

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



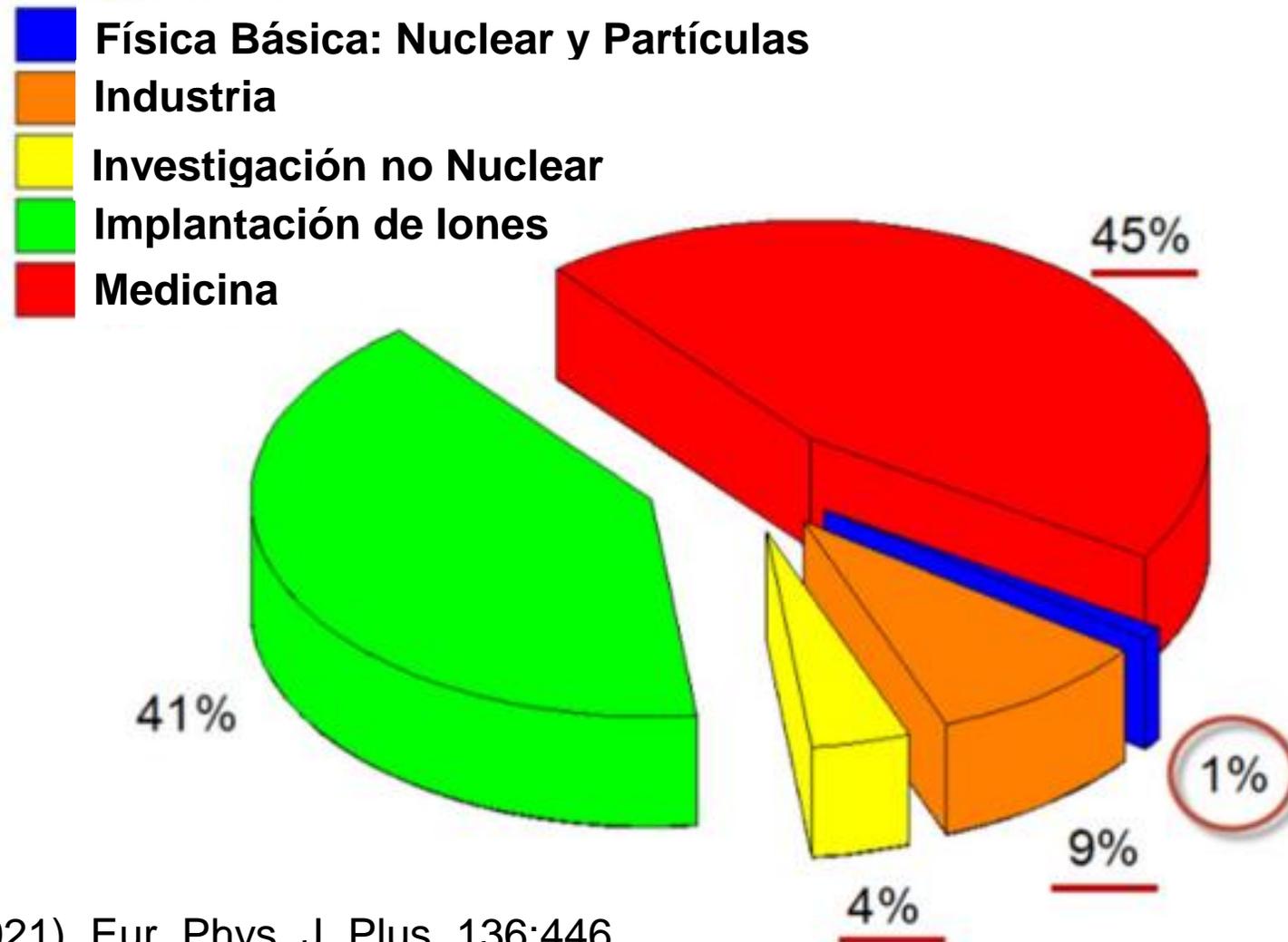
Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

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.



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).



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).

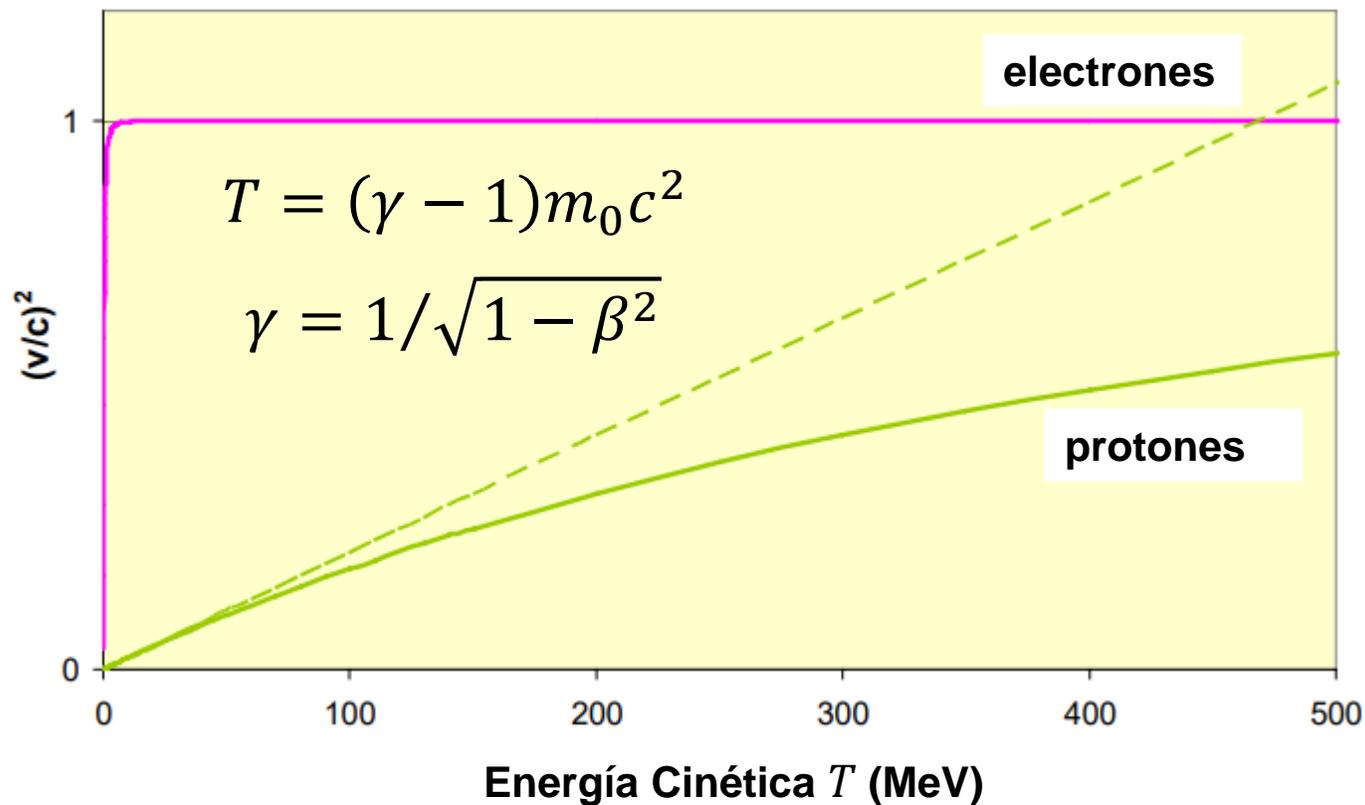
La coordinación de los esfuerzos en investigación básica a nivel global están a cargo de la International Biophysics Collaboration (IBC), así como la investigación combinada, básica, clínica y traslacional está liderada principalmente por la International Atomic Energy Agency (IAEA) u Organismo Internacional 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



$$\beta^2 = 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{T}{m_0c^2}\right)^2}$$

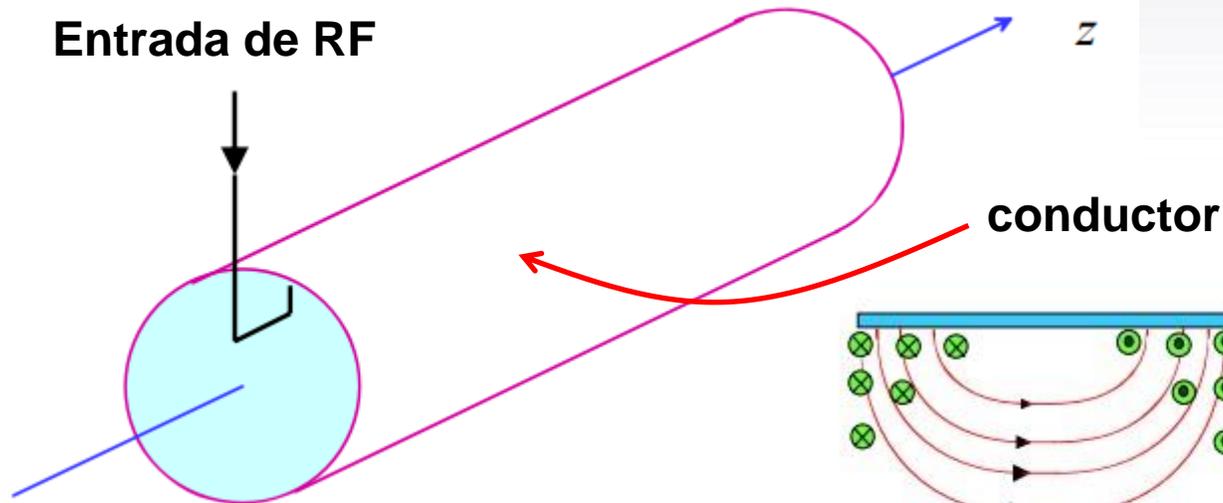
- Vemos que los **electrones** alcanzan más rápidamente con T su aproximación a c .
- Los **protones** lo hacen más lentamente: Hay que adaptar el acelerador lineal para lograr una transferencia de energía eficiente.



