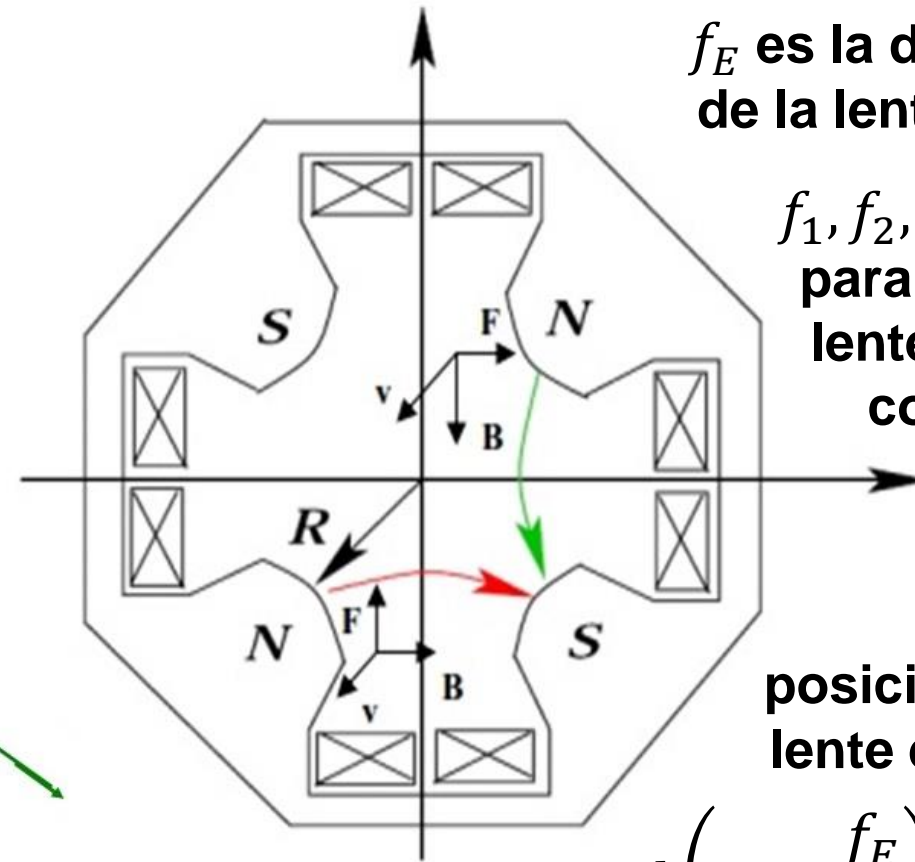
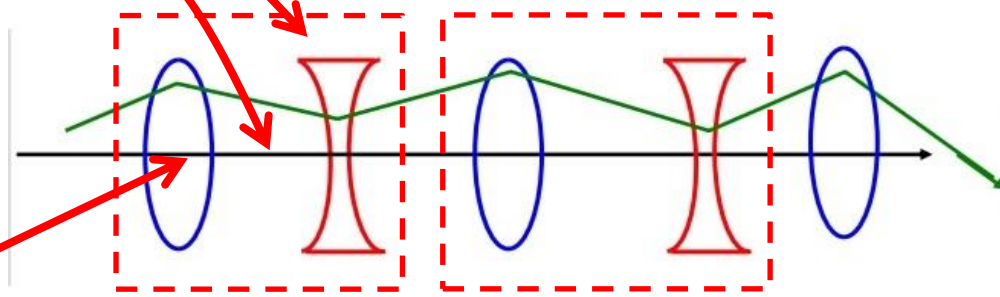
En el par, una LCM está rotada  $\pi/2$  con respecto a la otra



