

Aceleradores Lineales de Electrones y Protones

Rafael Martín-Landrove
Escuela de Física

Universidad Central de Venezuela



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



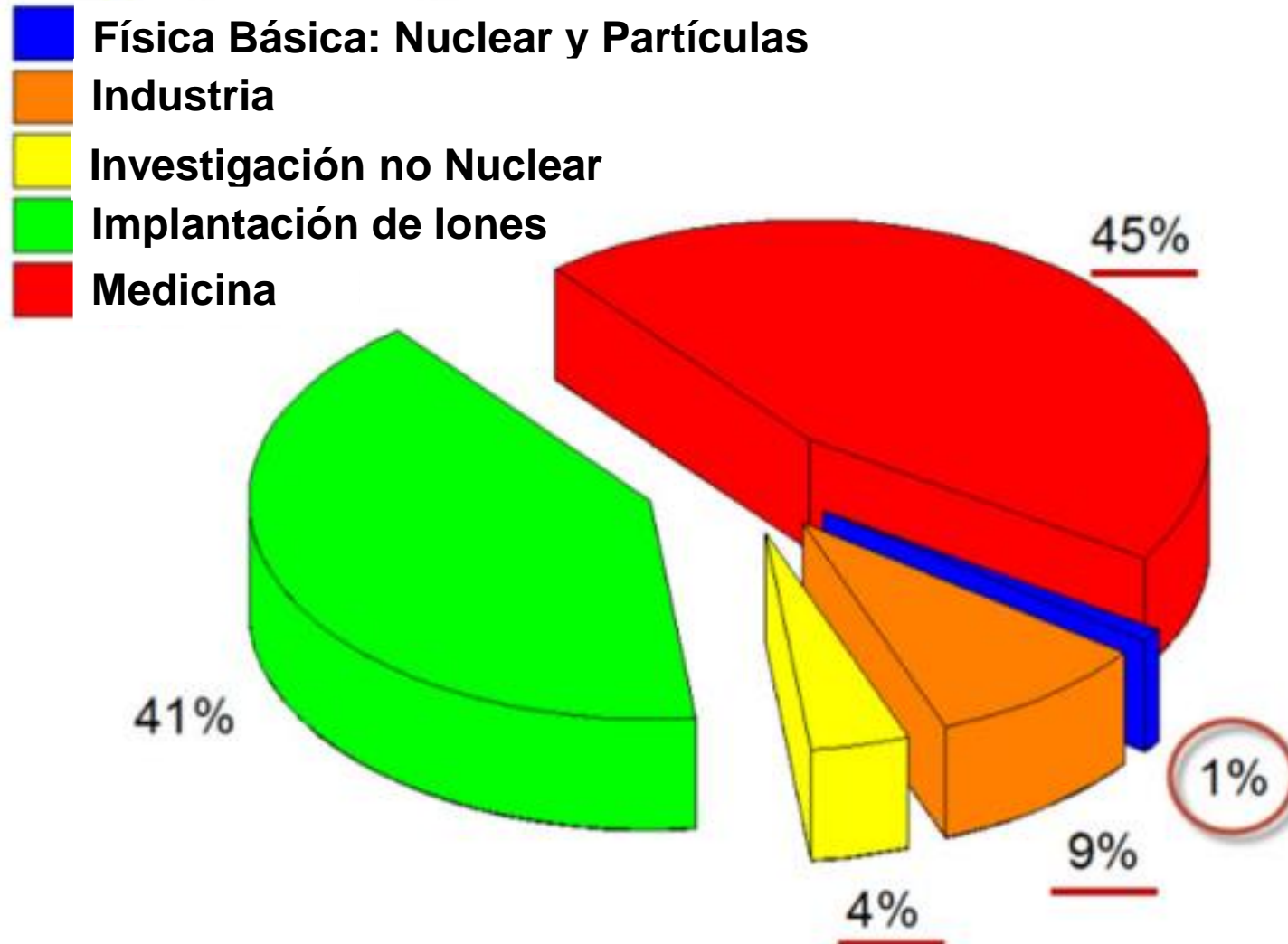
Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

UAN
UNIVERSIDAD
ANTONIO NARIÑO





Distribución por Uso de los Aceleradores de Partículas





Aplicaciones biomédicas con aceleradores de partículas de alta energía siempre ha sido un capítulo importante de la investigación aplicada en física nuclear.

Hay instalaciones bajo construcción en este momento, al tiempo que otras están en proceso de actualización (en centros donde el objetivo principal es física nuclear básica; se reconoce la importancia de la investigación en esta área y la asistencia clínica a pacientes).

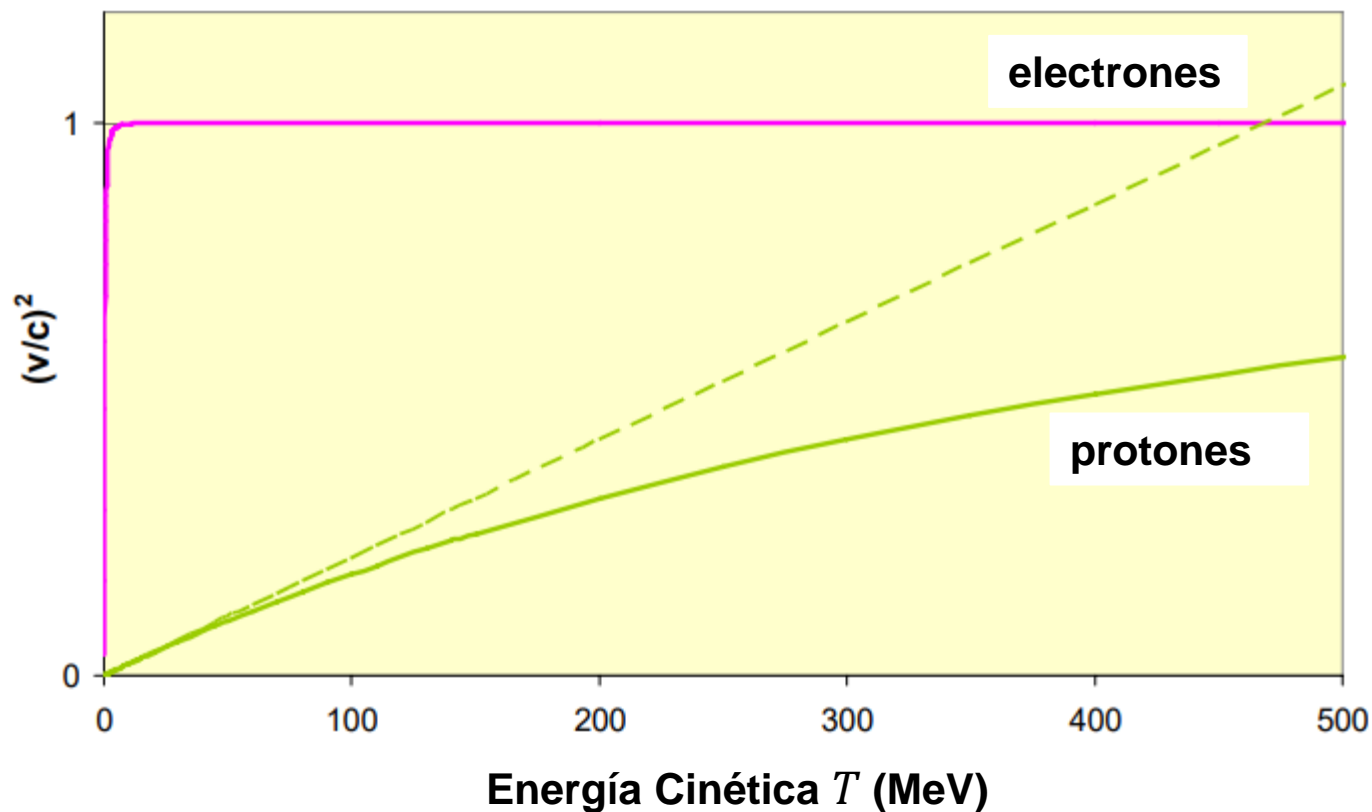
La coordinación de los esfuerzos en investigación básica a nivel global están a cargo de la International Biophysics Collaboration (IBC), así como la investigación combinada, básica, clínica y traslacional está liderada principalmente por la International Atomic Energy Agency (IAEA) u Organismo Internacional de Energy Atómica (OIEA), la International Organization in Medical Physics (IOMP) y la American Association of Physicists in Medicine (AAPM).