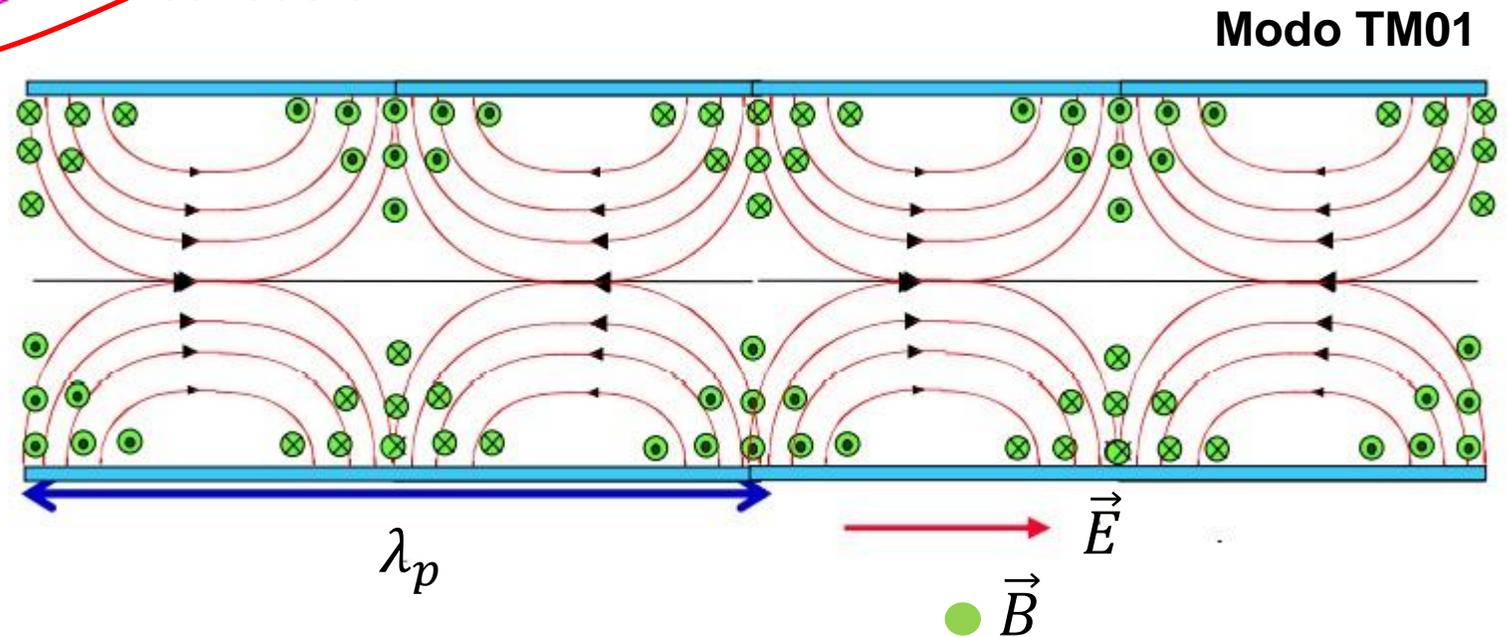
Aproximación al Problema: Guía de Ondas con RF

- El acercamiento al problema que resultaría más interesante y sencillo 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.

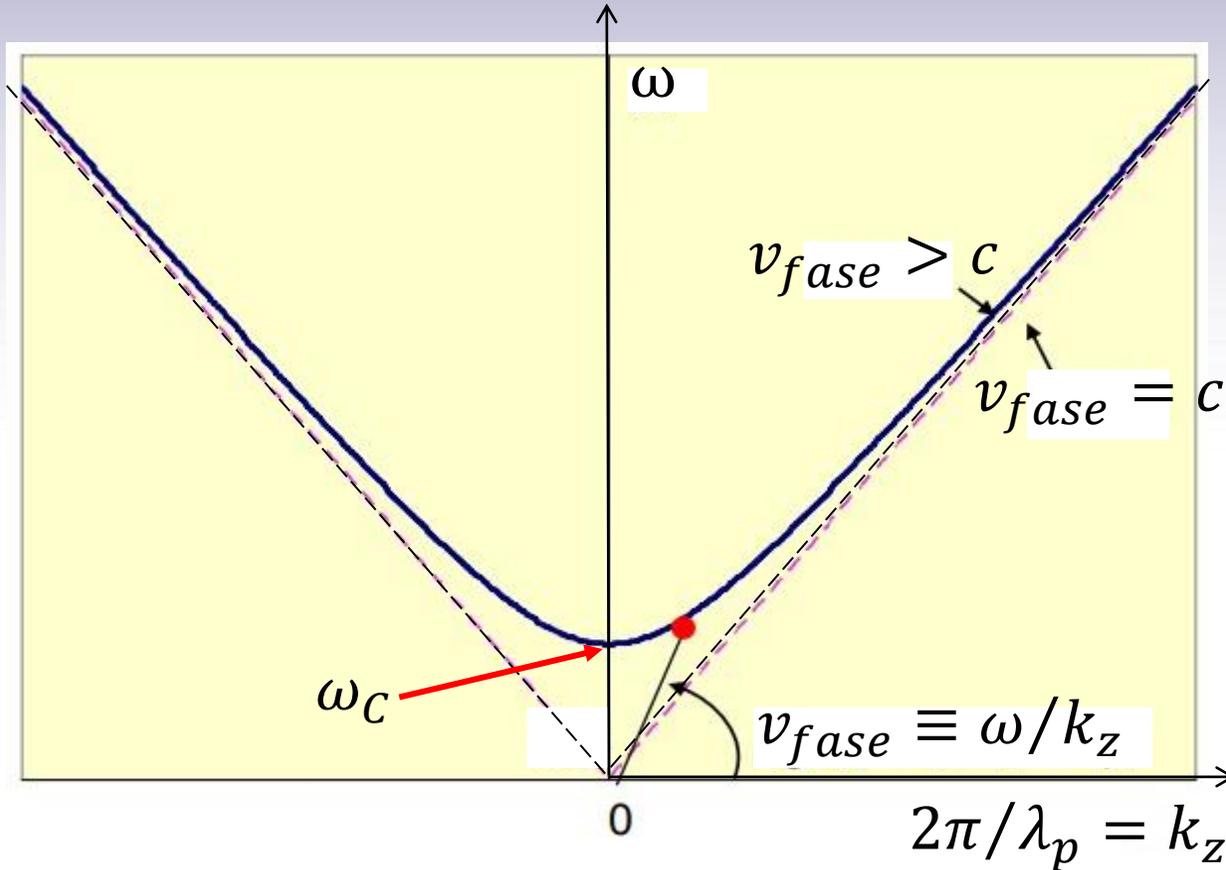


Modos TM (transversales magnéticos) tienen E_z paralela al eje de la guía.





