

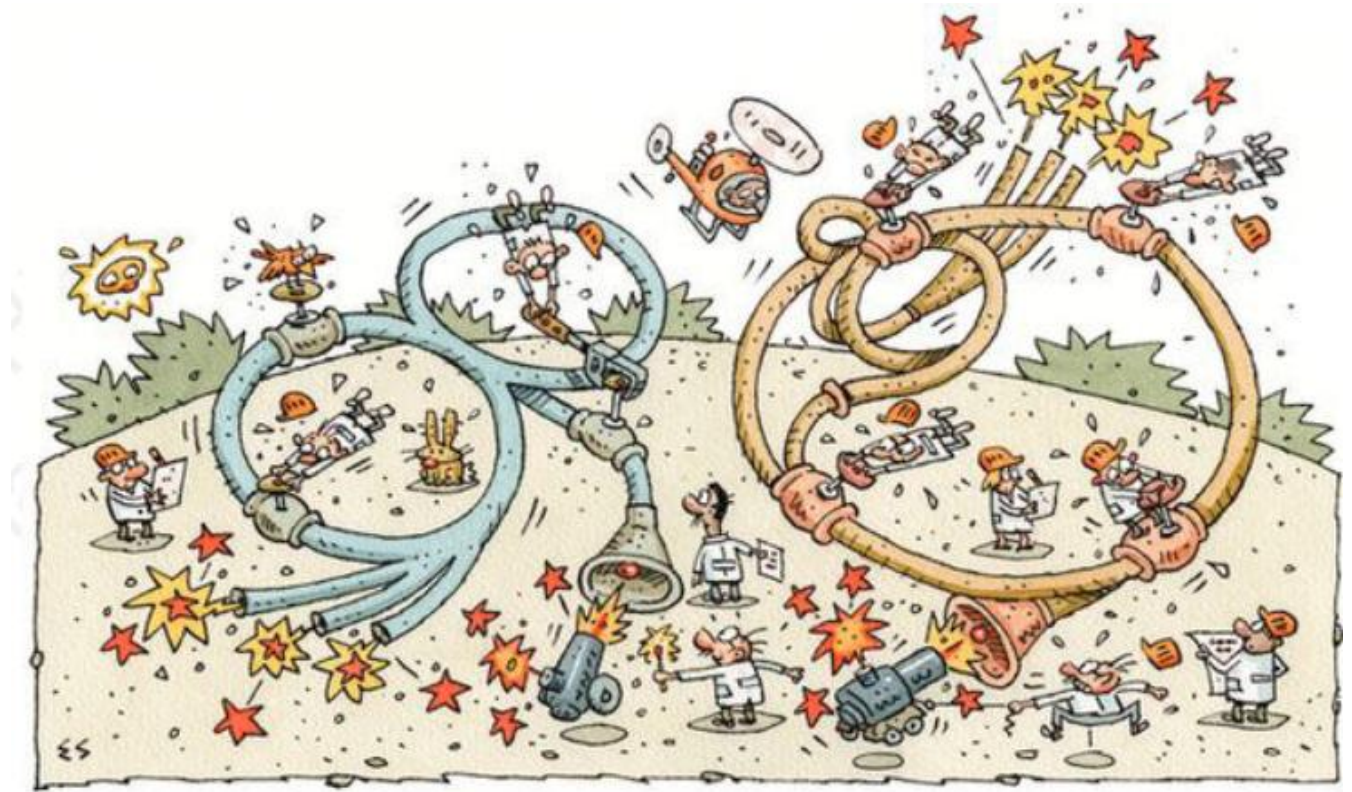
Aceleradores de partículas y sus aplicaciones

M. Boronat, IFIC-UV CSIC

IFIC Summer Student Programme, 22 de Julio 2026

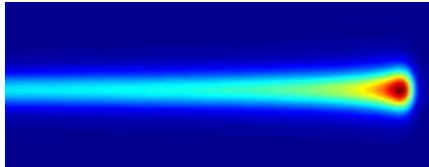
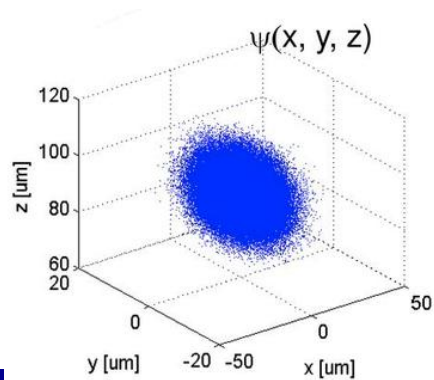


- ❑ ¿Qué es un acelerador de partículas? ¿Para qué sirve?
- ❑ Tecnologías principales
- ❑ Tipos de aceleradores
- ❑ Aplicaciones
- ❑ I+D en aceleradores médicos



¿Qué es un acelerador de partículas?

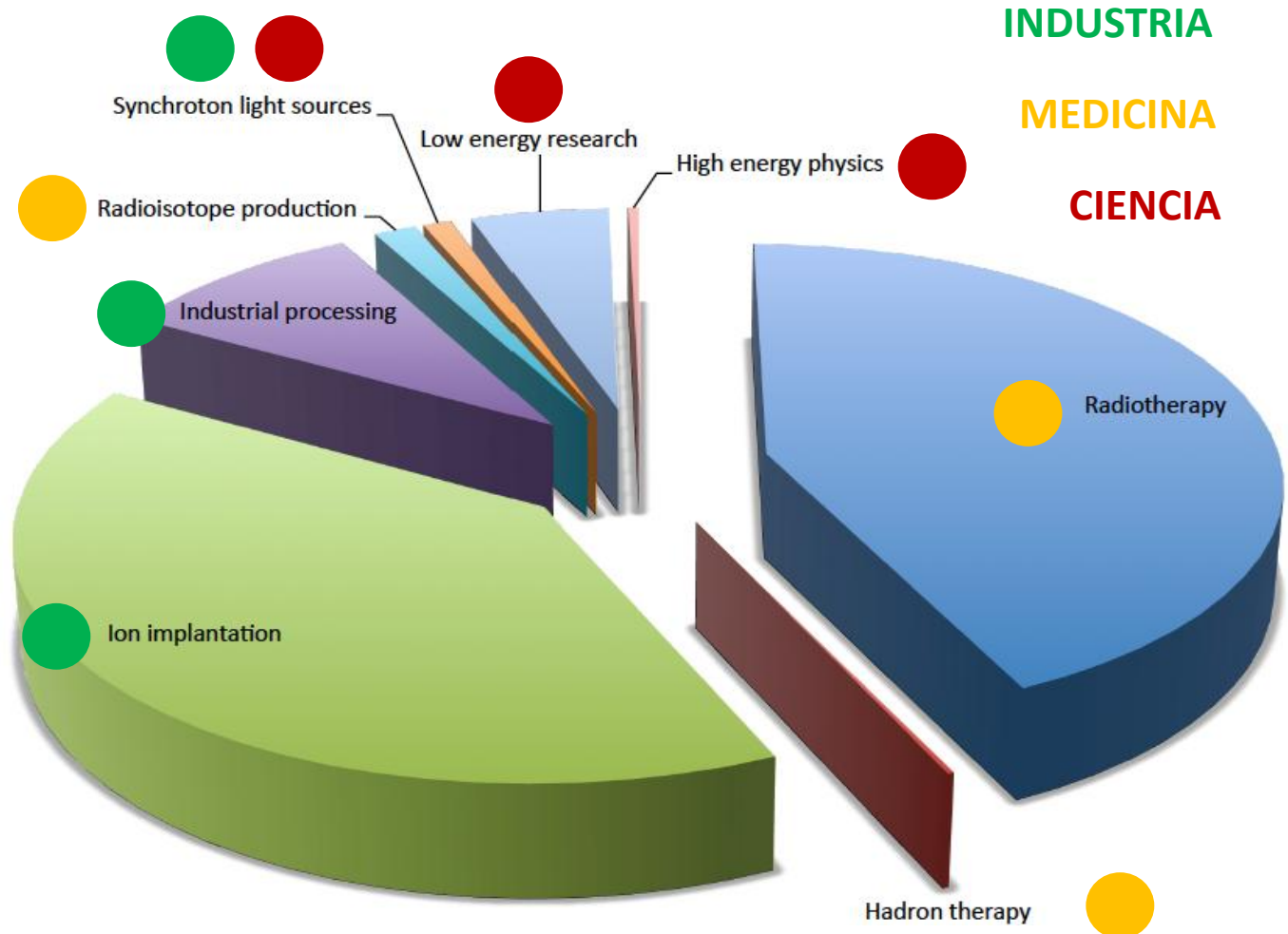
Una **herramienta** que nos proporciona un **haz de partículas cargadas** con unas determinadas energía y características



Principalmente caracterizado por:

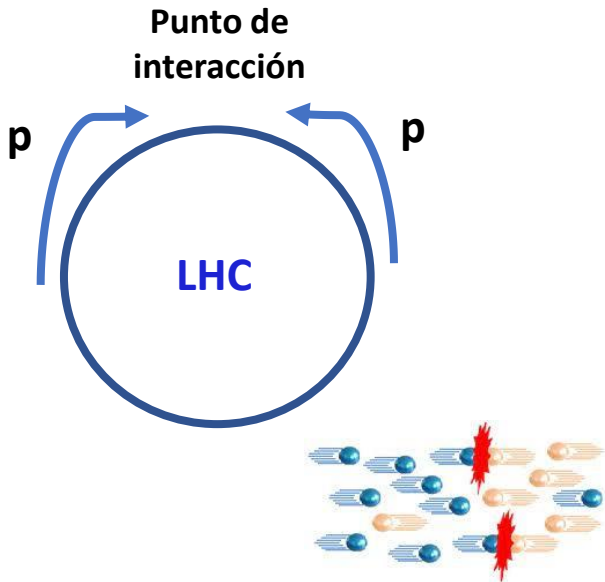
- ❑ Tipo de partícula (e, p, iones: $^4\text{He}^{2+}$, $^{12}\text{C}^{6+}$...), intensidad, tamaño transversal y longitudinal, energía y dispersión de energía

> 40000 aceleradores en el mundo



¿Qué hace tan útil a un haz de partículas?