Aceleradores Lineales de Electrones e Iones



Diferencia Fundamental Entre Electrones y Protones

- Viene dada por su masa ($m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$ vs. $m_p c^2 = 938.6 \text{ MeV}$, factor de ~ 1832).
- Ello lleva a que al acelerarse haya diferencias importantes



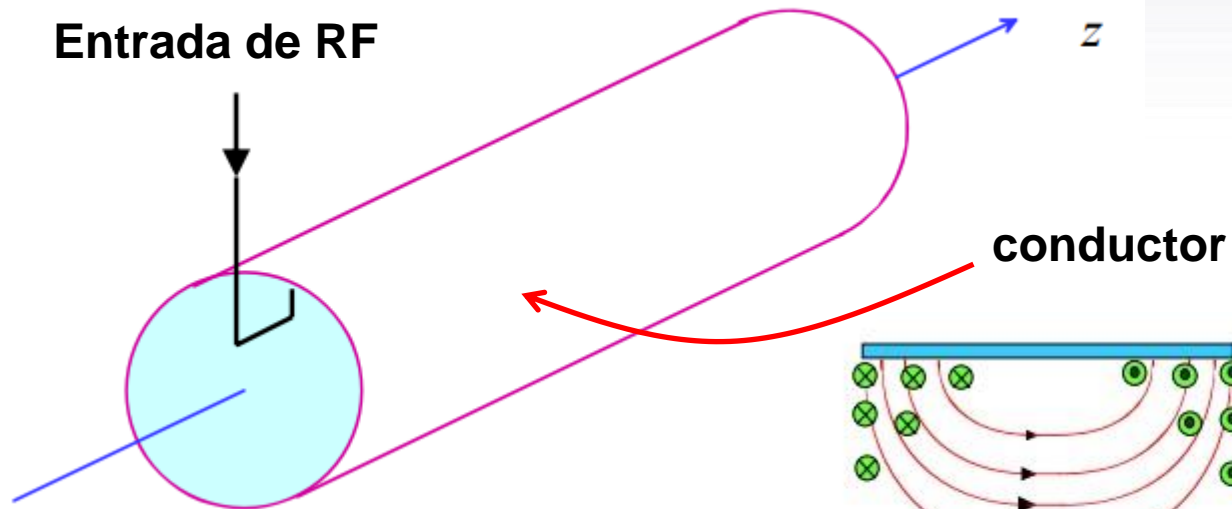
$$\beta^2 = 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{T}{m_0 c^2}\right)^2}$$

- Vemos que los **electrones** alcanzan más rápidamente con T su aproximación a c .
- Los **protones** lo hacen más lentamente: Hay que adaptar el **acelerador lineal** para lograr una transferencia de **energía eficiente**.



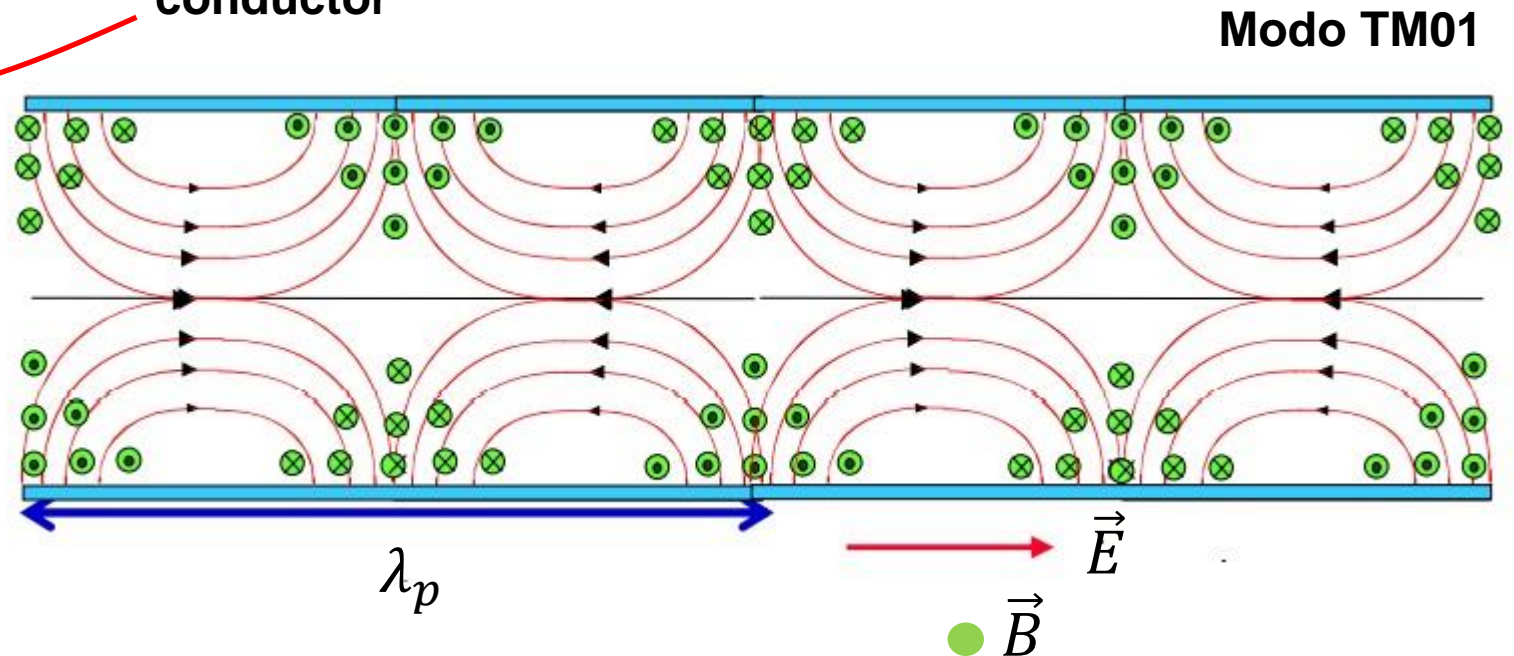
Aproximación al Problema: Guía de Ondas con RF