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:**

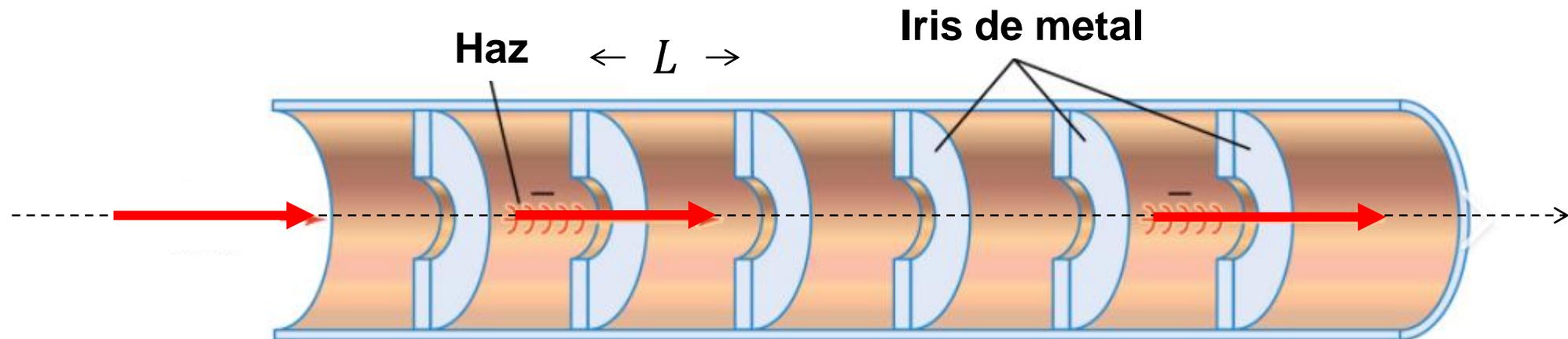
$$v_{grupo} \equiv \frac{d\omega}{dk}$$

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



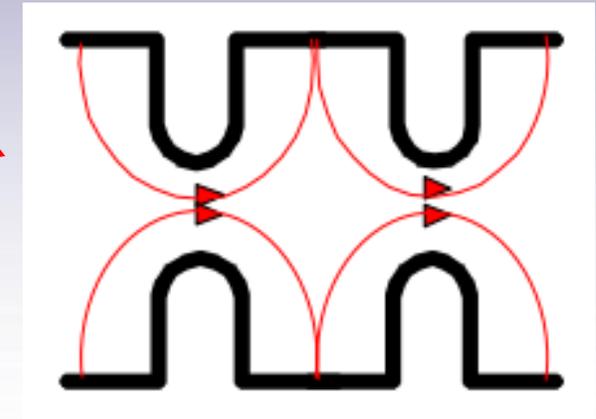
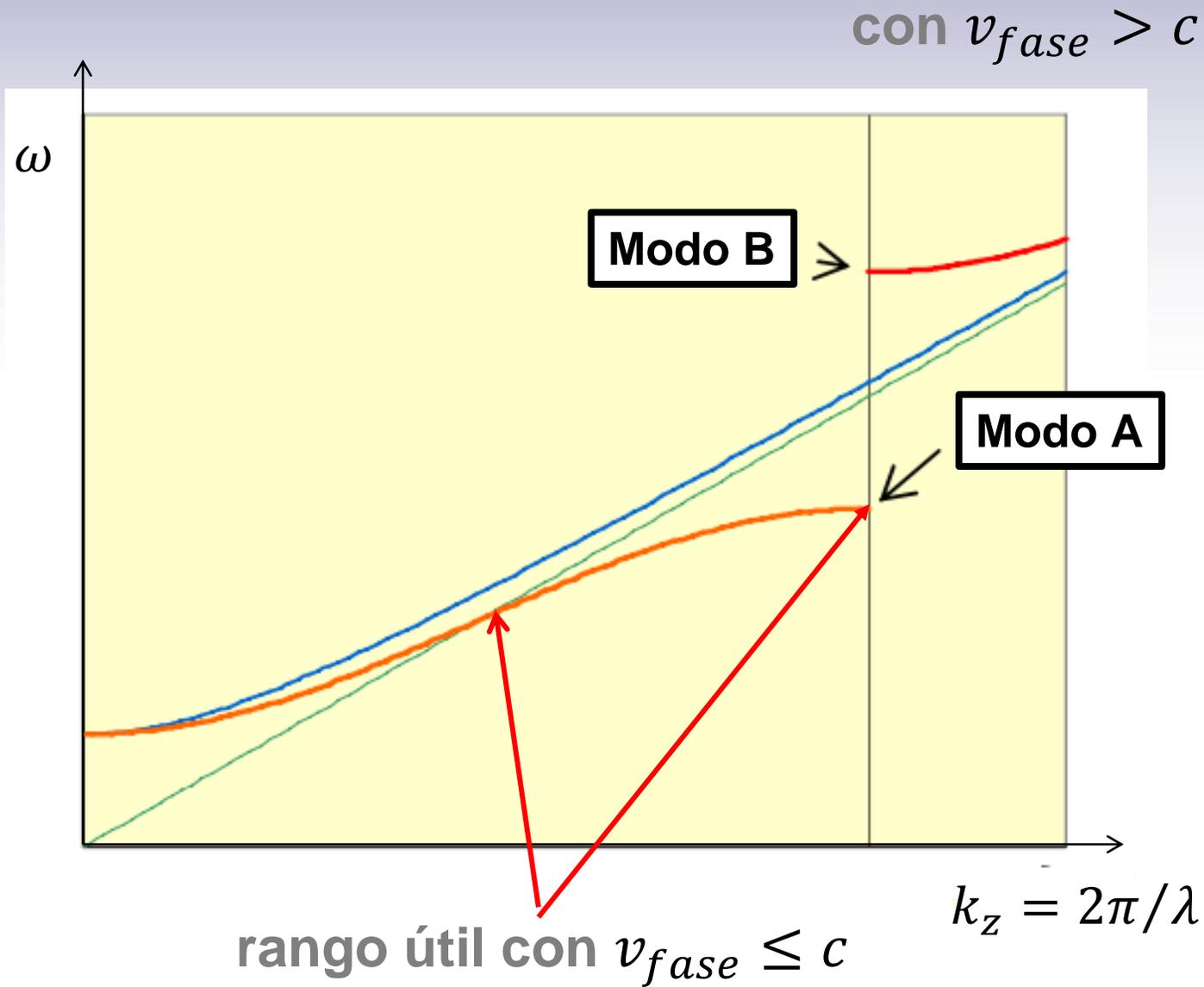
Propuesta: Añadir Discos a la Guía de Onda Cilíndrica

- 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

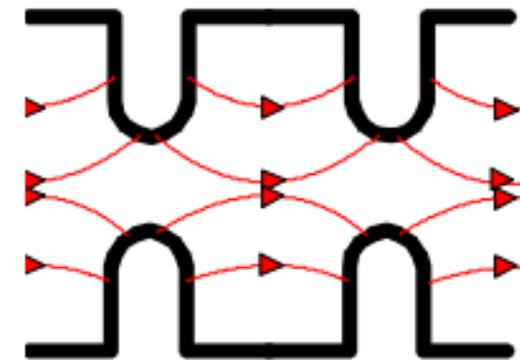




Soluciones: Aparecen los Modos A y B



Patrón del Campo Eléctrico – Modo B

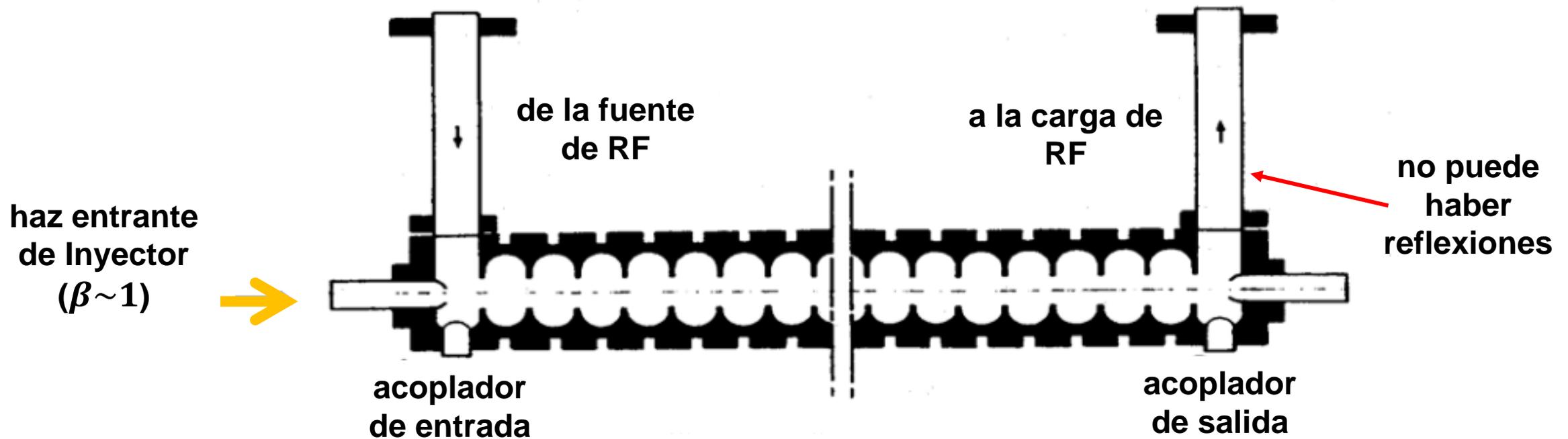


Patrón del Campo Eléctrico – Modo A



Acelerador Lineal de Ondas Viajeras para Electrones

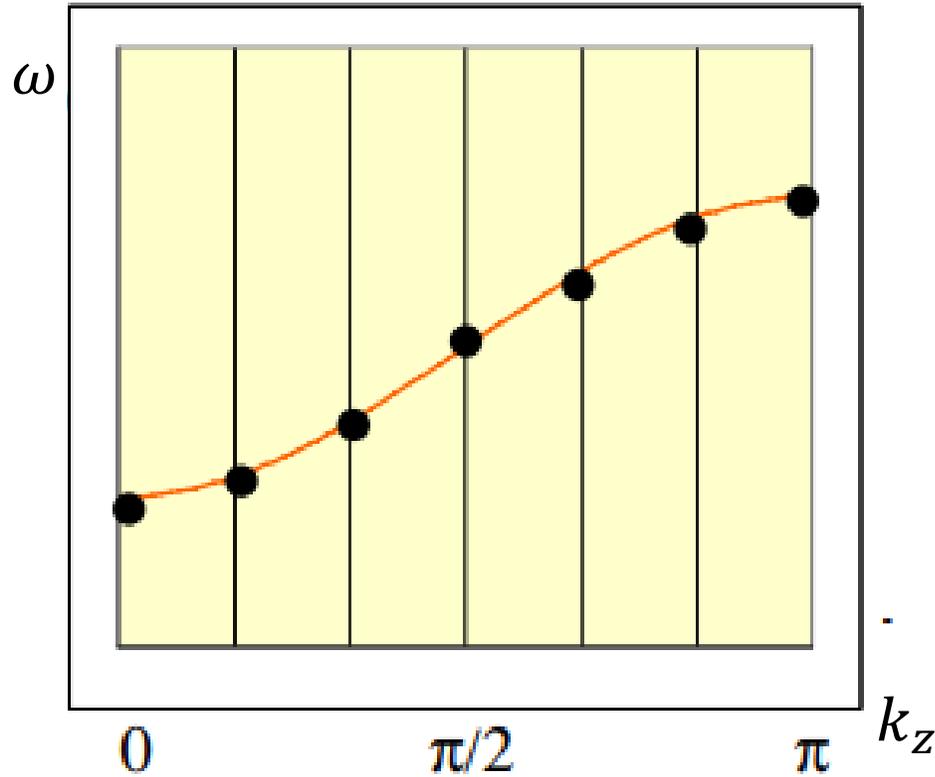
- Se utiliza para acelerar electrones con β muy cercano a 1, que provienen de un inyector.
- La estructura está diseñada de manera que $v_{fase} = c$, a una frecuencia dada.
- La energía RF se reparte en: (1) Haz. (2) Paredes (Cobre). (3) Salida a la carga ($\sim 30\%$).