¡Nos permite conseguir densidades de energía enormes!



El **LHC** (Gran colisionador de hadrones en Ginebra, suiza, en el CERN) es el acelerador de protones más grande y potente del mundo

400 toneladas, 200 m, 150 km/h

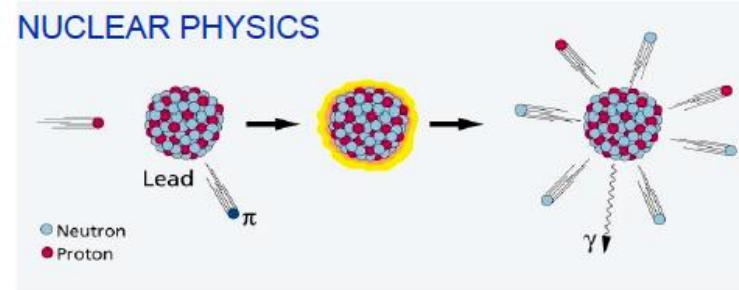


	Protón del LHC	150 gr yogur	Tren de alta velocidad
			
Energía	$1.1 \cdot 10^{-6} \text{ J}$	$5 \cdot 10^5 \text{ J}$	$3.4 \cdot 10^8 \text{ J}$
Volumen	$2.1 \cdot 10^{-45} \text{ m}^3$	$2.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$	$1.2 \cdot 10^3 \text{ m}^3$
Densidad de energía	$5.1 \cdot 10^{38} \text{ J/m}^3$	$2.2 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$	$2.7 \cdot 10^5 \text{ J/m}^3$
Tipo de energía	Energía cinética Escala subatómicas	Energía química Escala macroscópica	Energía cinética Escala macroscópicas

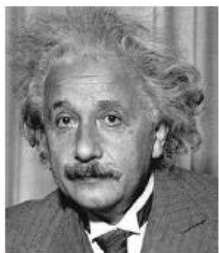
¿Qué podemos hacer con un haz de partículas?

Podemos acceder al mundo sub-atómico

- ❑ Romper, modificar **y generar nuevos elementos**
- ❑ En las colisiones se pueden **generar nuevas partículas**

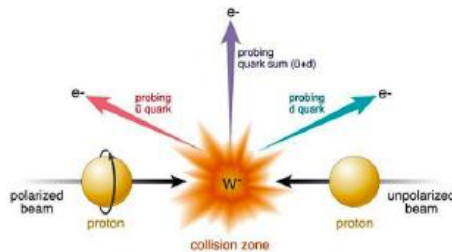


It's the dream of the ancient alchemists coming true!

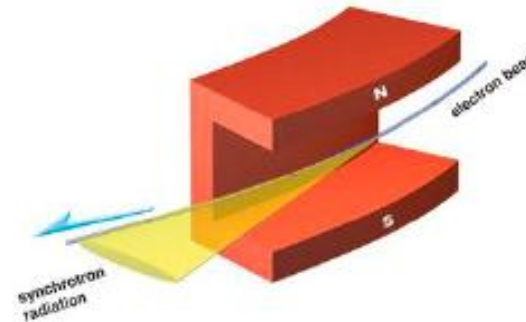
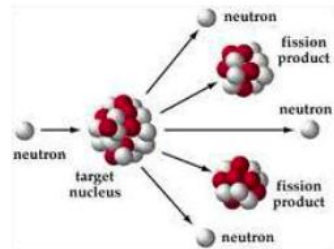


$$E = m c^2$$

PARTICLE PHYSICS



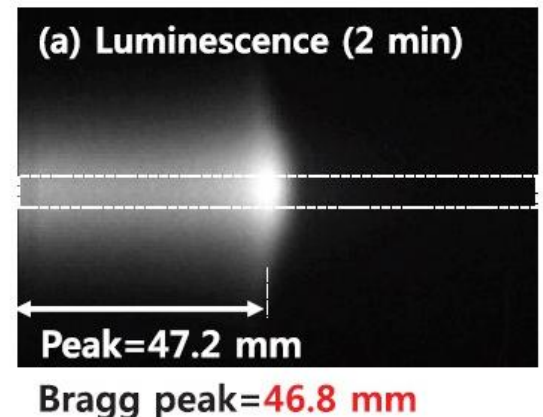
- ❑ Estudiar los constituyentes fundamentales de la naturaleza y las fuerzas que actúan sobre ellos



- ❑ Podemos generar haces secundarios de **rayos-X y neutrones**

✓ Uso en multitud de técnicas de imagen avanzada

- ❑ Los **haces de protones e iones son muy penetrantes** y nos permiten depositar con mucha precisión energía a una determinada profundidad en materiales y tejidos biológicos para modificarlos o romperlos

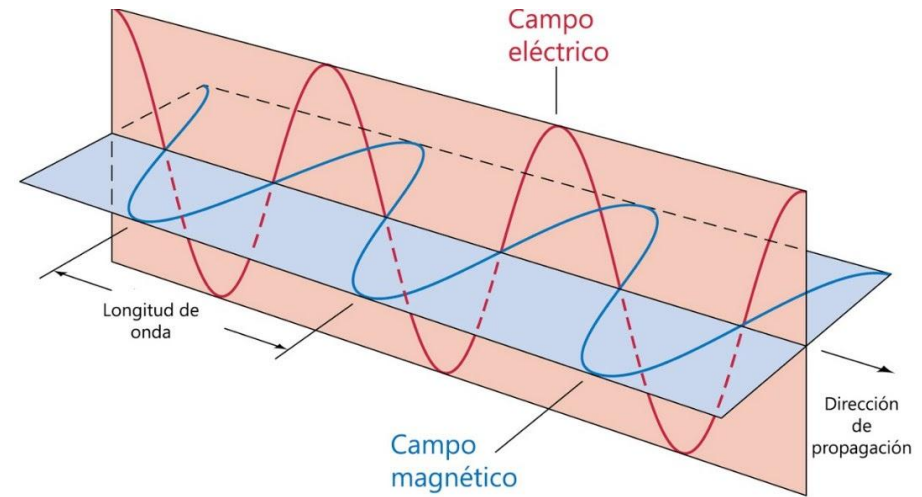
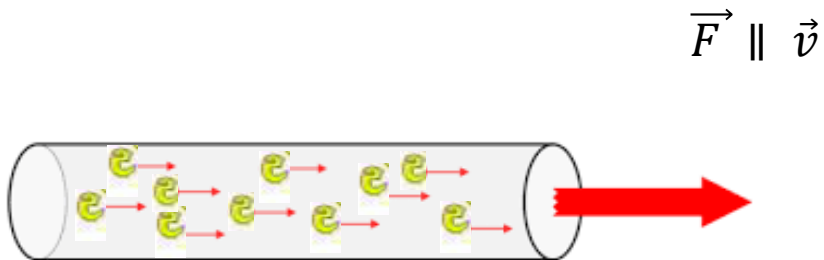


¿Cómo funciona un acelerador de partículas?