- El acercamiento al problema que resultaría más interesante es el considerar para ambos casos una guía de ondas cilíndrica que trabaje en el rango de las radiofrecuencias



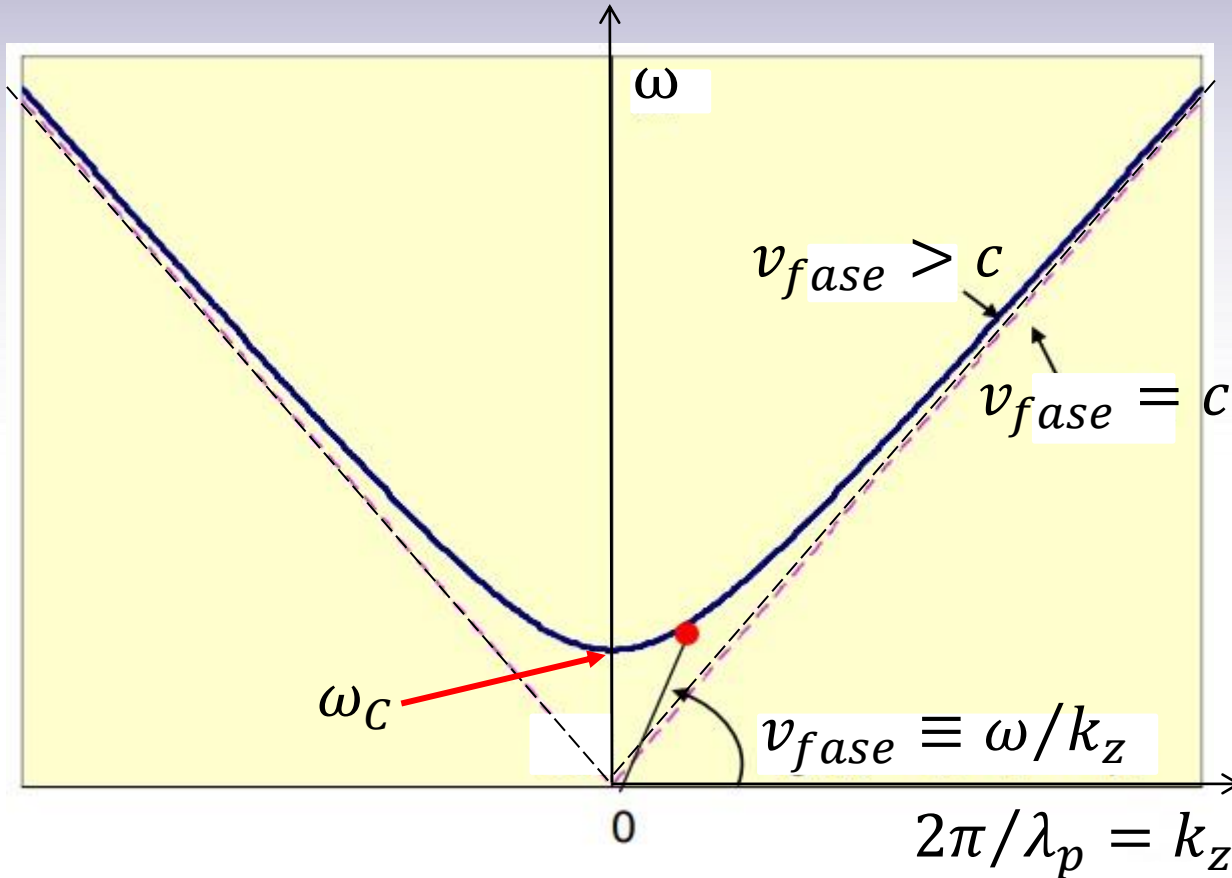
- La configuración de los campos se propaga con **velocidad de fase**.
- **Sincronizar** con las partículas.

Modos TM (transversales magnéticos) tienen E_z paralela al eje de la guía.





Velocidad de Fase: Detalle en la Relación de Dispersión



- **Problema aparente:** Como se cumple

$$v_{fase} > c$$

entonces **no podemos sincronizar con el movimiento de las partículas**

- **Importante:** No hay entidad “real” que se mueva a esa velocidad, pero si se mueven con la **velocidad de grupo:**

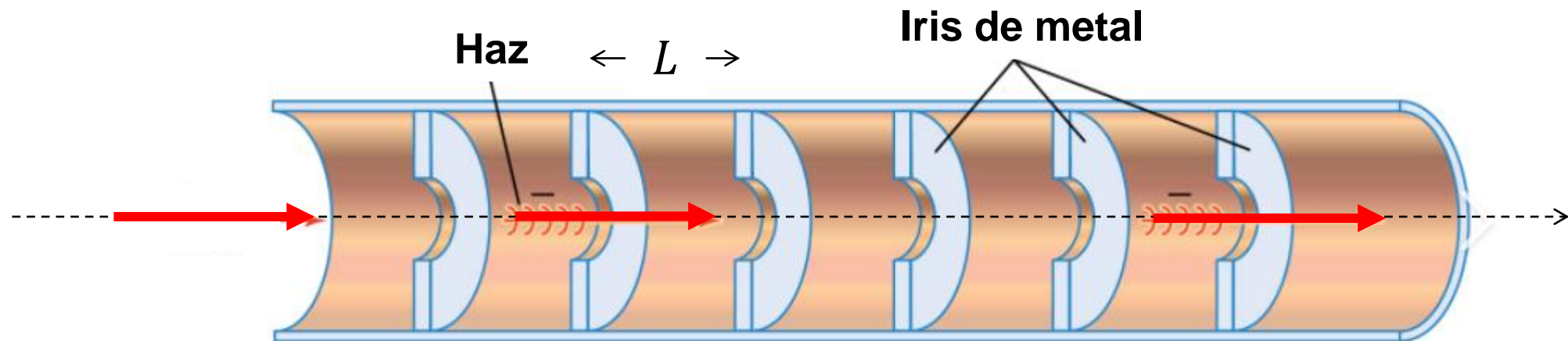
$$v_{grupo} \equiv \frac{d\omega}{dk}$$

- Hay que proponer o modificar la configuración geométrica de manera que $v_{fase} \leq c$.