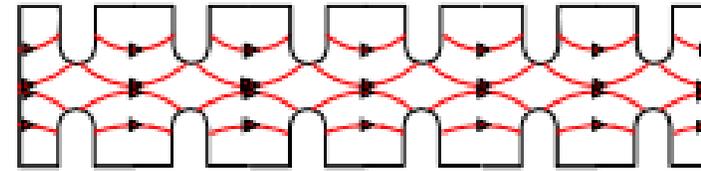
Ondas Estacionarias: Guía de Onda Cerrada

7 DLS

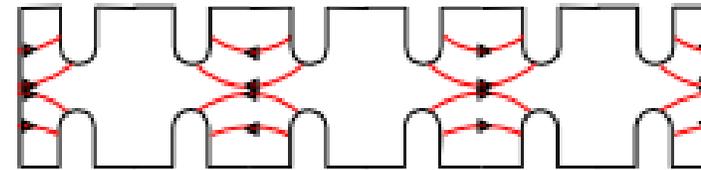


$$L = n \frac{\lambda_p}{2}$$
$$n = 0, 1, \dots$$

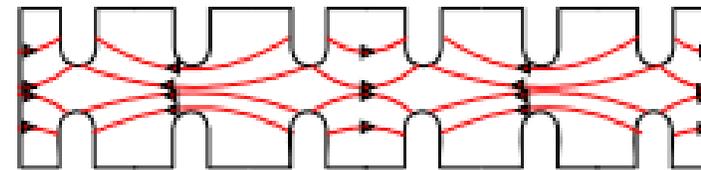
- Para partículas que ingresan con $\beta < 1$
- Onda de fase constante
- Cambio espacial para lograr sincronismo



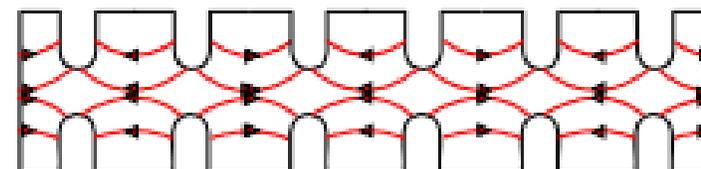
modo 0



modo $\pi/2$



modo $2\pi/3$



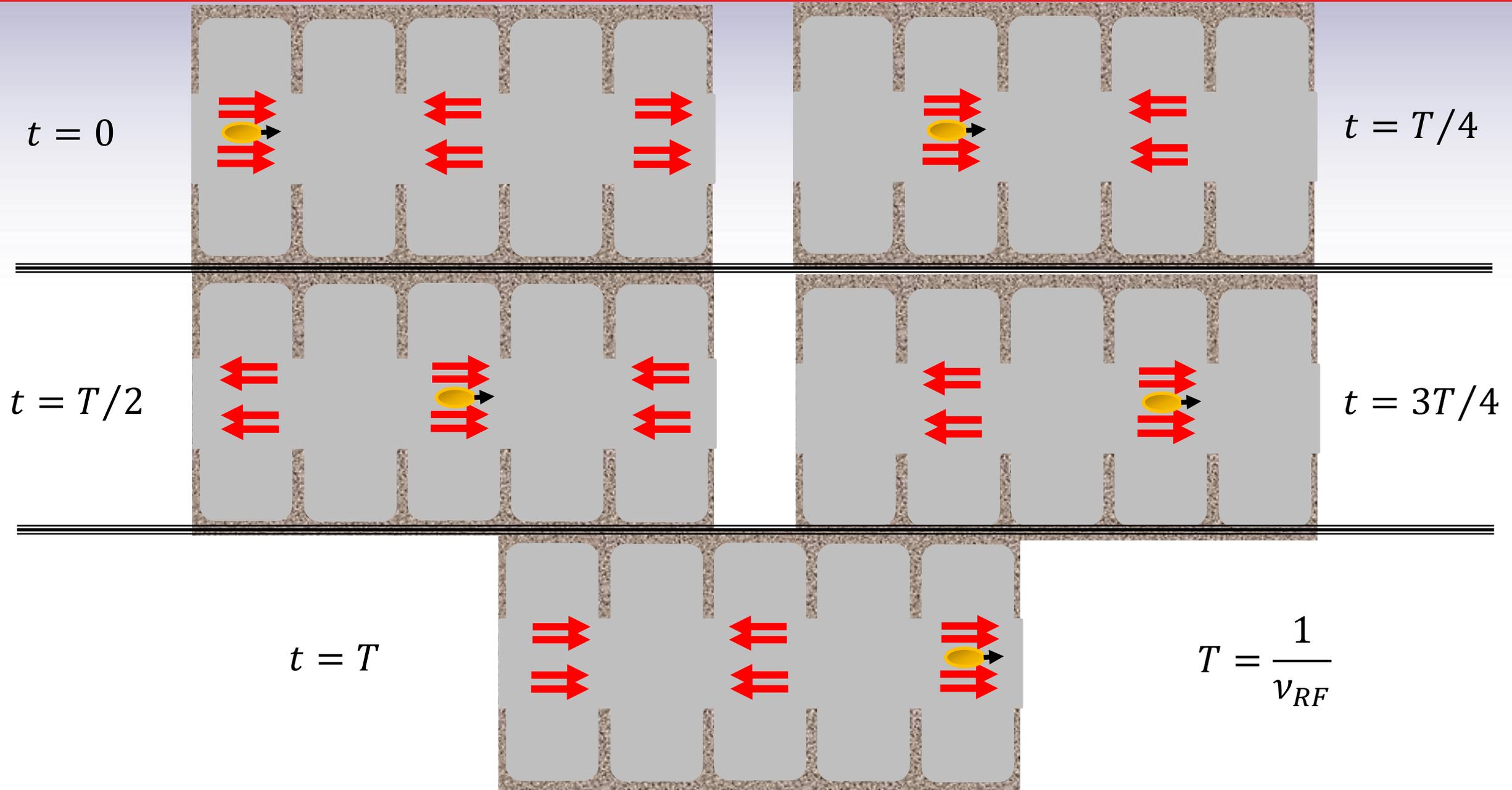
modo π

preferido
para el
diseño

preferido
para el
diseño



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





Ajuste de la Velocidad de Fase

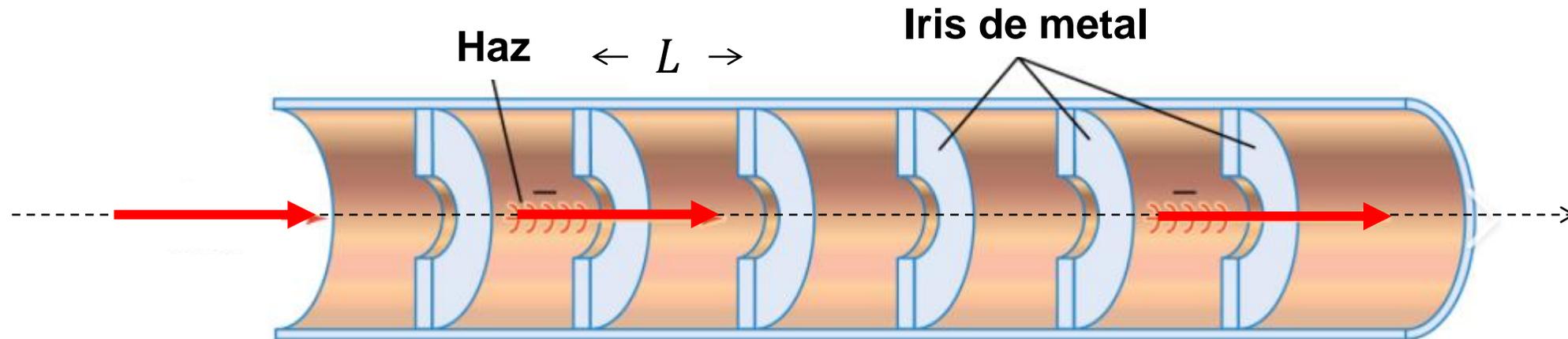
- De acuerdo al teorema de Bloch-Floquet la adición de cada iris modifica las propiedades de dispersión, permitiendo la propagación de las ondas con la misma distribución espacial, pero diferente avance de fase por período $\theta \in [0, \pi]$.