$z = d$

$z = z_E$

$z = 0$



$f_E$  es la distancia focal de la lente equivalente

$f_1, f_2, d$  se manejan para producir una lente equivalente convergente

posición  $z_E$  de la lente equivalente

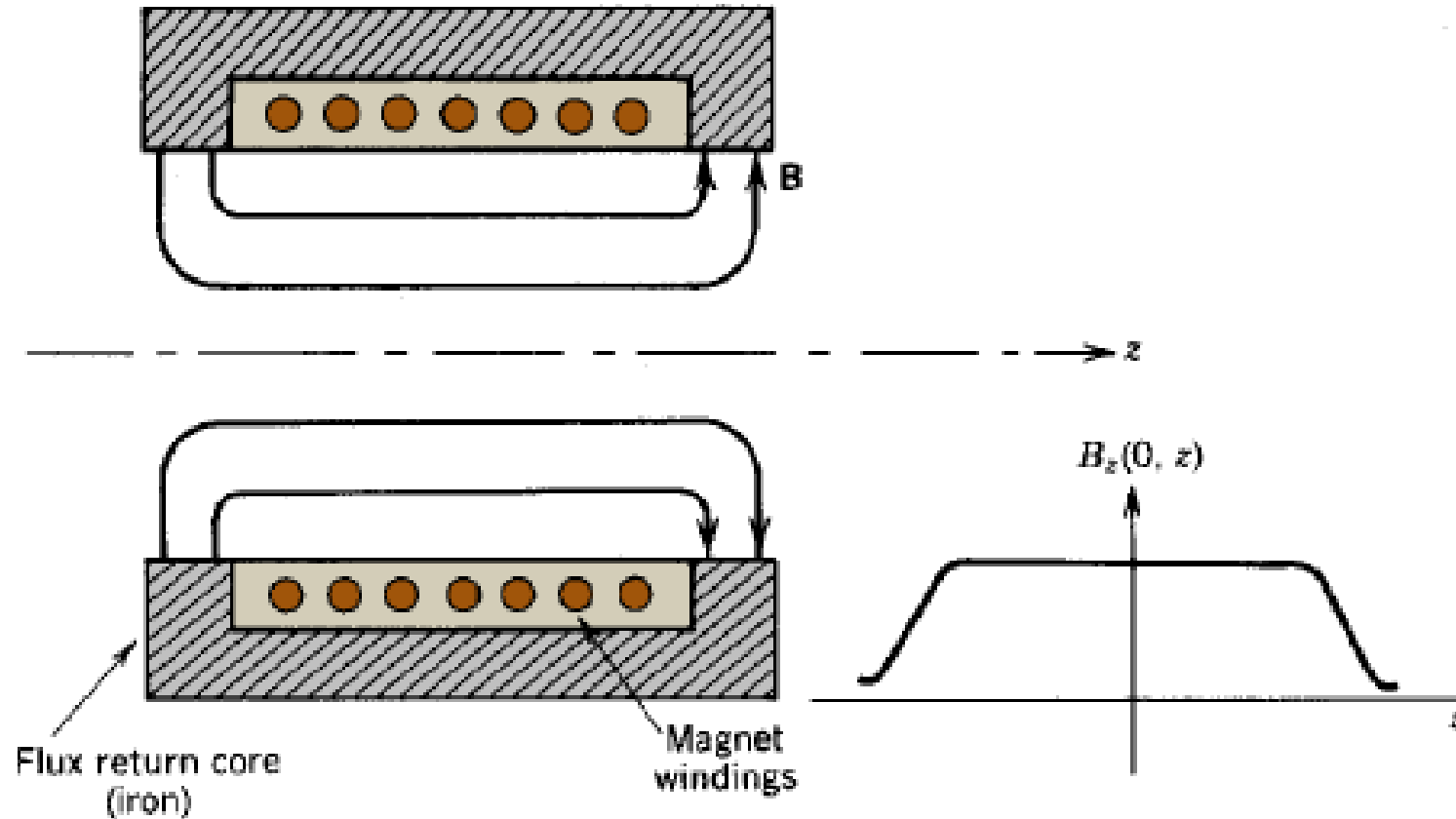
$$z_E = d \left( 1 - \frac{f_E}{f_1} \right) \quad f_E < f_1$$