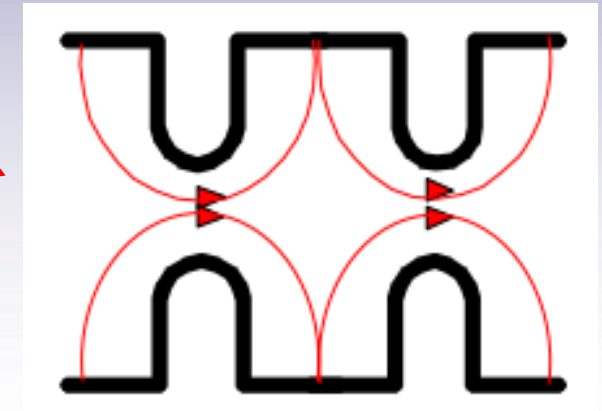
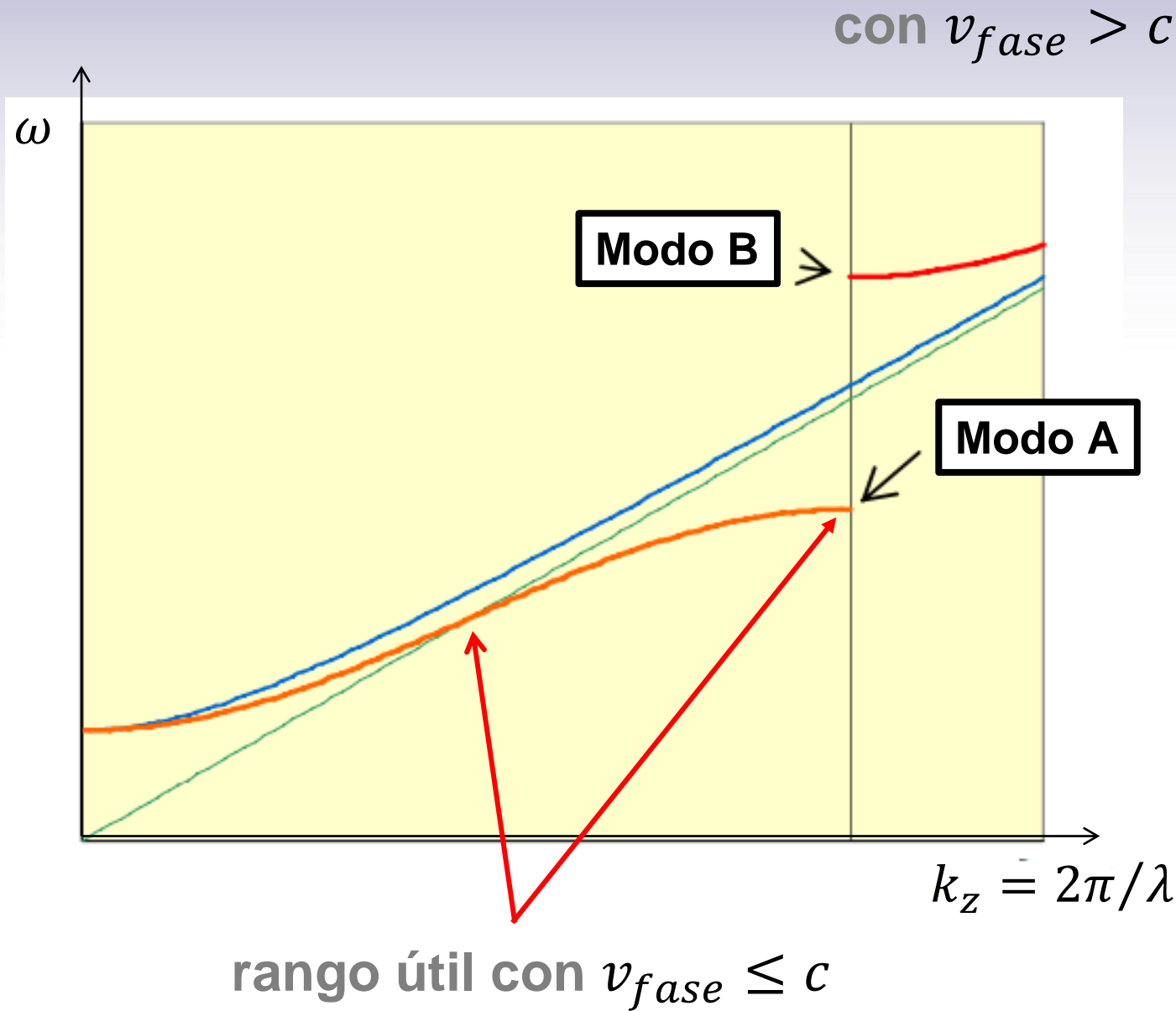
Propuesta: Añadir Discos a la Guía de Onda Cilíndrica

- Como la propagación de ondas ocurre por reflexiones múltiples, si colocamos discos o “iris” de manera regular, cambiamos esa propagación.
- Tenemos entonces lo que se conoce como “**disk-loaded structure**” (DLS) o guía de onda corrugada.
- Para $\lambda_p = 0$ ó $\lambda_p = \infty$ (**corte**), la onda no “ve” los discos
- Cuando $L = \lambda_p/2$ tenemos $k_z = \pi/L$, la estructura de discos lleva a una relación de dispersión con dos ramas y hay dos soluciones