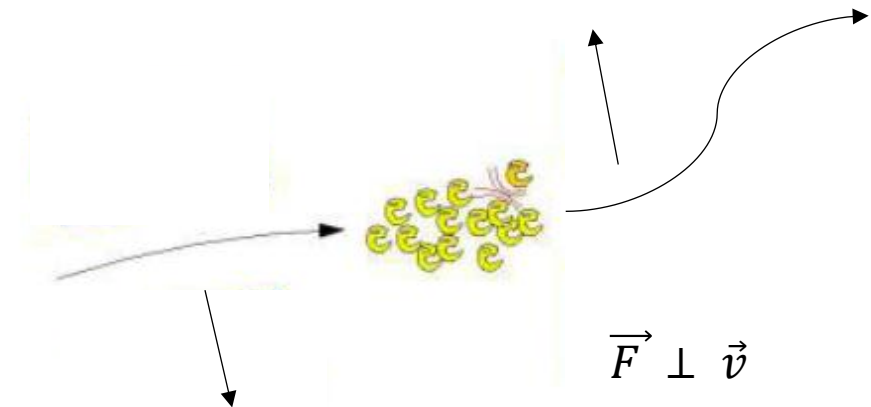
Campos electromagnéticos $(\vec{E}, \vec{B})$

Las dos principales funciones de un acelerador son:

❑ Incrementar la energía de las partículas



❑ Controlar la trayectoria de las partículas y mantenerlas agrupadas

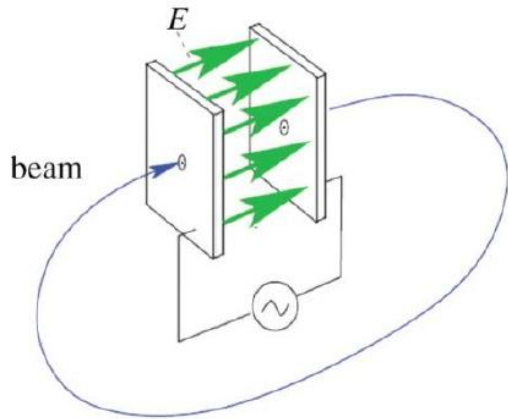


Fuerza de Lorentz

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = \vec{F}_e + \vec{F}_m$$

¿ Cómo aceleramos las
partículas? $\vec{F} \parallel \vec{v}$

**CAMPOS ELÉCTRICOS:
ACELERACIÓN**



¿ Y para cambiar la trayectoria
de las partículas ?

$$\vec{F} \perp \vec{v}$$

**CAMPOS MAGNÉTICOS
GUIADO DE TRAYECTORIA Y
FOCALIZACIÓN**

$$\vec{F} \perp \vec{v}$$

$$\frac{|\vec{F}_m|}{|\vec{F}_e|} \sim 300\beta \quad \beta = v/c$$

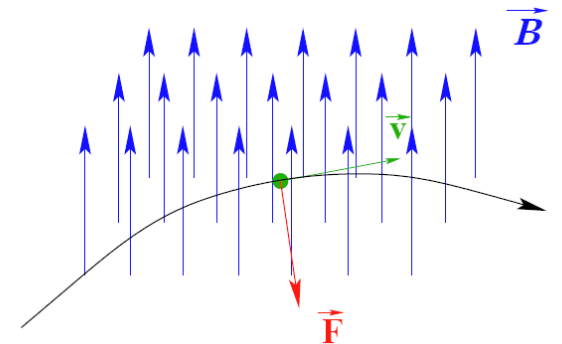
$$\beta \sim 0.99: |\vec{F}_m| \sim 297 |\vec{F}_e|$$

$$\beta \sim 0.5: |\vec{F}_m| \sim 150 |\vec{F}_e|$$

$$\beta \sim 0.005: |\vec{F}_m| \sim 1.5 |\vec{F}_e|$$

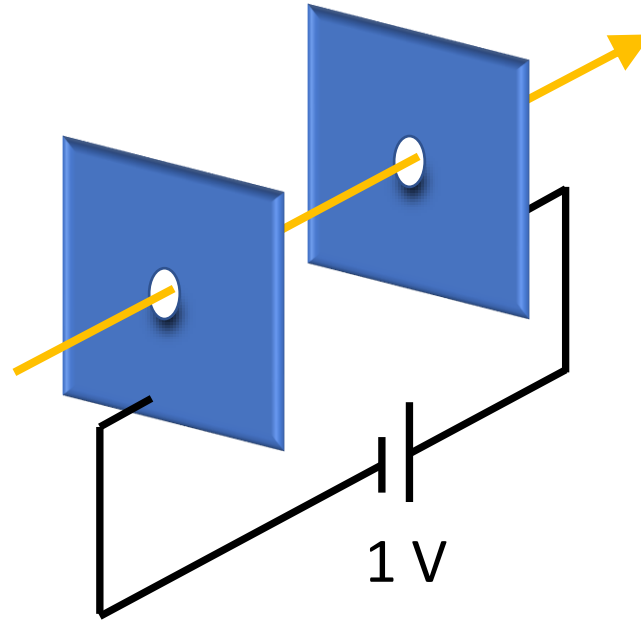
$$|B| = 1 \text{ T}$$

$$|E| = 1 \text{ MV/m}$$



Unidades de energía

1 eV es la energía que gana un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1 V



$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

Seguridad
(~300 KeV)



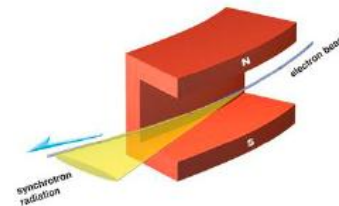
Industria
(~KeV-70 MeV/n)



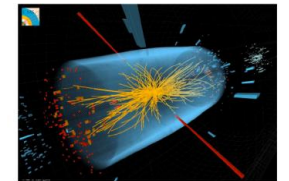
Medicina
(~KeV-230 MeV/n)



Fuentes de radiación sincrotrón
(ALBA 3 GeV)



Colisionadores
(LHC 6.5 TeV)



Baja

Energía del haz

Alta

Energía, momento y masa

Cuando la velocidad de las partículas (v) se acerca a la velocidad de la luz (c) entra en juego la **relatividad especial**

Les damos energía a las partículas y éstas se vuelven más y más rápidas, pero llega un momento en que la energía que les damos empieza a incrementar la masa y no la velocidad...

Mecánica clásica

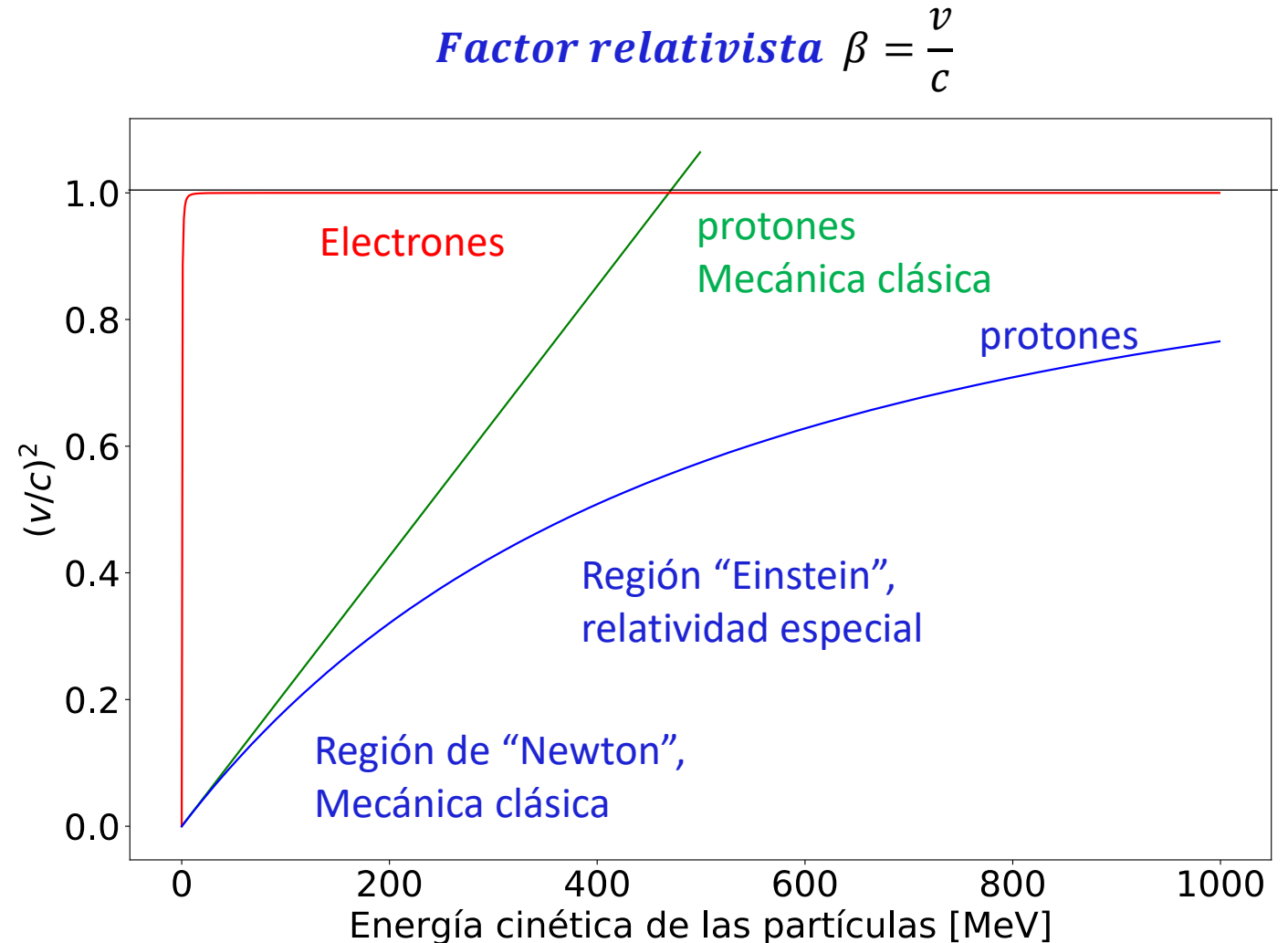
$$T = \frac{1}{2} m_0 v^2$$

Relatividad especial

$$T = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right]$$

Protones con 5×10^5 KeV ($\beta = 0.75$)