$$\frac{1}{f_E} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

**Compensación y Solución:** Par de lentes, una convergente con  $f_1 > 0$  y otra divergente con  $f_2 < 0$ .

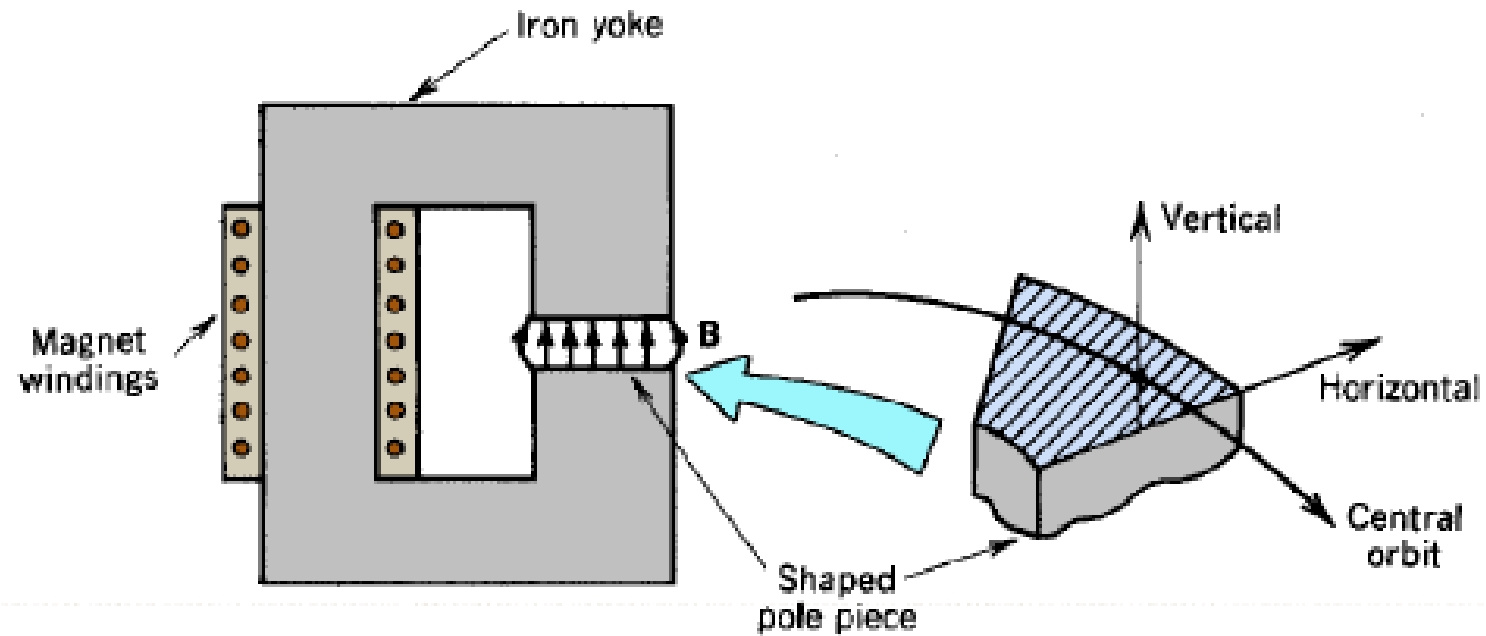


# Otros Ejemplos de Lentes: Solenoidal Magnético



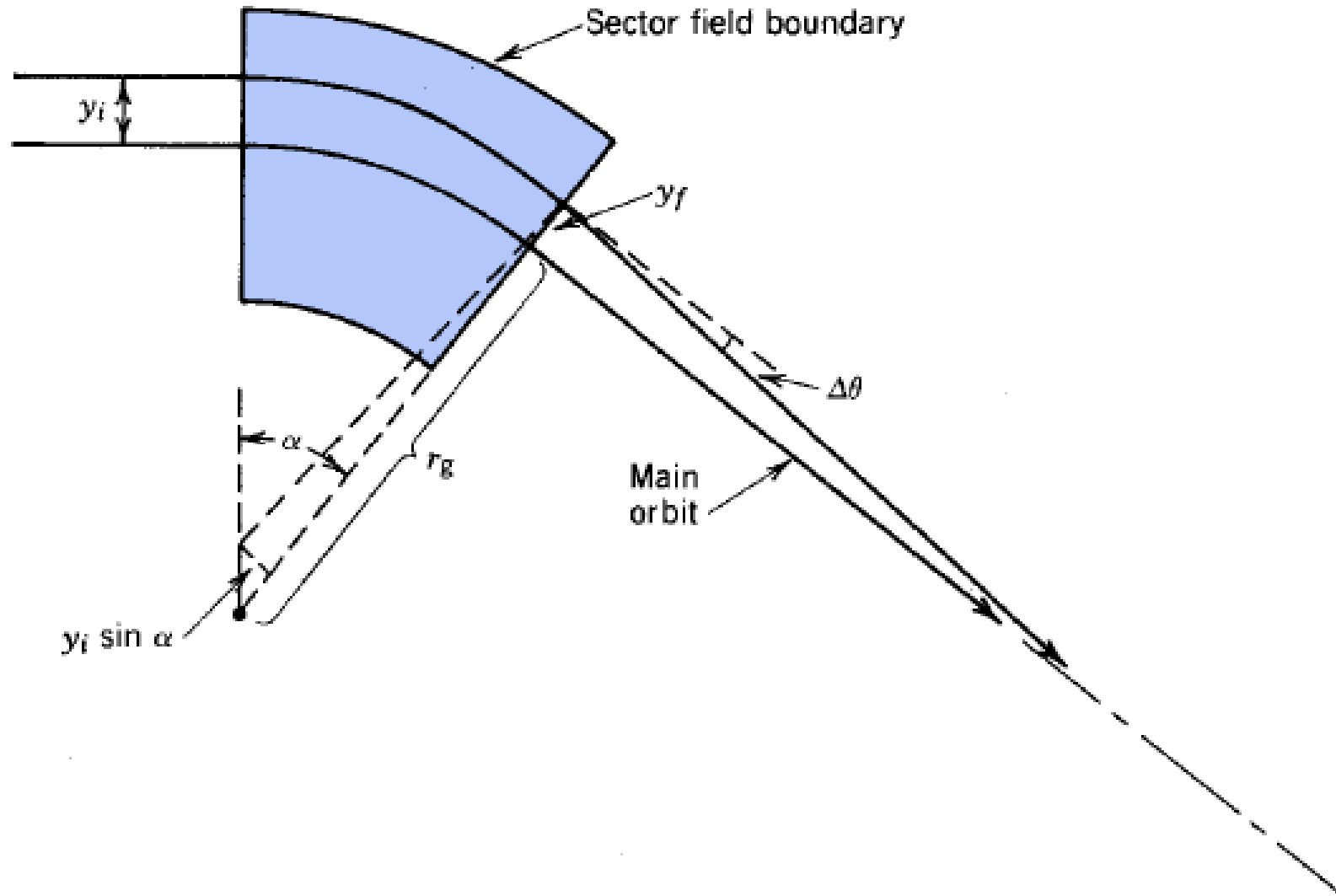