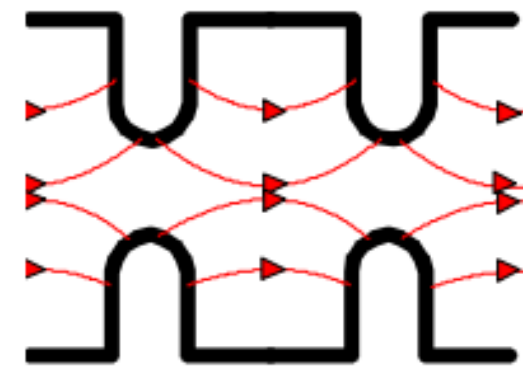




Soluciones: Aparecen los Modos A y B



Patrón del Campo Eléctrico – Modo B

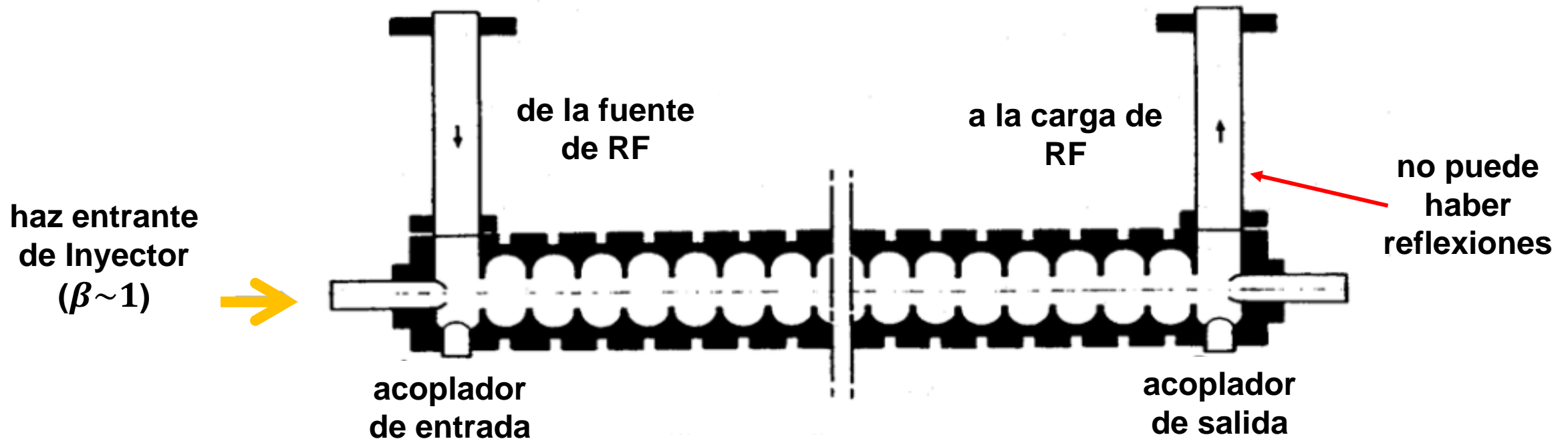


Patrón del Campo Eléctrico – Modo A



Acelerador Lineal de Ondas Viajeras para Electrones

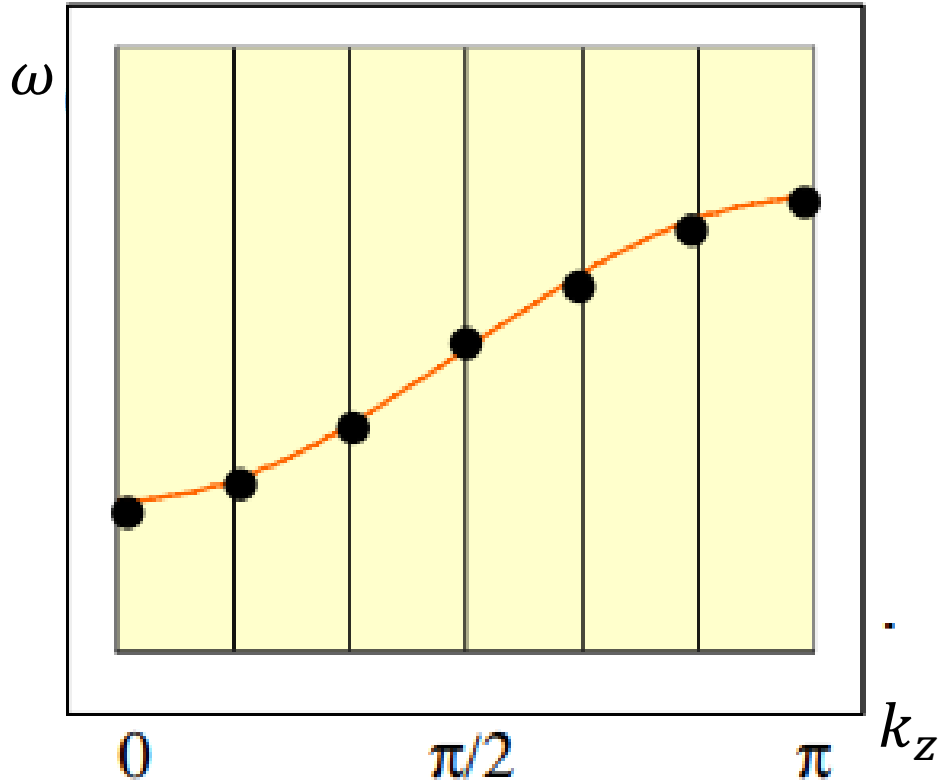
- Se utiliza para acelerar electrones con β muy cercano a 1, que provienen de un inyector.
- La estructura está diseñada de manera que $v_{fase} = c$, a una frecuencia dada.
- La energía RF se reparte en: (1) Haz. (2) Paredes (Cobre). (3) Salida a la carga ($\sim 30\%$).



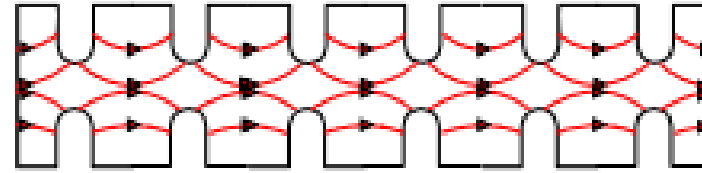


Ondas Estacionarias: Guía de Onda Cerrada

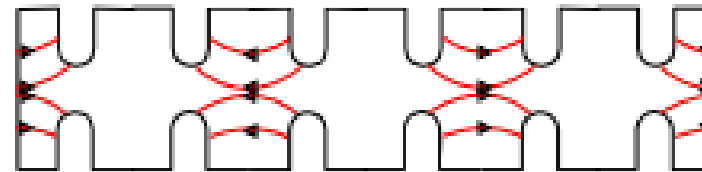
7 DLS



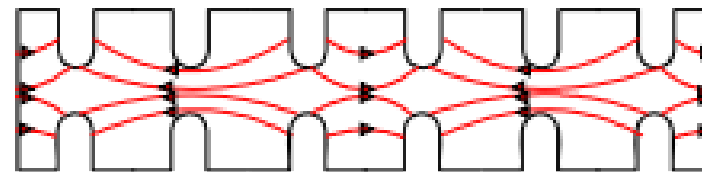
$$L = n \frac{\lambda_p}{2}$$
$$n = 0, 1, \dots$$