Ideal para iones

$$k_{RF}L = \theta$$

- Entonces se debe cumplir

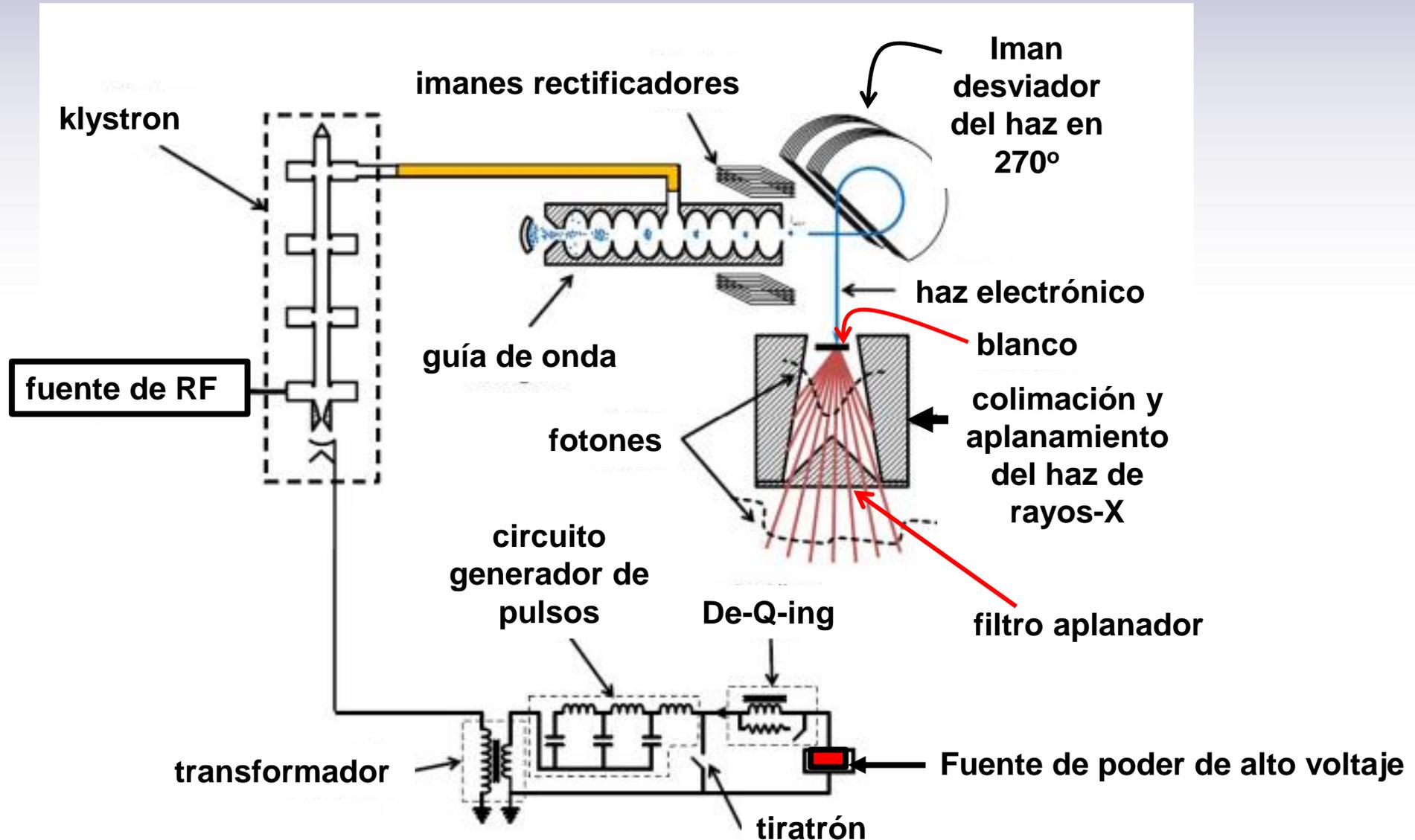
$$L = \frac{\beta_{fase} \lambda \theta}{2\pi} \quad \beta_{fase} \equiv \frac{v_{fase}}{c} \quad \lambda = \frac{c}{\nu_{RF}}$$



Floquet, G., Sur les équations différentielles linéaires à coefficients périodiques. Annales de l'École Normale Supérieure 12, 47–88 (1883)

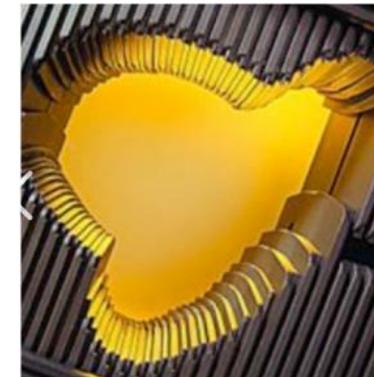
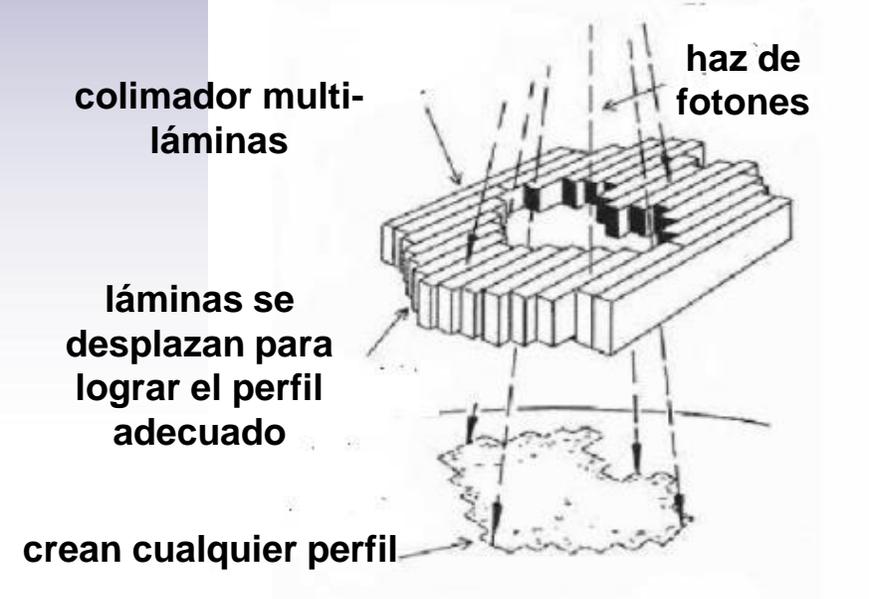
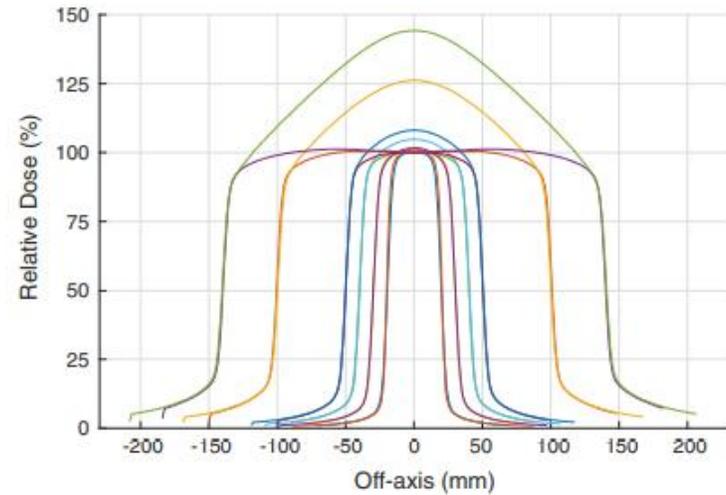
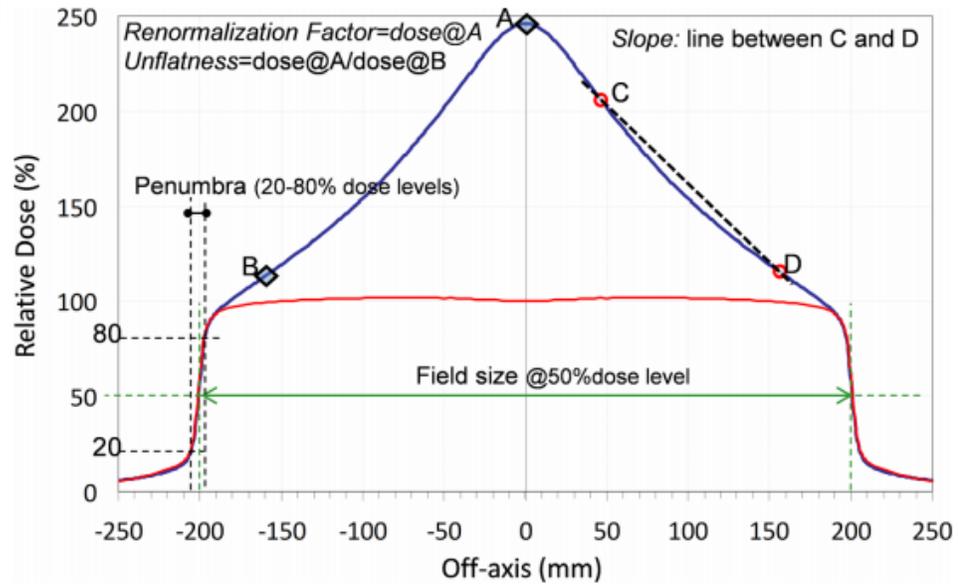


El Acelerador Lineal de Electrones de Uso Clínico





Filtro Aplanador: Ayer y Hoy

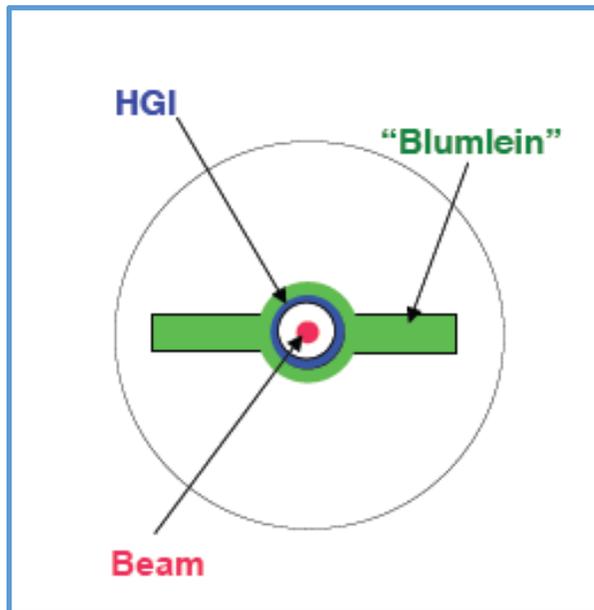


Fogliata, A. et al.(2020) Technical Note: Flattening filter free beam from Halcyon linac: Evaluation of the profile parameters for quality assurance, Med. Phys. **47**(8)3669-3674.