# Otros Ejemplos de Lentes: Imán Deflector





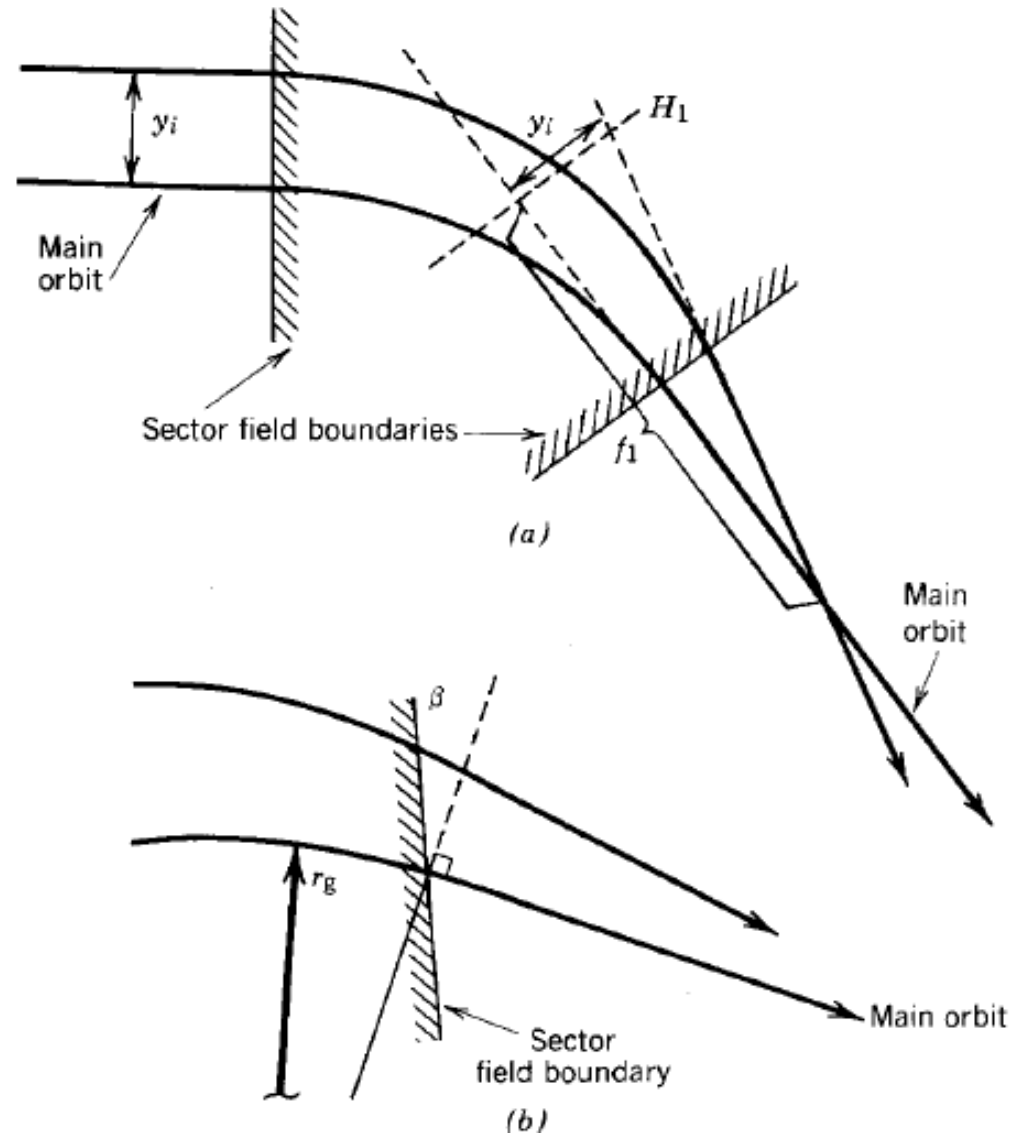
# Otros Ejemplos de Lentes: Imán Deflector Y Enfocador