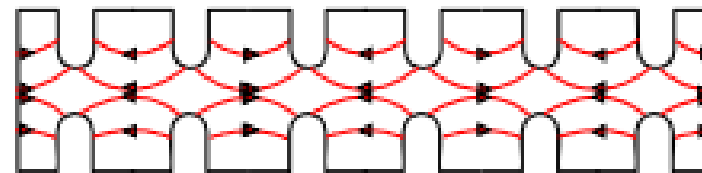
modo 0



modo π/2



modo 2π/3



modo π

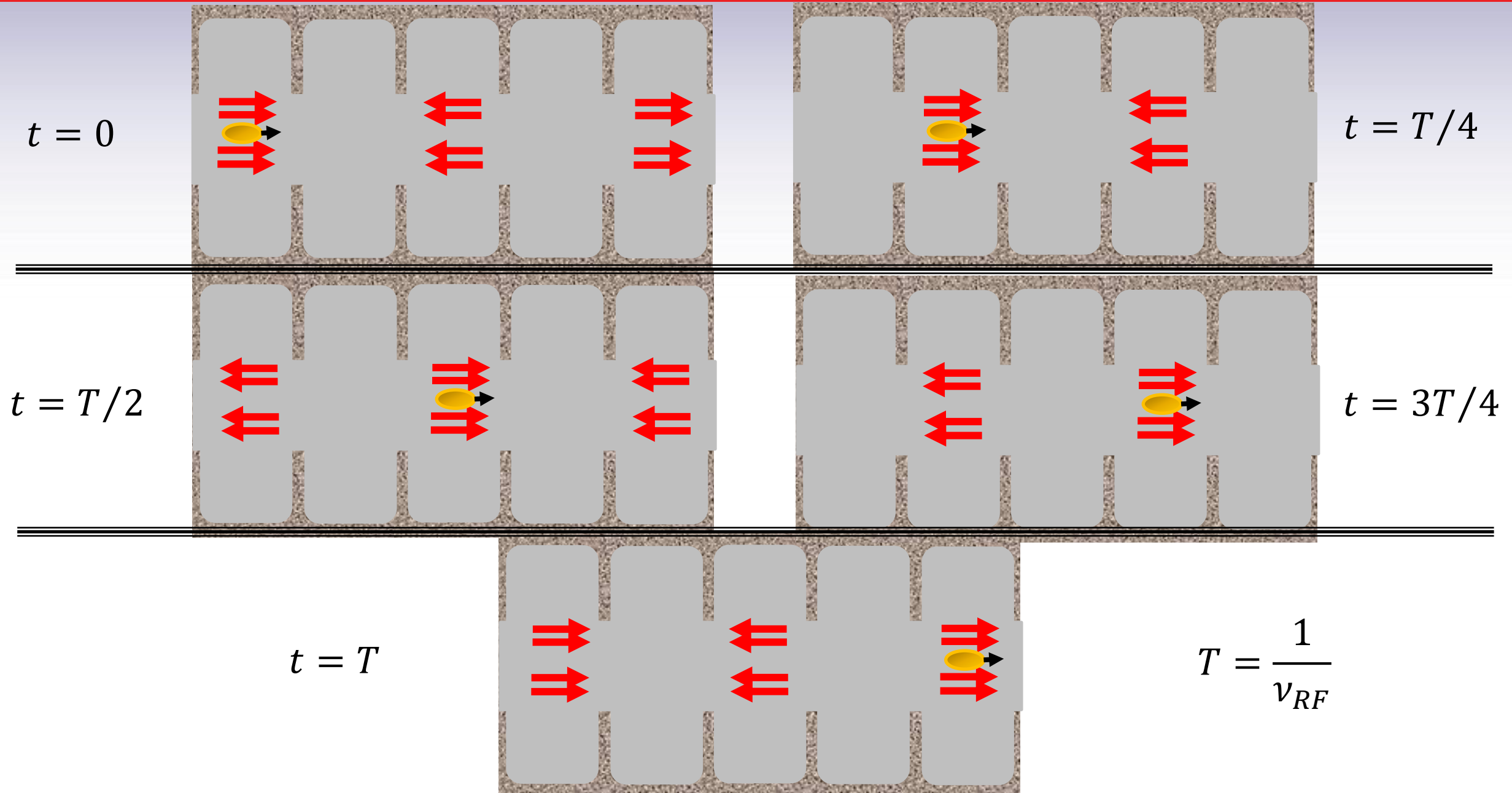
**preferido
para el
diseño**

**preferido
para el
diseño**

- Para partículas que ingresan con $\beta < 1$
- **Onda de fase constante**
- **Cambio espacial para lograr sincronismo**



Aceleración Resonante con Radiofrecuencias (modo $\pi/2$)



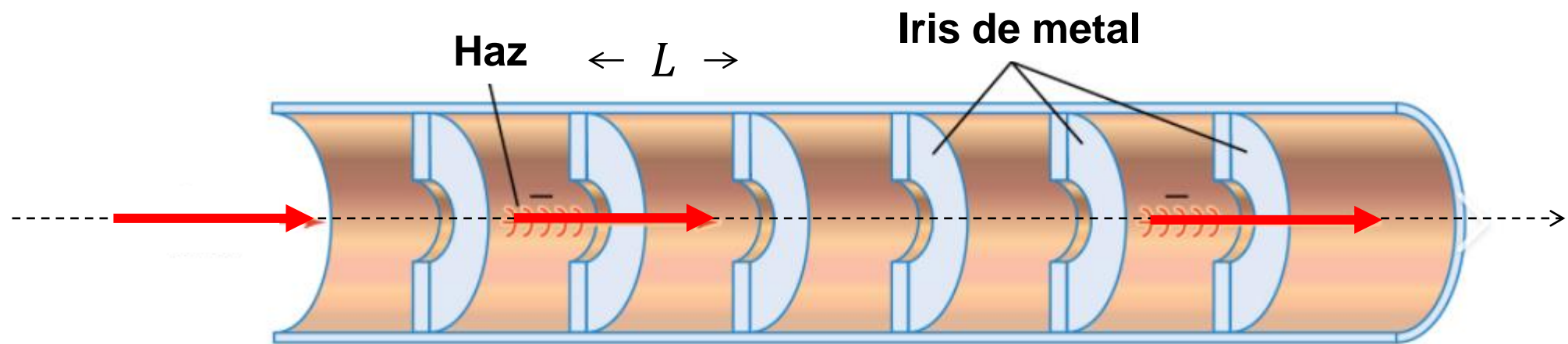


Ajuste de la Velocidad de Fase

- De acuerdo al teorema de Bloch-Floquet la adición de cada iris modifica las propiedades de dispersión, permitiendo la propagación de las ondas con la misma distribución espacial, pero diferente avance de fase por período $\theta \in [0, \pi]$.