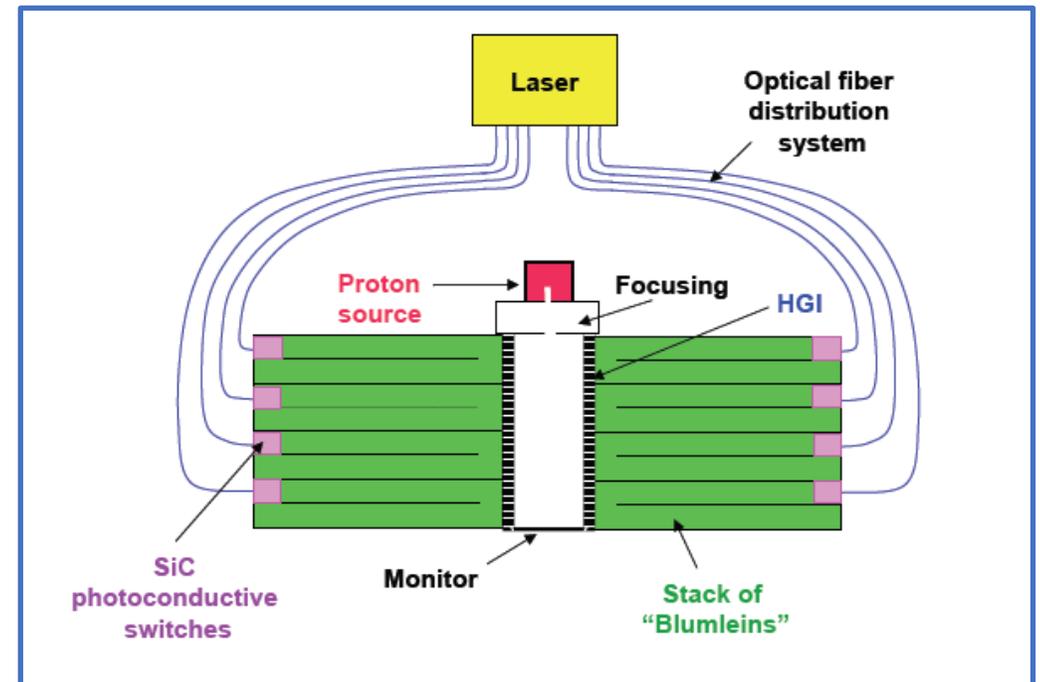


Alternativas de Bajo Costo: Acelerador de Pared Dieléctrica

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

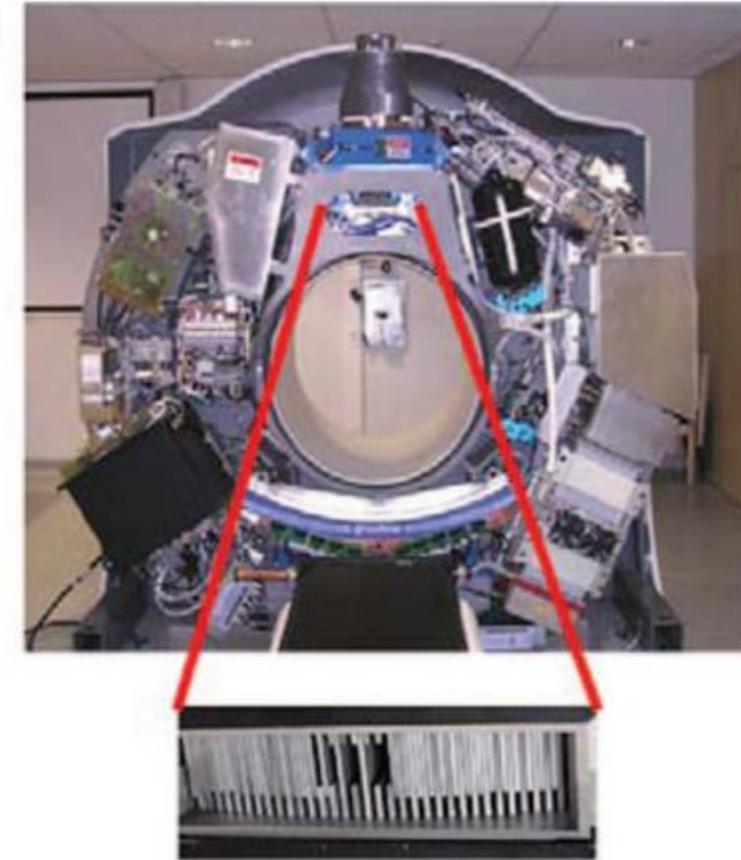
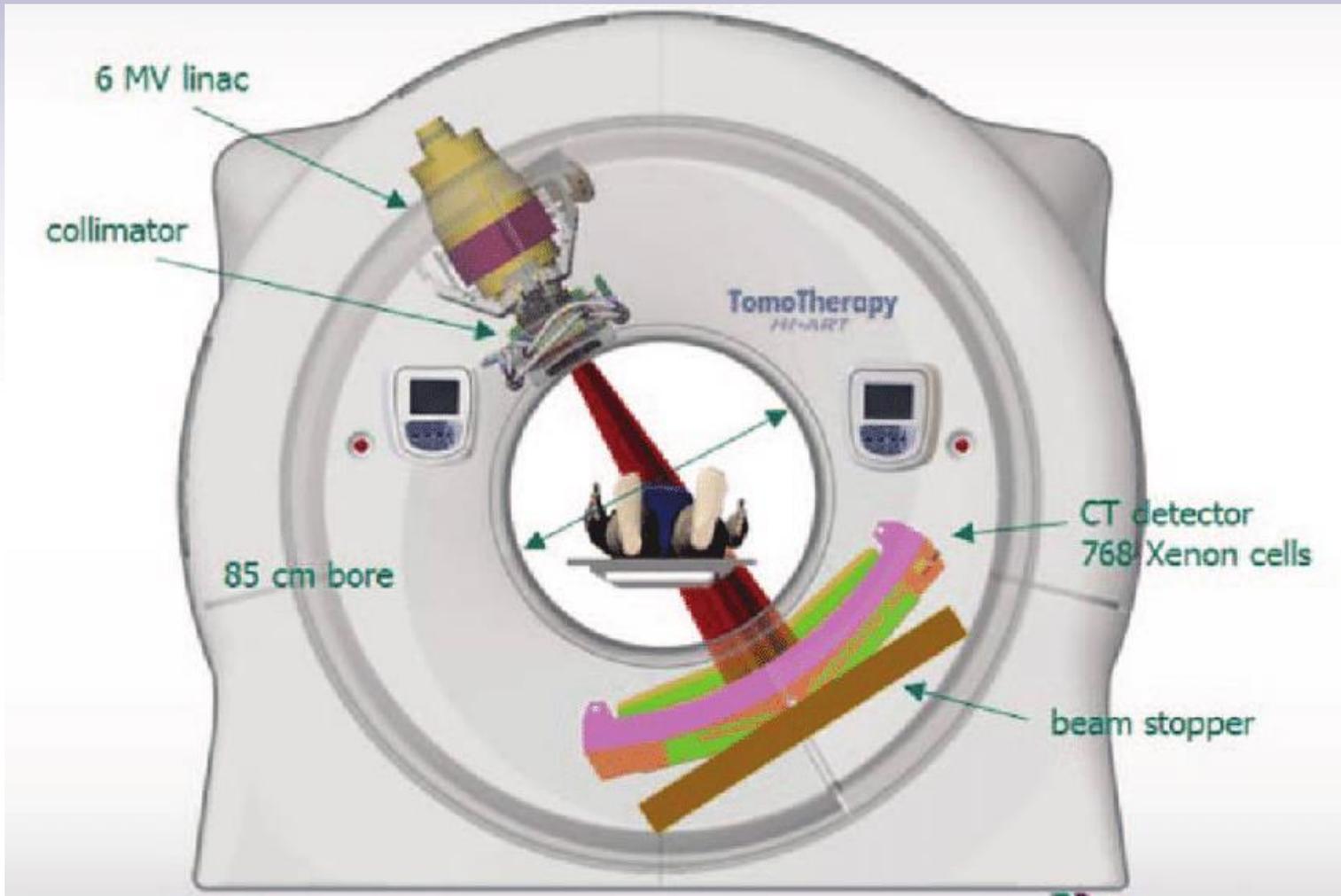


• Debe continuar en Desarrollo, el cual ocurrió primero a cargo del **Prof. Mackie** en Tomotherapy y luego debió continuar en Accuray). Pero no hay más reportes.