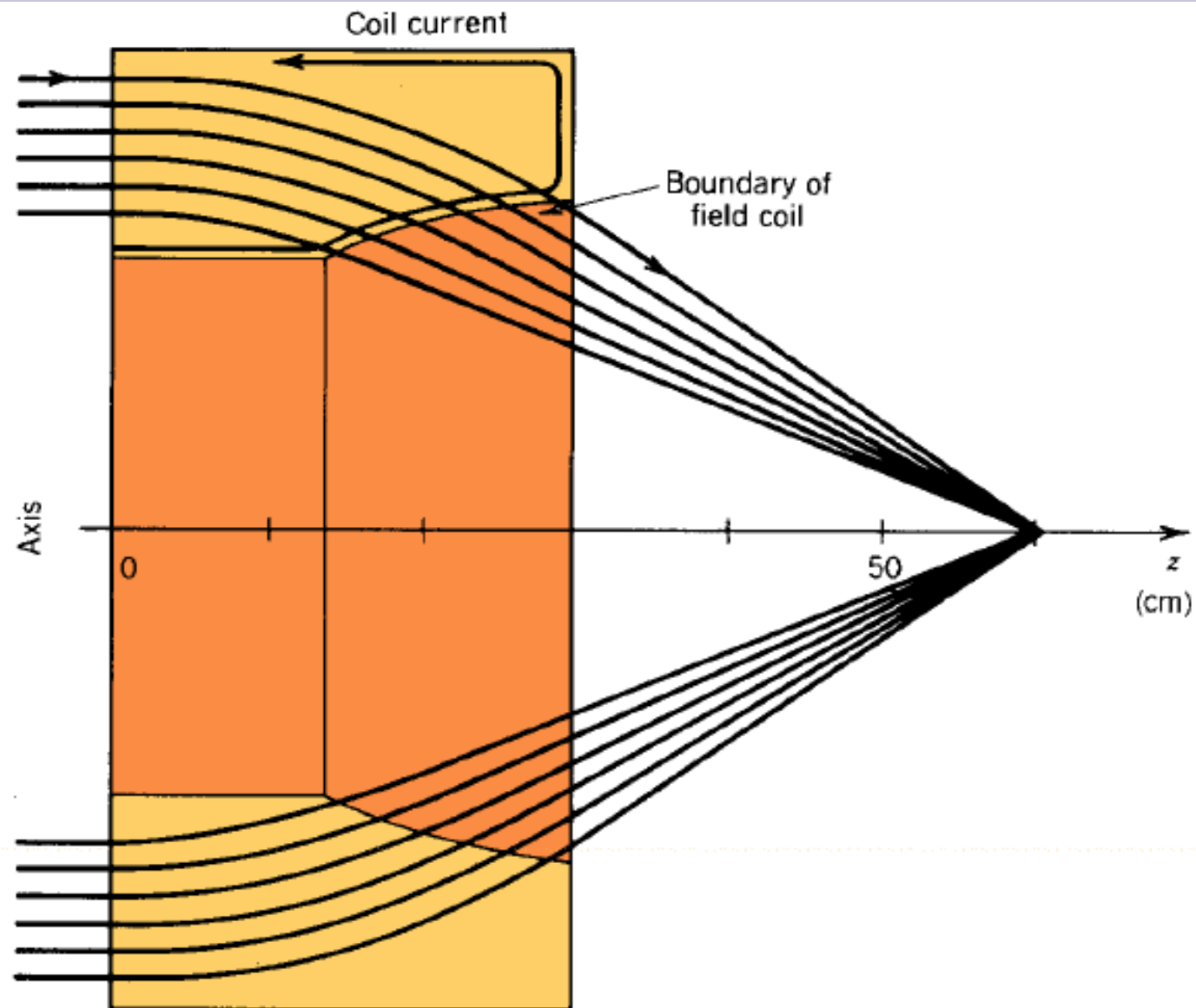


# Otros Ejemplos de Lentes: Imán Deflector y Enfocador



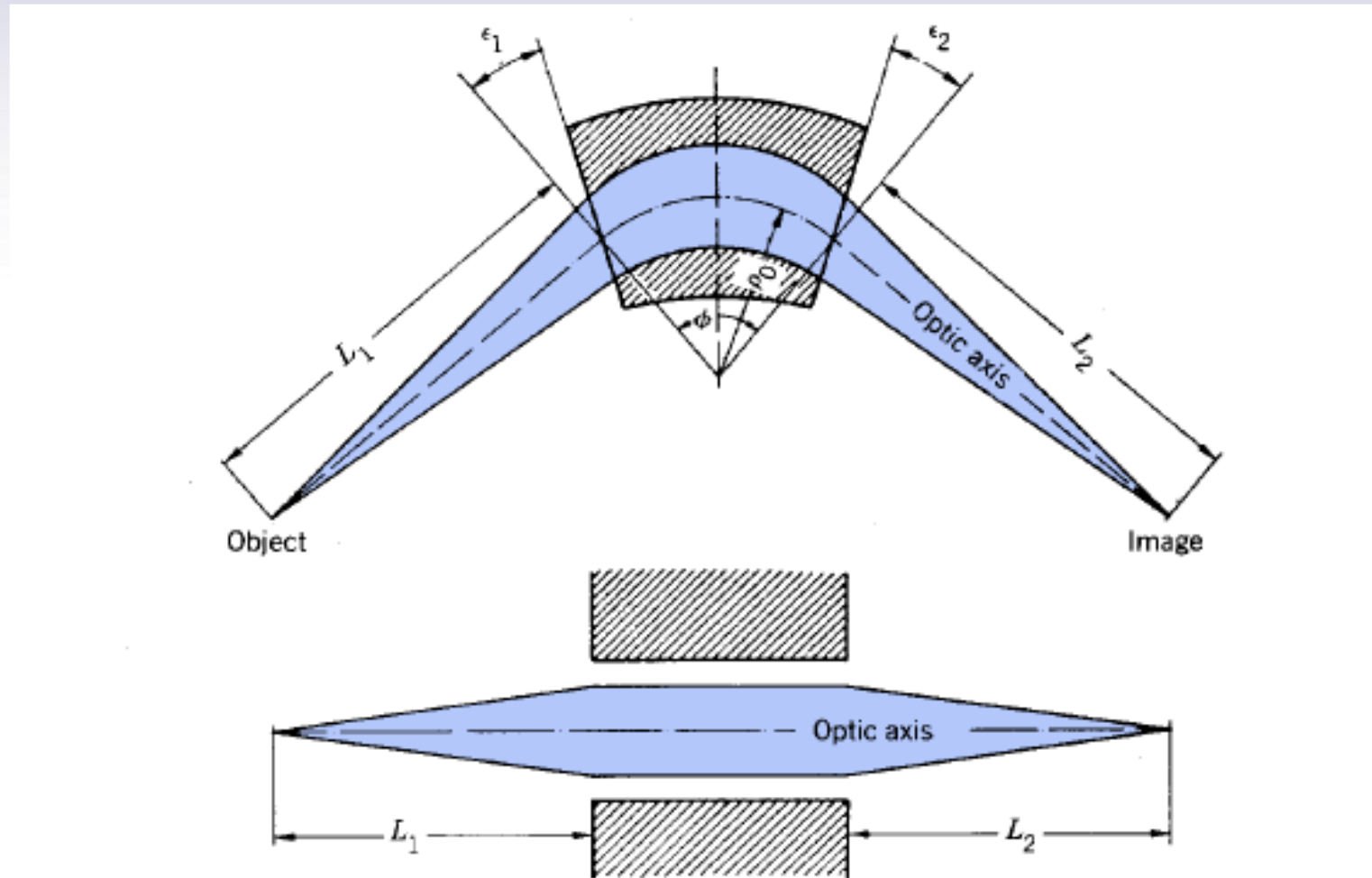


# Otros Ejemplos de Lentes: Otro Imán Deflector y Enfocador





# Otros Ejemplos de Lentes: Un Tercer Imán Deflector y Enfocador





# Referencias Recomendadas

1. Wiedemann, H. (2007) *Particle Accelerator Physics.*, Springer, New York, USA (disponible en [www.archive.org](http://www.archive.org)).
2. Newton, D. (1989) Particle accelerators : from the cyclotron to the superconducting super collider, F Watts, New York, USA (disponible en [www.archive.org](http://www.archive.org); es una Buena introducción al tema e incluye las expectativas con el SSC que nunca se dieron y décadas más tarde se materializaron con LHC).
3. Wilson, R. (2004) A brief history of the Harvard University cyclotrons, Harvard University Press, Cambridge, USA (disponible en [www.archive.org](http://www.archive.org); incluye desarrollos en radioterapia)





<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.