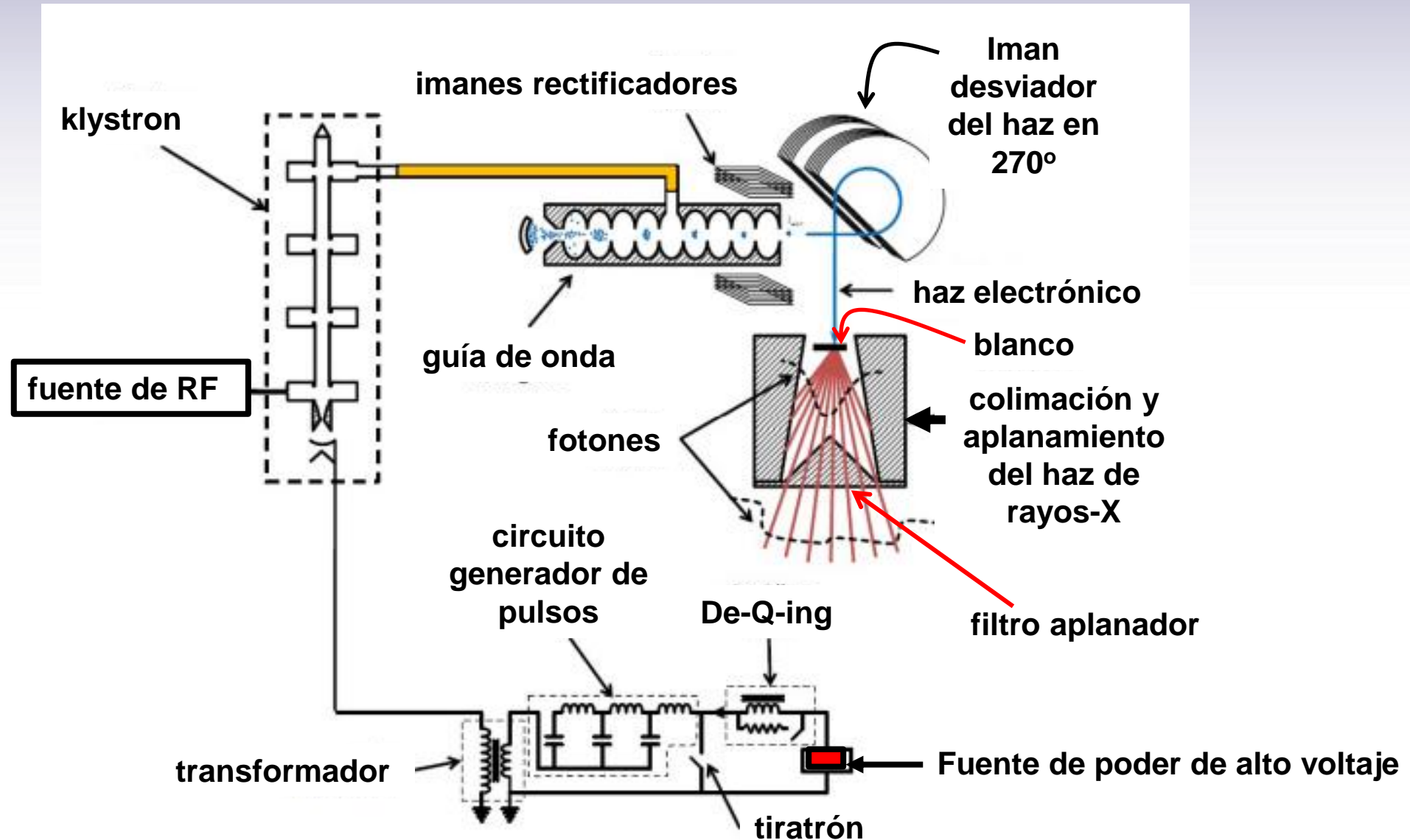
Ideal para iones

- Entonces se debe cumplir
$$L = \frac{\beta_{fase} \lambda \theta}{2\pi} \quad \beta_{fase} \equiv \frac{v_{fase}}{c} \quad \lambda = \frac{c}{\nu_{RF}}$$



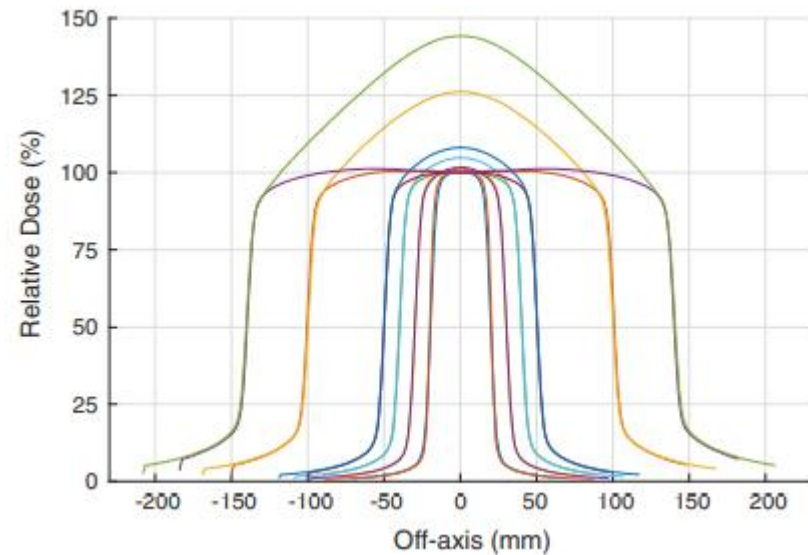
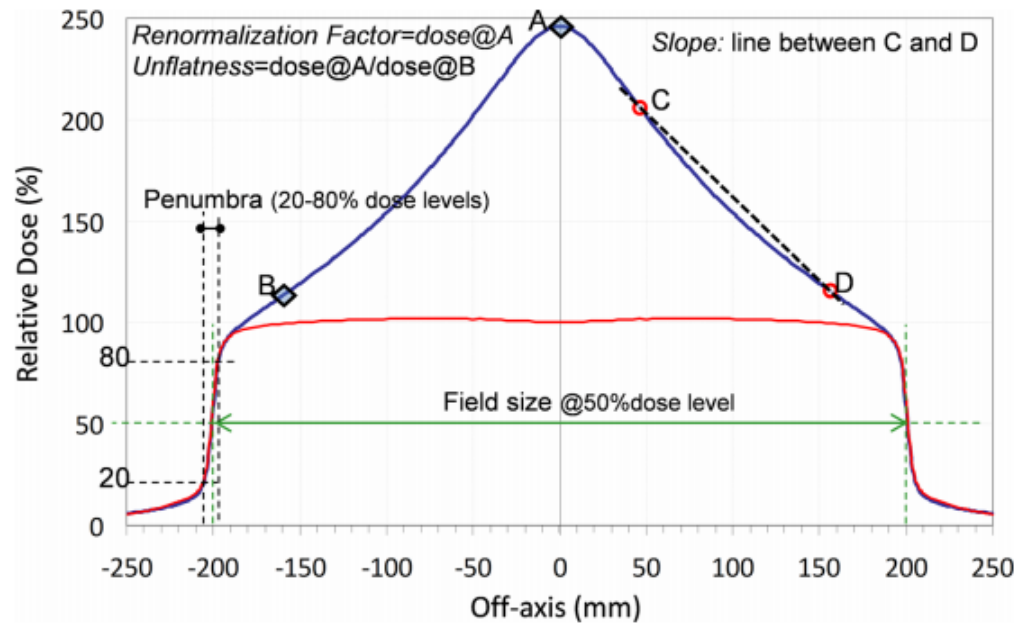