Tomoterapia: Miniaturización y Tomoaplicación



colimador multi-láminas

**Estructura básica: Tomógrafo de Rayos-X.
Desarrollado por el Prof. Mackie.**

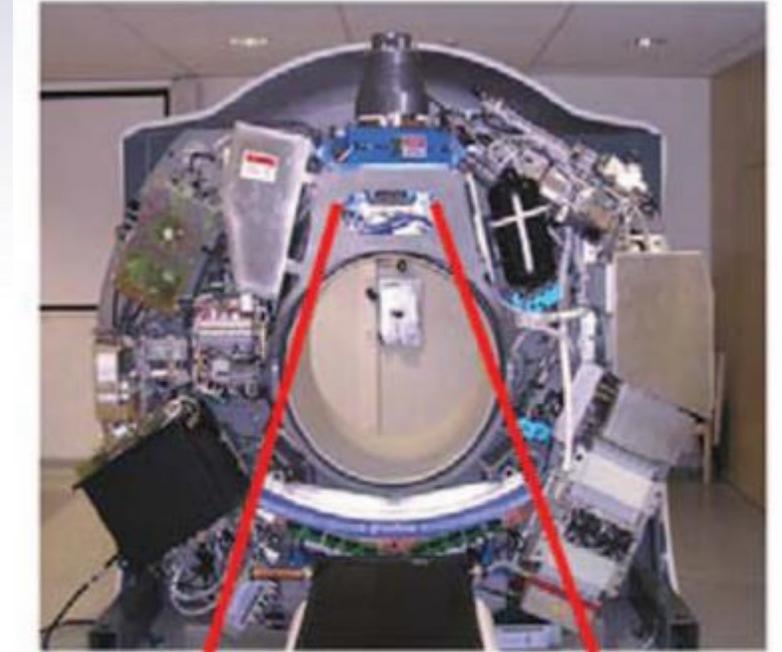
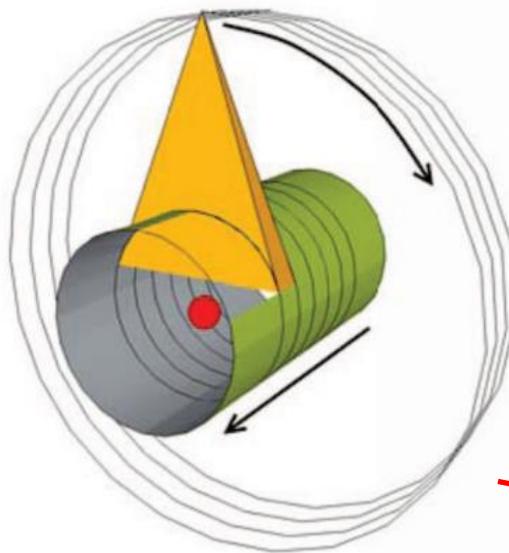
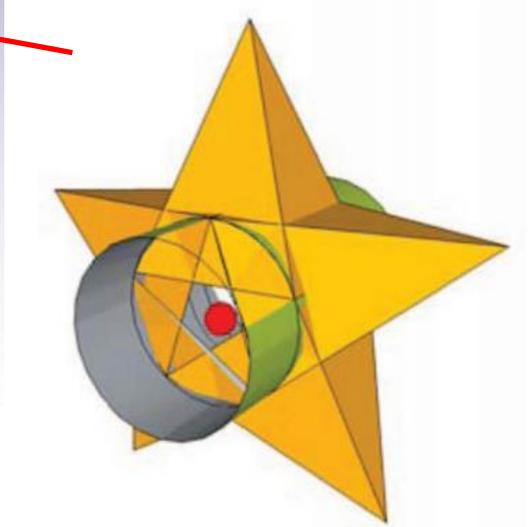
Tomado de D. van Gestel et al. (2013) *The Oncologist* 18:697-706.



LINAC Clínico Típico Versus Tomoterapia



colimador multi-láminas



colimador multi-láminas

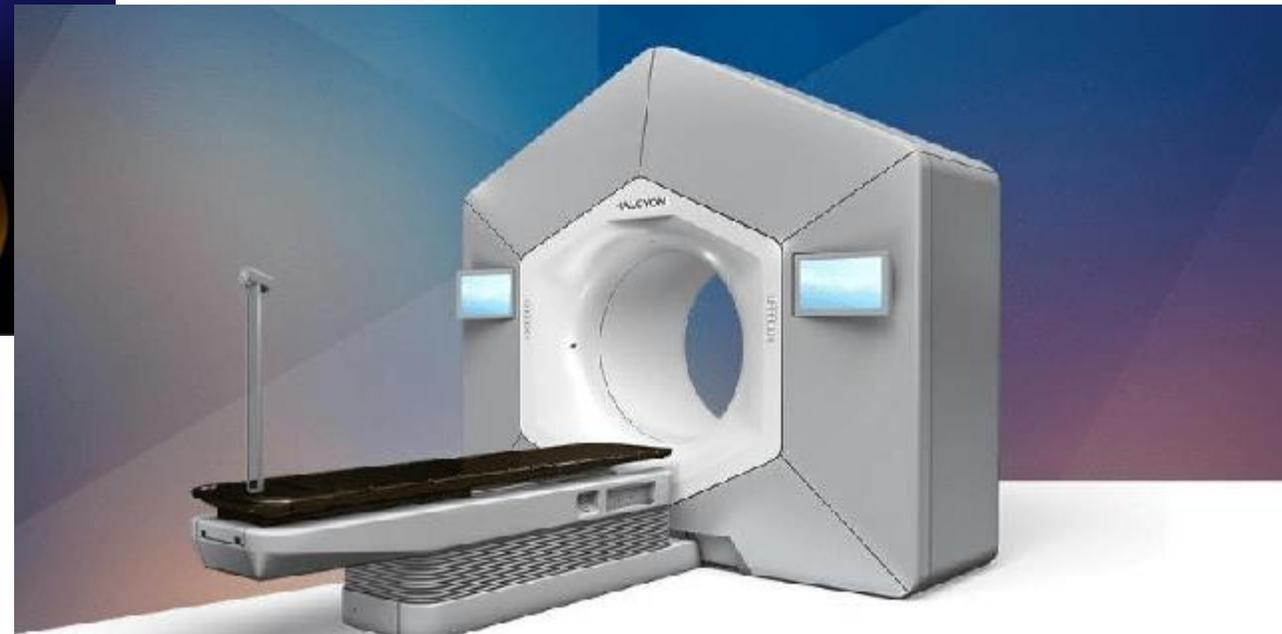


Cyberknife (Accuray) & Halcyon (Varian)



Cyberknife: LINAC de 6 MeV, sin filtro aplanador, montado en un brazo robótico

Halcyon: LINAC de 6 MeV, sin filtro, aplanador, montado en un brazo en forma de C. Cubierta del Gantry: Fibra de Carbono