Electrones con 5×10^2 KeV ($\beta = 0.86$)

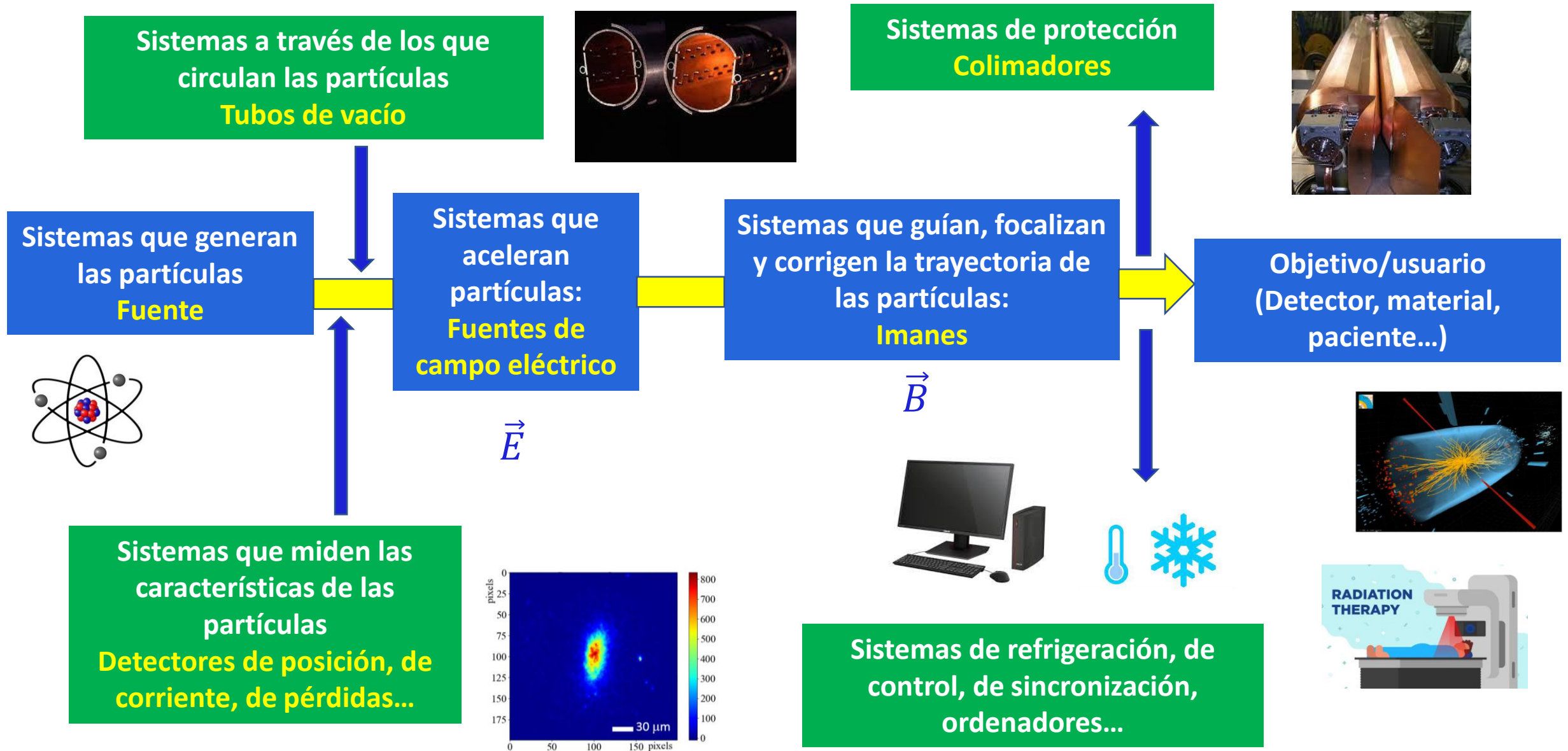




Tecnologías principales
Fuente de partículas
Tecnologías de aceleración
Imanes

...

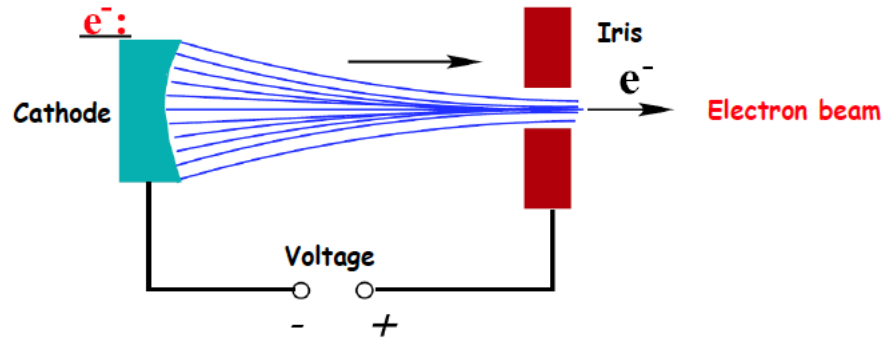
A grandes rasgos un acelerador esta formado por...



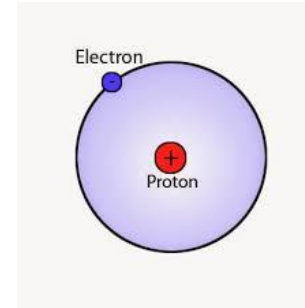
Fuentes de partículas

Aquí es donde empieza todo...

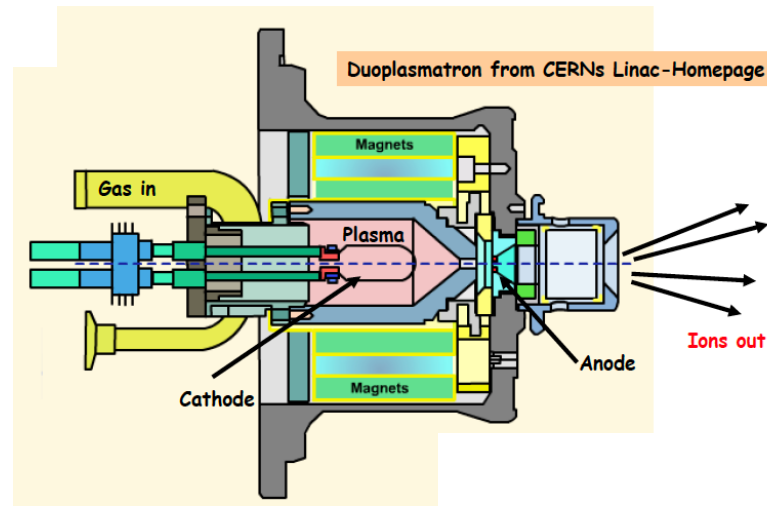
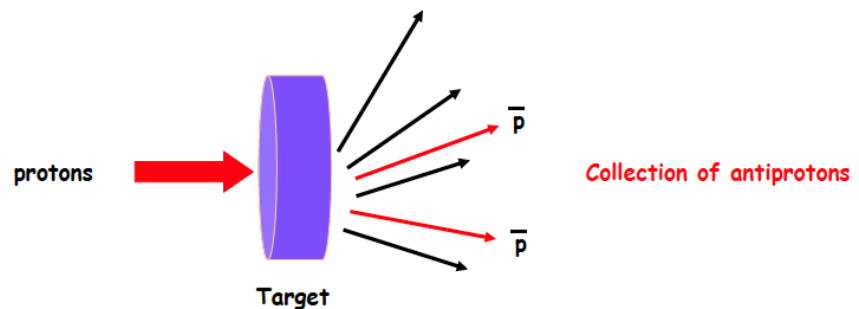
Electrones



Protones, iones...



Antiprotones, positrones



Una botella con 5 Kg de hidrógeno contiene en torno a 3'000'000'000'000'000'000 billones de protones!