El Acelerador Lineal de Electrones de Uso Clínico





Filtro Aplanador: Ayer y Hoy

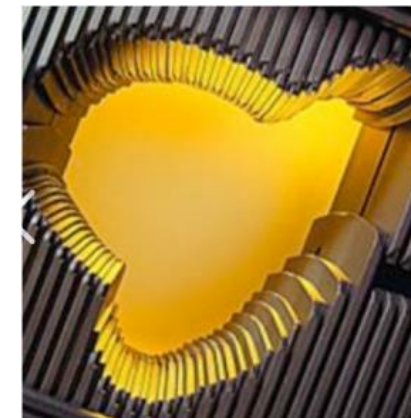
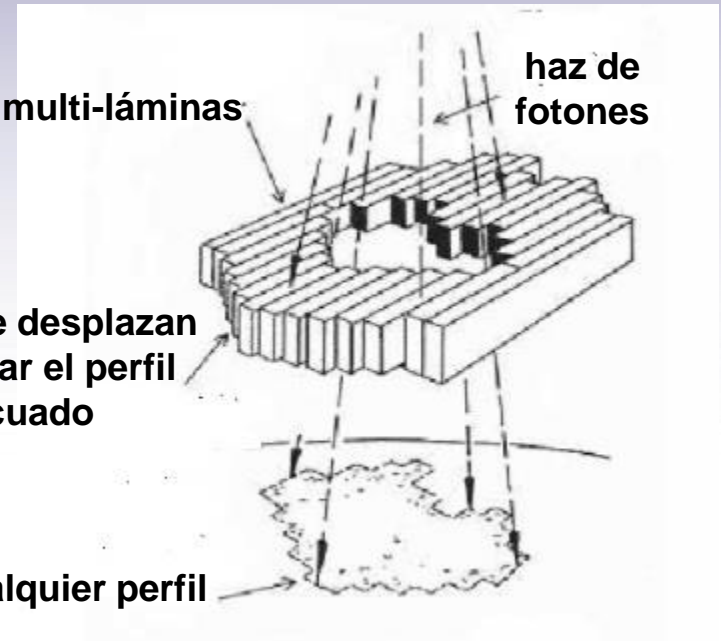


colimador multi-láminas

haz de fotones

láminas se desplazan para lograr el perfil adecuado

crean cualquier perfil

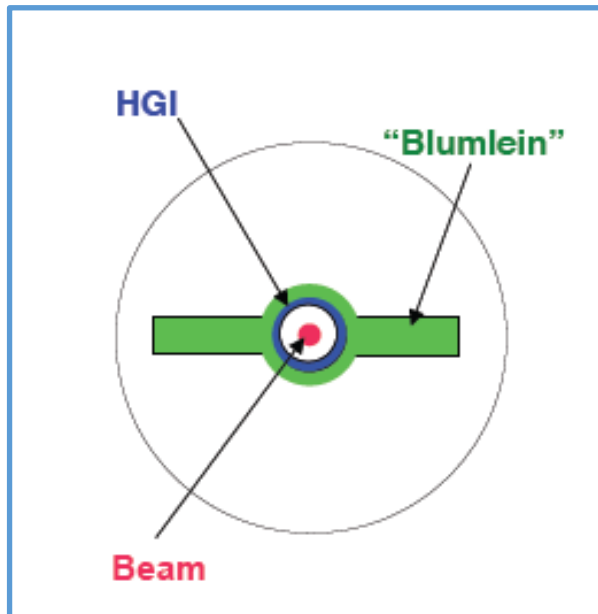


Fogliata, A. et al.(2020) Technical Note: Flattening filter free beam from Halcyon linac: Evaluation of the profile parameters for quality assurance, Med. Phys. **47**(8)3669-3674.

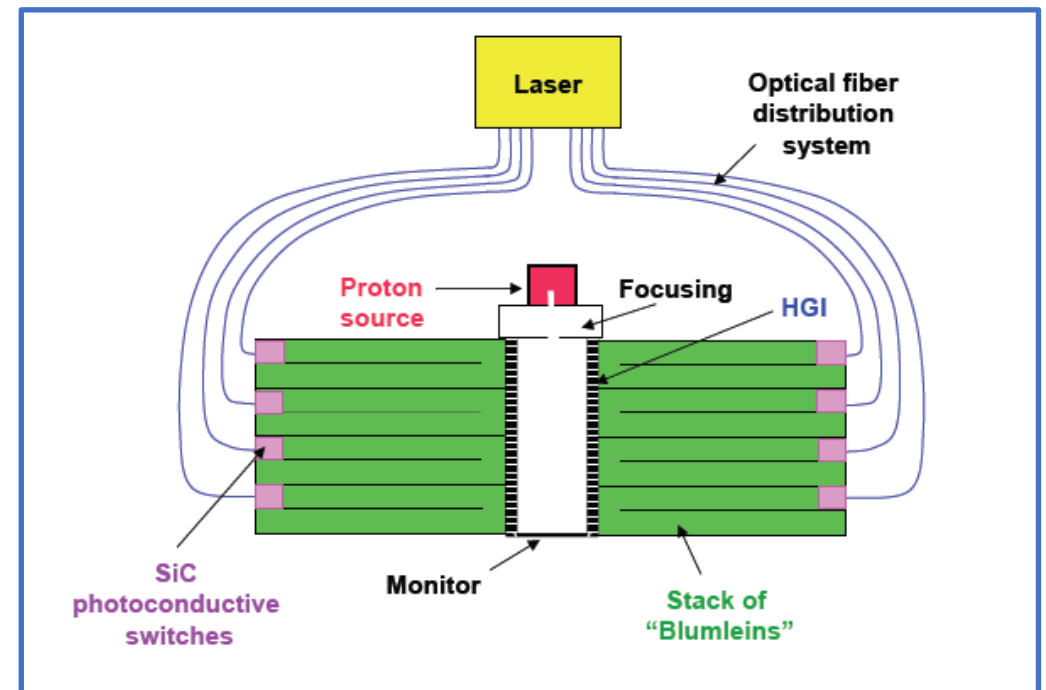


Alternativas de Bajo Costo: Acelerador de Pared Dieléctrica

- Fuente de protones (pueden ser otras partículas) y enfoque electrostático.
- Campo eléctrico acelerador: HGI, High Gradient Inductor.
- Pila de estructuras dieléctricas con interruptor óptico ultrarápido: Se genera una onda viajera a conveniencia según la aceleración a lograr.
- Gradiente acelerador 100 MV/m (para 2012).



- Aun en desarrollo, primero por el **Prof. Mackie** a la cabeza en Tomotherapy y luego continua en Accuray)





<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.



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



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea