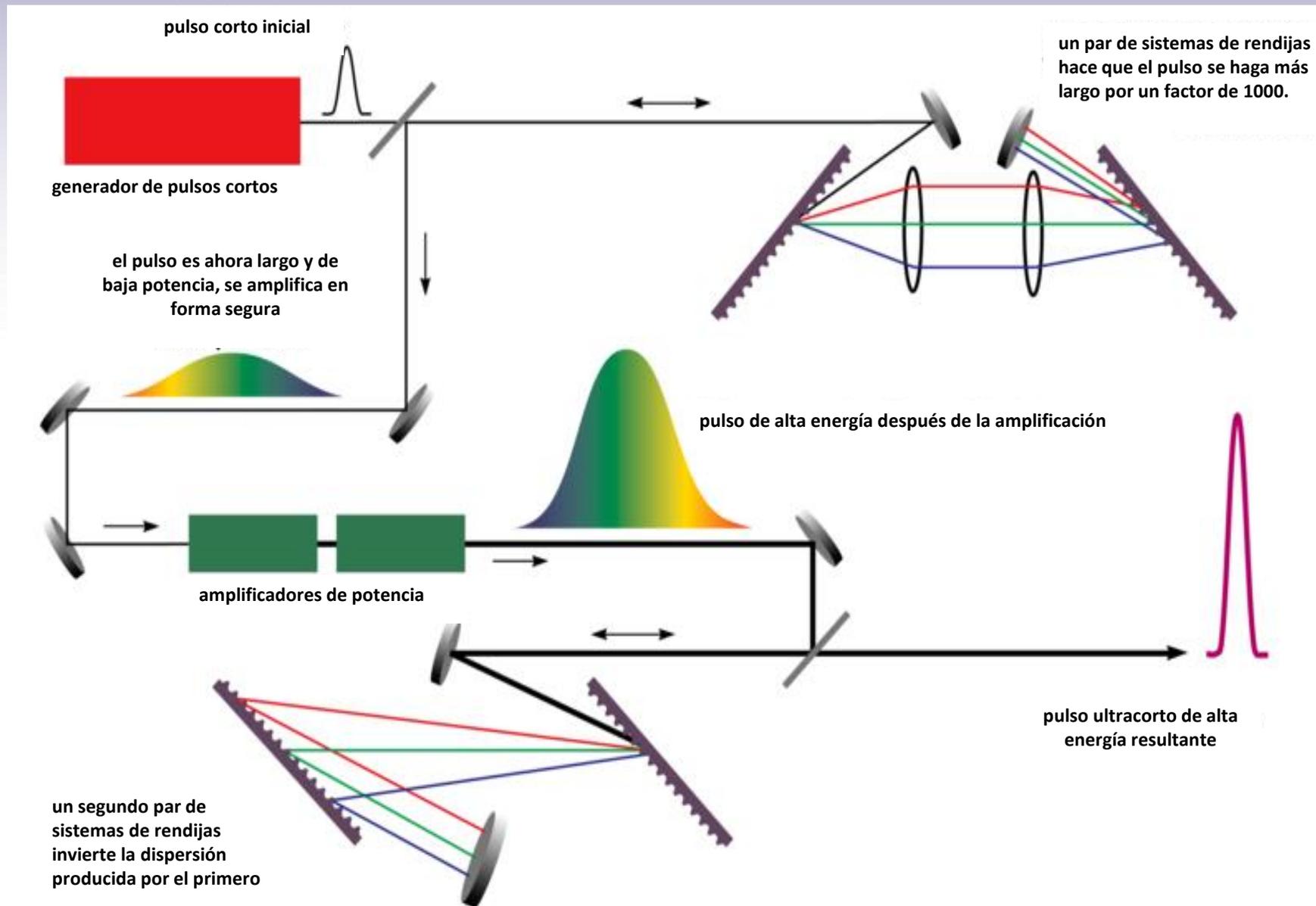




CPA: Pulsos Laser Cortos y de Alta Potencia

CPA: Chirp Pulse Amplification

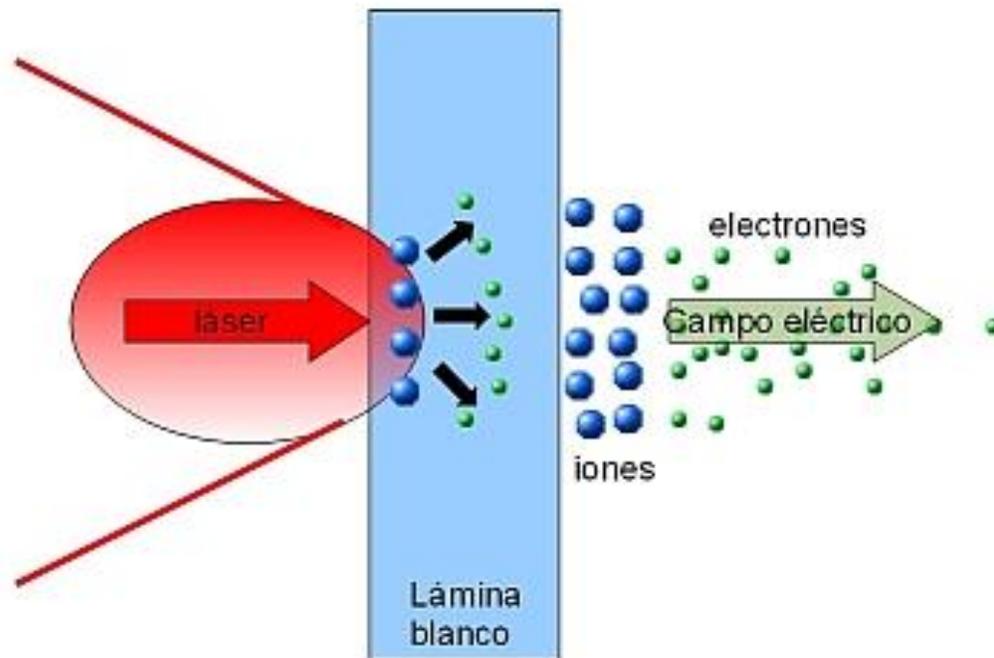
Acercamiento para reducir el tamaño:
Tener estos pulsos primero





Mecanismo de Aceleración de los Iones

- El láser ioniza la superficie frontal del blanco creando una capa de plasma (alcanza altas temperaturas) entre el vacío y el blanco.
- El blanco se carga positivamente por la gran cantidad de electrones que escapan.
- En el blanco hay reacciones nucleares y se generan muchos tipos de fragmentos.



Entre la nube electrónica externa y el blanco se genera un campo eléctrico muy intenso de TV/m que actúa sobre los iones que están afuera.

Se genera un haz cónico de iones. Puede ser conducido o filtrado a conveniencia.



OPEN

High energy proton micro-bunches from a laser plasma accelerator

Ashutosh Sharma & Christos Kamperidis

Recent advances on laser-driven ion accelerators have sparked an increased interest in such energetic particle sources, particularly towards the viability of their usage in a breadth of applications, such as high energy physics and medical applications. Here, we identify a new ion acceleration mechanism and we demonstrate, via particle-in-cell simulations, for the first time the generation of high energy, monochromatic proton micro-bunches while witnessing the acceleration and self-modulation of the accelerated proton beam in a dual-gas target, consisting of mixed ion species. In the proposed ion acceleration mechanism due to the interaction of an ultra-short, ultra-intense (2 PW, 20 fs) laser pulses

Received: 26 February 2019

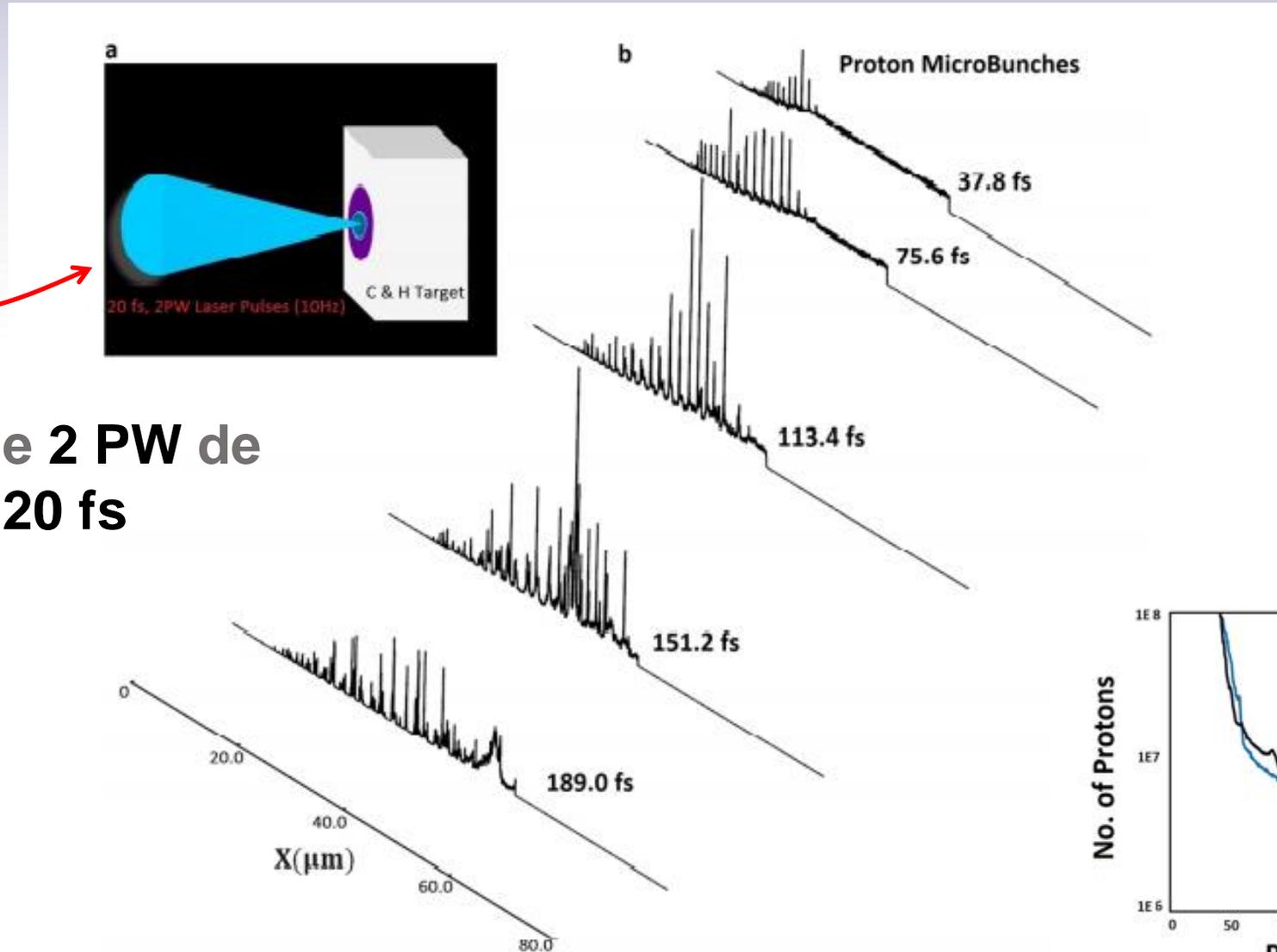
Accepted: 10 September 2019

Published online: 25 September 2019

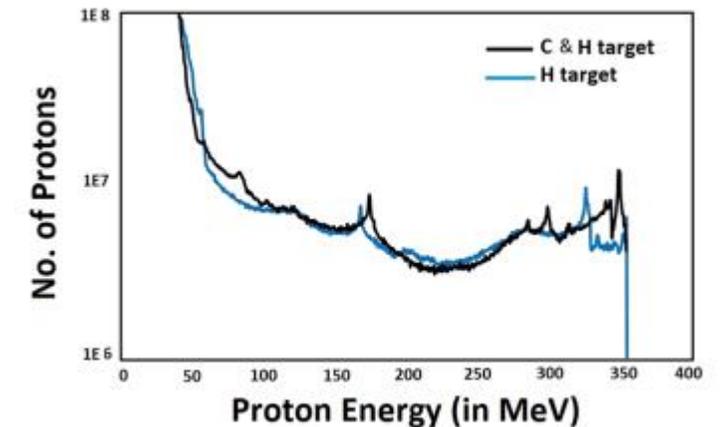


Distribución Espacial e Función del Tiempo de Micropaquetes

Haz cónico de iones



Laser pulsado de 2 PW de potencia y 20 fs





Referencias Recomendadas

1. Greene, D. & P. Williams (2017) *Linear Accelerators for Radiation Therapy*, CRC Press, Boca Ratón, Florida, USA (Edición anterior de 1997, con el mismo contenido básico en www.archive.org para consultar en línea, absolutamente gratis, previo registro).
2. Wiedemann, H. (2007) *Particle Accelerator Physics.*, Springer, New York, USA (disponible en www.archive.org).
3. Newton, D. (1989) *Particle accelerators : from the cyclotron to the superconducting super collider*, F Watts, New York, USA (disponible en 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).



<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.