Fuentes de campo eléctrico: corriente continua

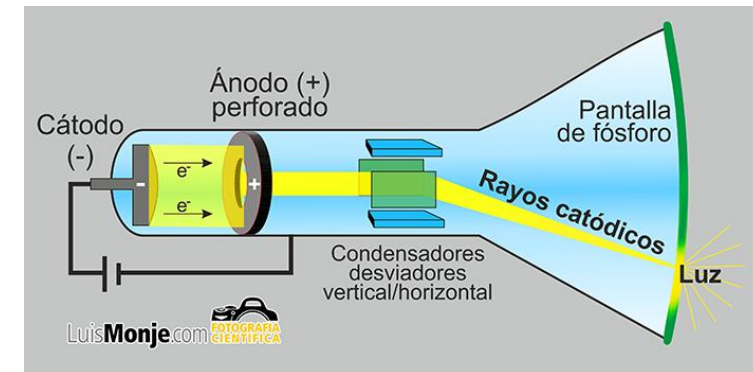
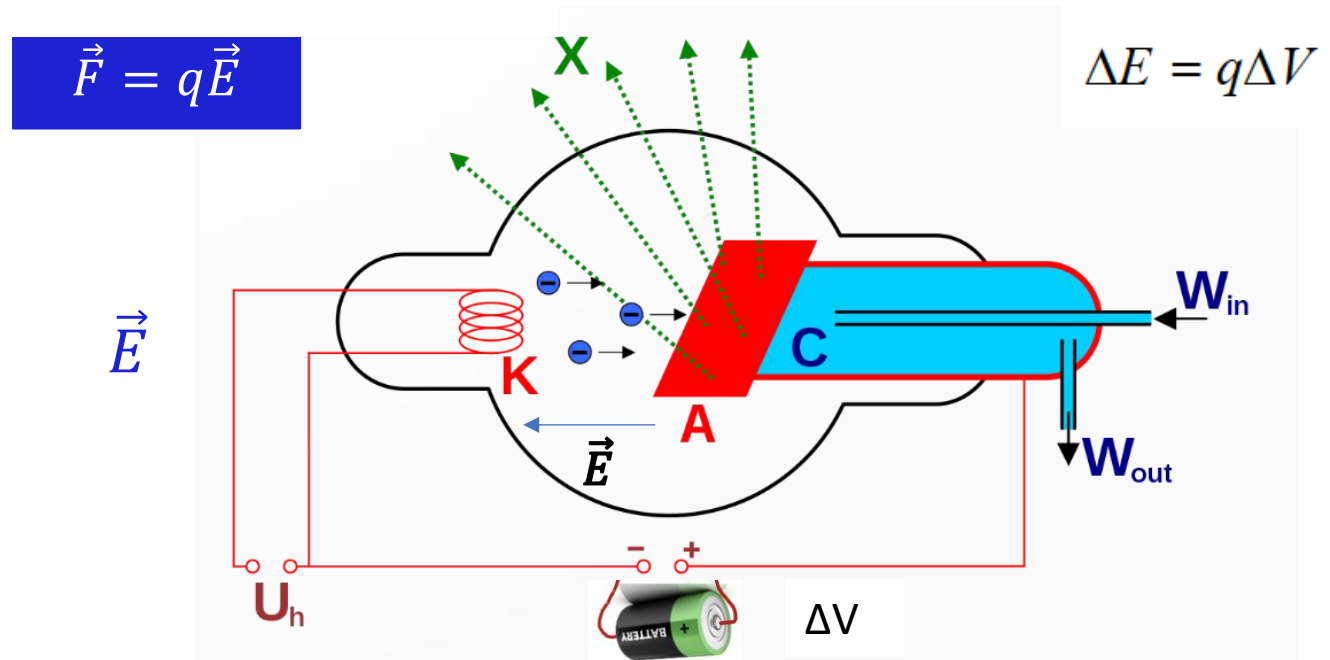
El primer acelerador de partículas fue inventado por **William Crookes (1875)** y mejorado por **Wilhelm Conrad Röntgen**



*Bertha
Röntgen's Hand
8 Nov, 1895*

Tubos de rayos catódicos

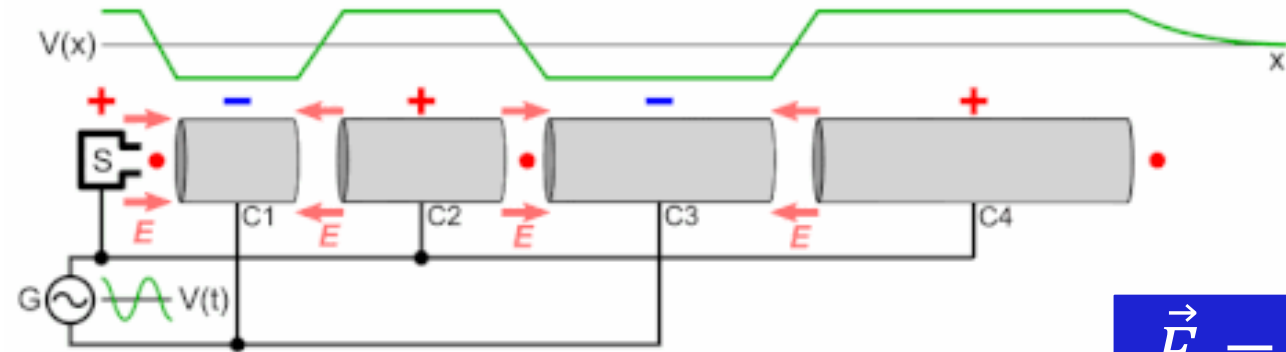
Primer televisor con tubos de rayos catódicos (1934) extensivamente utilizado hasta ~2010



Fuentes de campo eléctrico: corriente alterna

Idea original de **Gustav Ising (1924)** que fue implementada por **Rolf Wideroe (1927)**

Principio: aplicar un campo eléctrico variable con el tiempo a una secuencia de tubos de deriva

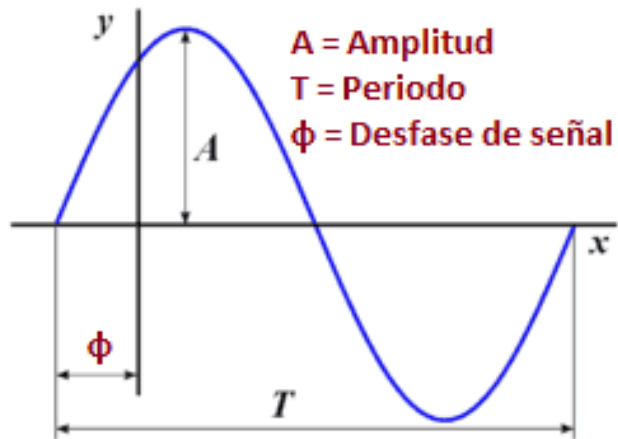


$$\vec{F} = q\vec{E}$$

Dos consecuencias de utilizar un campo variable

- ☐ El haz de partículas no puede ser continuo
- ☐ Los tubos de deriva se alargan tal y como aumentamos la energía de las partículas

$$l_i = \frac{v_i T_{RF}}{2} = \frac{v_i}{2f_{RF}}$$

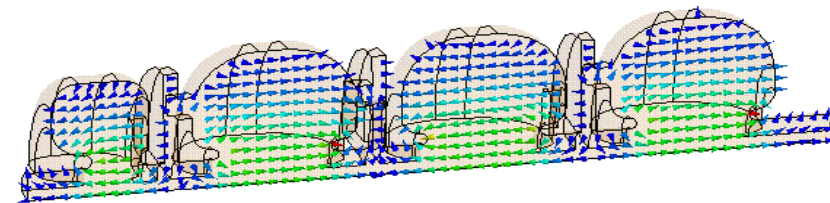
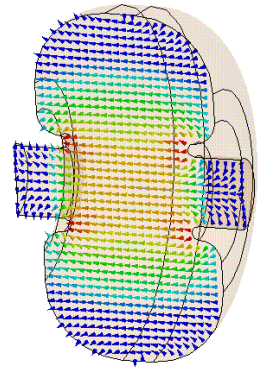
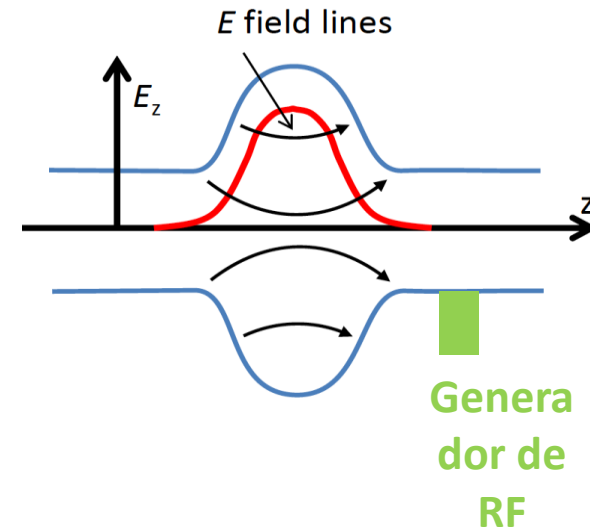


Fuentes de campo eléctrico: cavidades resonantes de RF

Desarrolladas en los **años ~1950**

Son cavidades metálicas donde los campos EM excitados tienen una distribución espacial particular (modos resonantes)

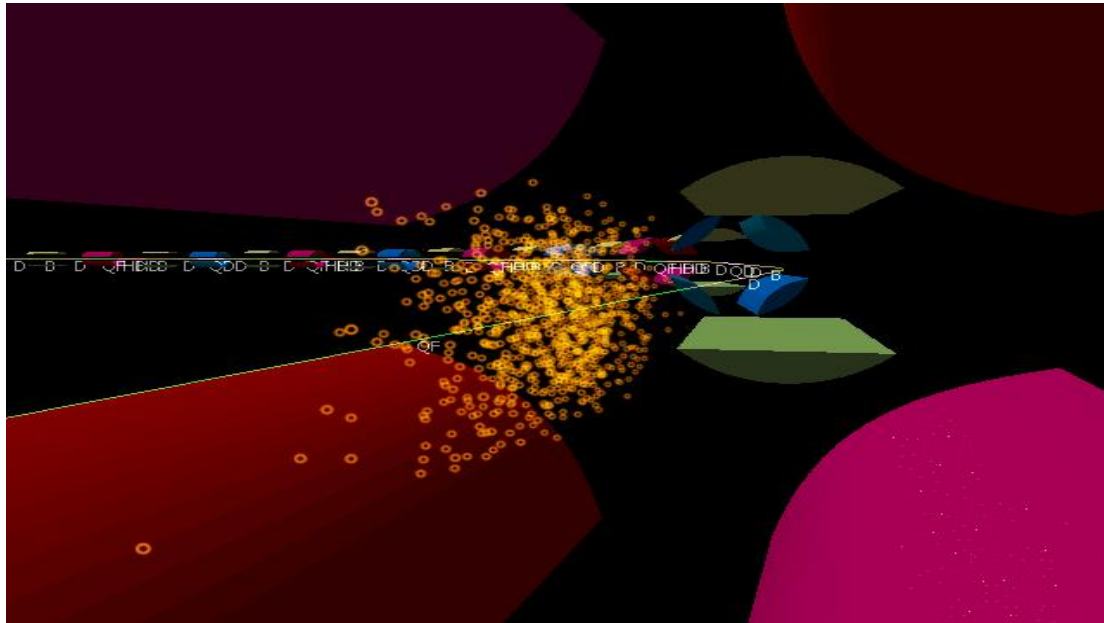
- ❑ Los modos se excitan con generadores de RF
- ❑ Incluyen un campo eléctrico en la dirección de propagación de las partículas
- ❑ Esta tecnología nos permite alcanzar más altos gradientes de aceleración y por tanto aceleradores más compactos



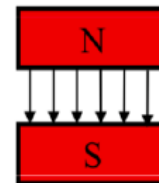
Fuentes de campo magnético: imanes

Para guiar las partículas utilizamos **imanes**. Según el número de polos tendrán diferente función

Simulation by Stephen Brooks (Brookhaven National Laboratory)



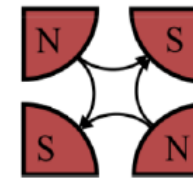
dipole



$n = 1$

Curvar la trayectoria en un plano

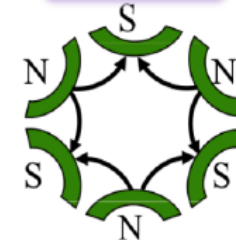
quadrupole



$n = 2$

Focalizar el haz y mantener las partículas agrupadas

sextupole



$n = 3$

Corrige cromaticidad, es decir corrige a las partículas con energías diferentes a la nominal

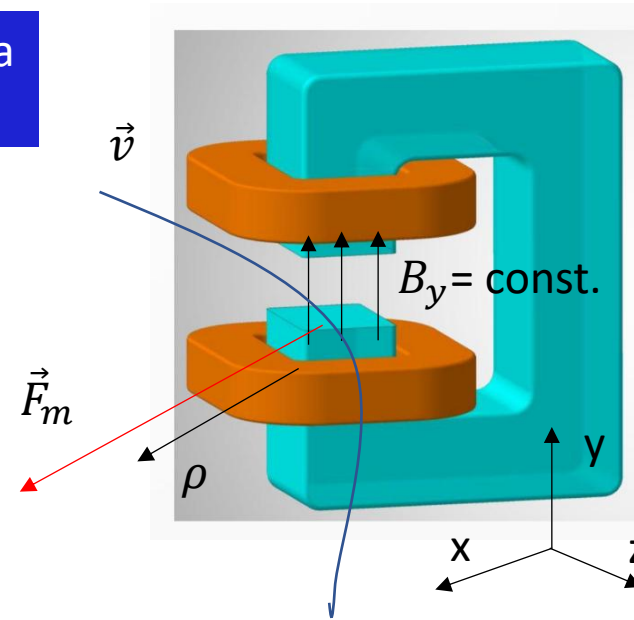
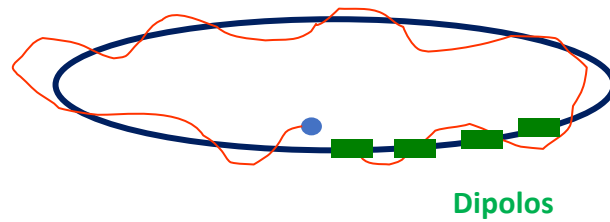
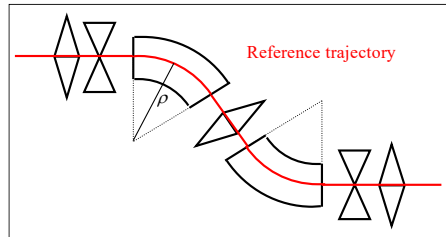
...

$n > 3$

Correcciones de orden superior

Dipolos

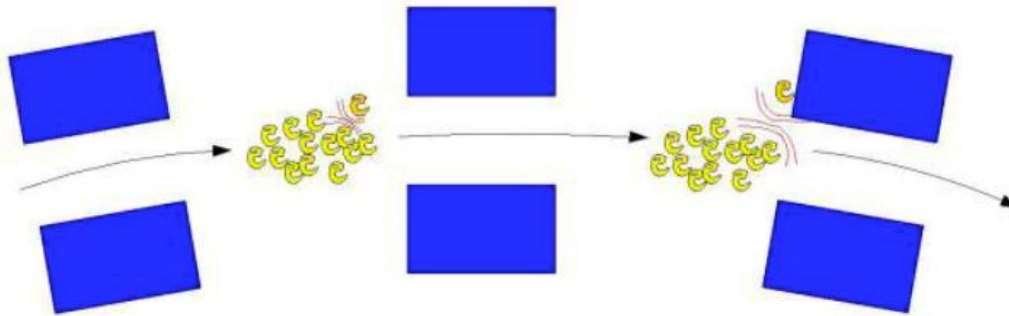
Los dipolos magnéticos se utilizan para curvar y corregir la trayectoria de las partículas



Igualando la **fuerza magnética** a la **fuerza centrípeta**

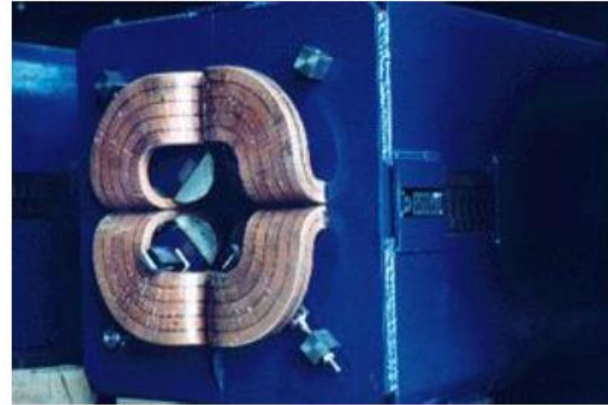
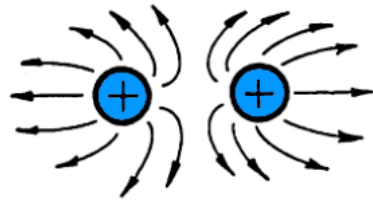
$$B\rho = \frac{p}{q}$$

“**Bρ**” se define como la **rigidez magnética** del haz de partículas



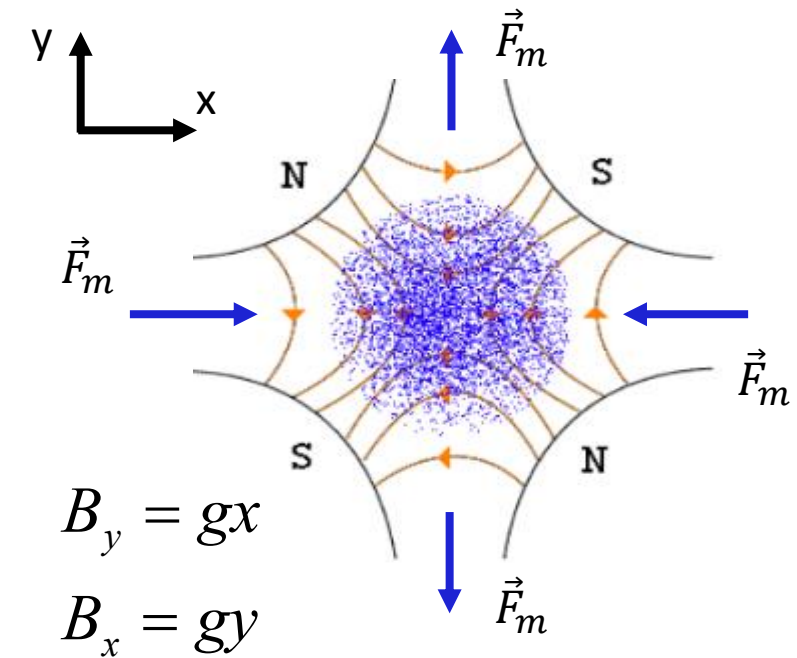
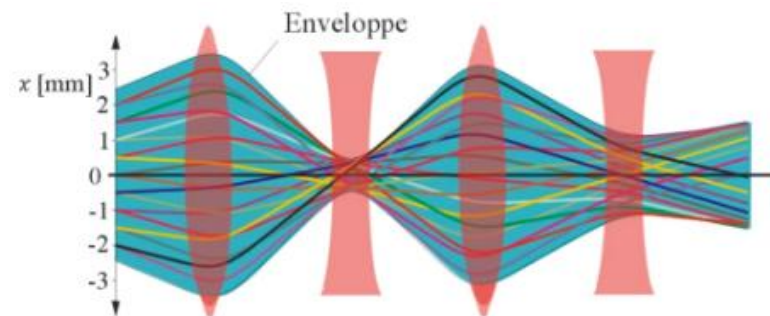
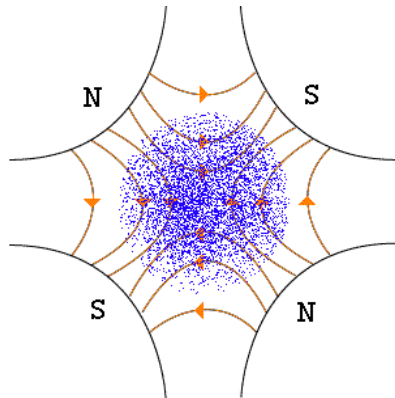
Cuadrupolos

En un haz tenemos muchas partículas con la misma carga las cuales tienden a separarse debido a la fuerza eléctrica de repulsión de Coulomb



“Strong focusing” (1952) o enfoque de gradiente alterno

Consiste en añadir un cuadrupolo por plano (x, y) cada pocos dipolos
La envolvente del haz oscila pero las partículas se mantienen confinadas



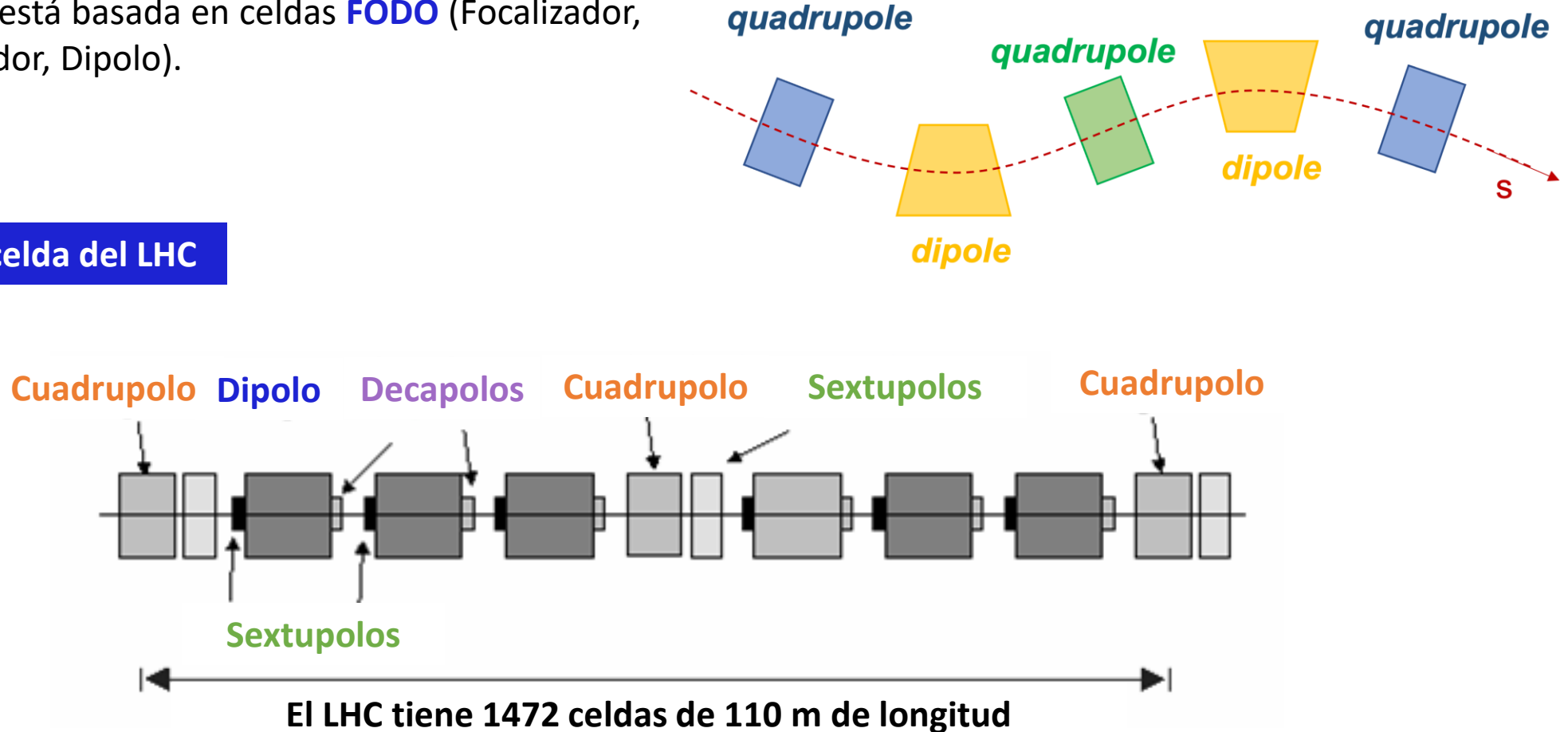
Ha permitido obtener tamaños de haces más pequeños y controlados y por tanto también tubos de vacío más pequeños

La “lattice” de un acelerador

La estructura formada por todos los imanes del acelerador es conocida como “lattice”

La configuración mas sencilla y estable para diseñar un acelerador circular está basada en celdas **FODO** (Focalizador, Dipolo, Desfocalizador, Dipolo).

Estructura de una celda del LHC



Superconductividad en aceleradores de partículas

Se descubrió en **1911** y se explicó en **1958**, se empezó a **utilizar en aceleradores de partículas a partir de 1970**

Los **materiales superconductores**, tienen una **resistencia eléctrica nula** cuando se enfrían por debajo de su temperatura característica

Nos permite construir **imanes** que pueden soportar corrientes eléctricas y campos electromagnéticos más altos y **cavidades aceleradoras de RF** que no disipan potencia y por tanto son más eficientes

Materiales que se usan:

Niobio-Titanio para imanes

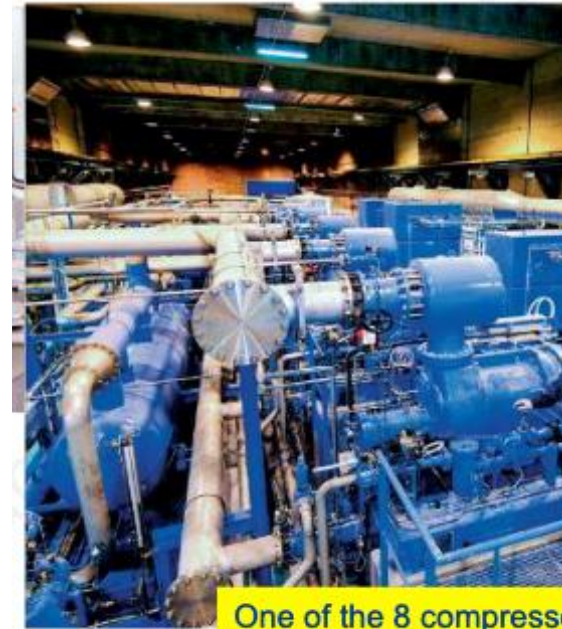
Niobio par cavidades de RF

VENTAJAS: Construir aceleradores más compactos y eficientes

INCONVENIENTE: Se requieren un sistema de refrigeración muy grandes



The LHC magnet superconducting cable



One of the 8 compressor units of the 4.5 K refrigerator for LHC

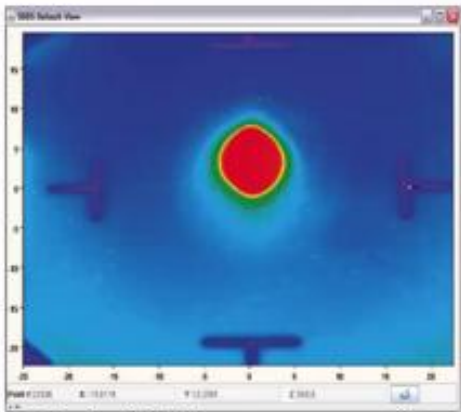


Clean room assembly of superconducting RF cavities

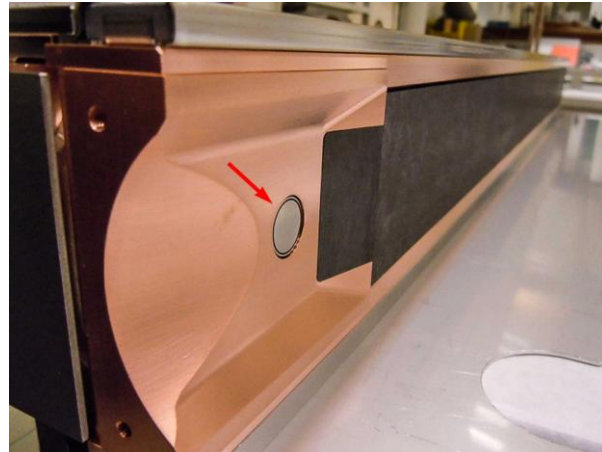
Y mucho más...

Sistemas de colimación y protección

Sistemas de monitorización de haz “diagnósticos”: detectores de position, energía, intensidad...



Scintillating screen in LHC: first turn diagnostic



Sistemas eléctricos

Sistemas de almacenamiento de datos



Sistemas de alta potencia

...



Sistemas de control y sincronización, ordenadores

El diseño de estas máquinas, la optimización y la operación involucra expertos en diversas disciplinas.
¡Es un campo multi- e inter-disciplinar!



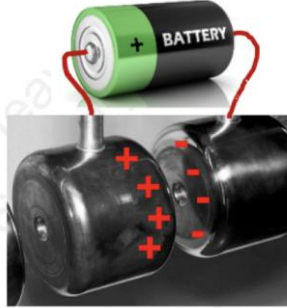
Tipos de Aceleradores

- Electrostáticos
- Lineales
- Circulares (ciclotrones y sincrotrones)

Aceleradores electrostáticos

1875/1895

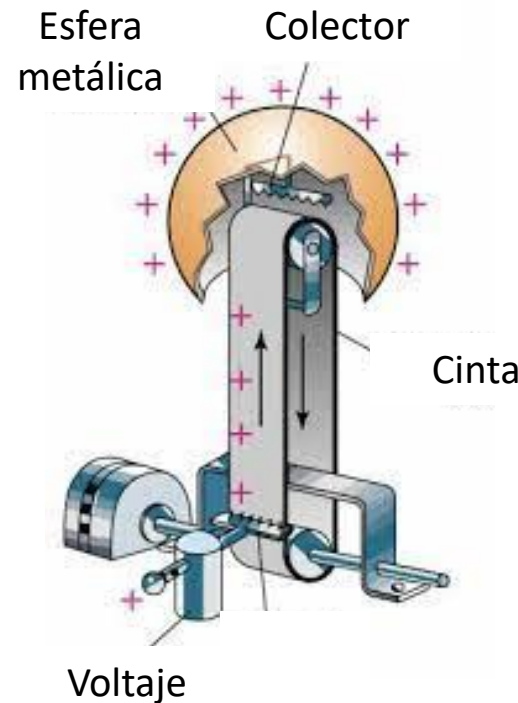
William Crookes y
Wilhelm Conrad
Röntgen
Tubos de rayos
catódicos



750 kV Cockcroft-Walton generator
at Fermilab (Proton source)

~ 1930

Cockcroft-Walton
Van der Graaff

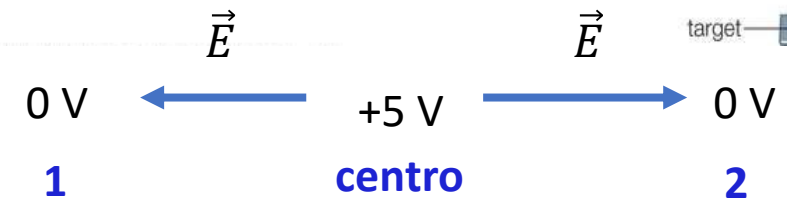
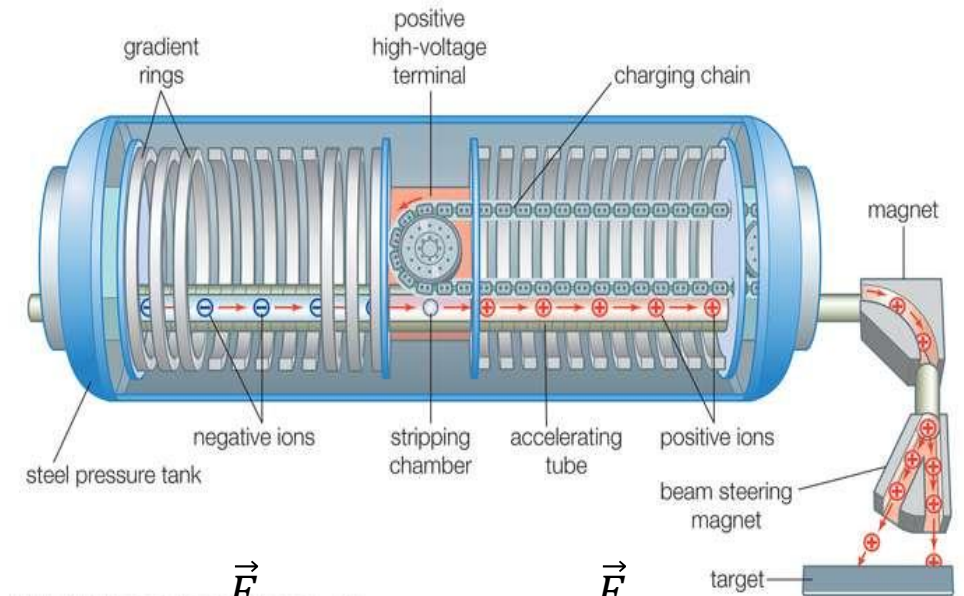


~ 1950

Tandem

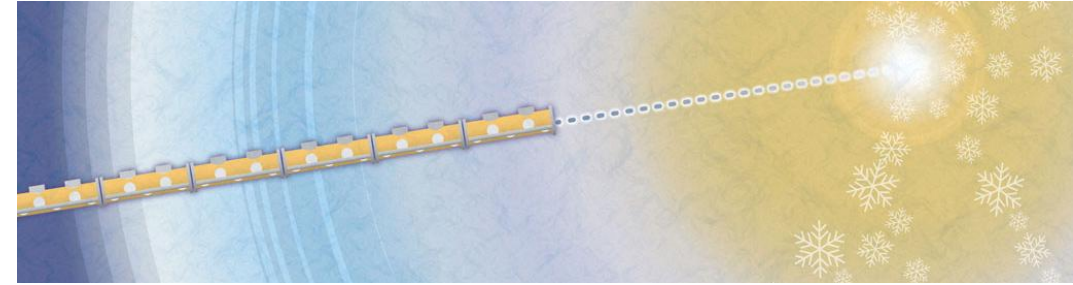
Permite acelerar partículas a más altas energías utilizando un generador, pero cambiando la carga de los iones

Limitados ~30MV



Aceleradores lineales

- ❑ Caracterizados por que las partículas pasen una única vez por cada estación de aceleración
- ❑ La longitud aumenta con la energía
- ❑ Basados en campos eléctricos que varían con el tiempo (RF)

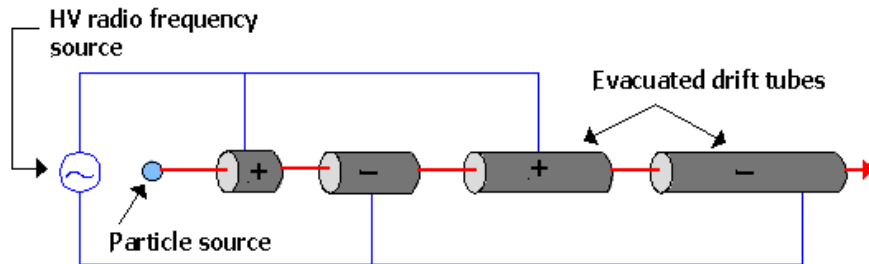


1924-1927

Gustav Ising y Rolf Wideroe

Tubos de deriva

$(\beta < 0.02)$



“Drift tube linac” tipo Álvarez

Los tubos de deriva se meten en un tanque resonante. Con una señal de RF se excita un modo resonante

1946

Luís Álvarez

$(0.02 < \beta < 0.4)$



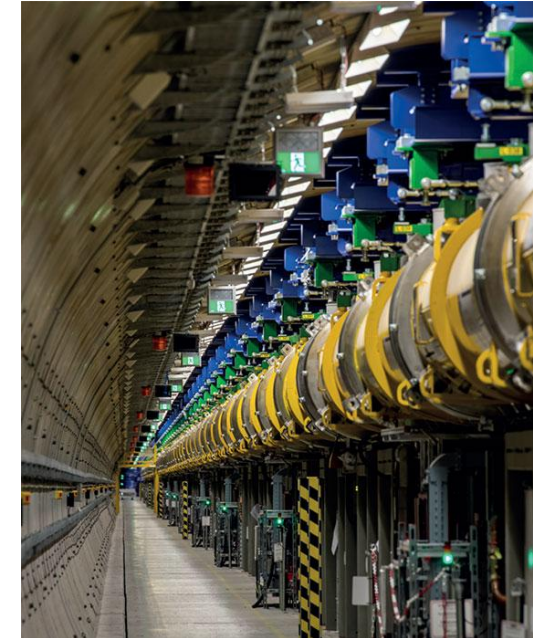
M. Boronat

~1950

Cavidades resonantes

de alta frecuencia

$(\beta > 0.5)$



(XFEL), DESY, Hamburgo, Alemania

Aceleradores circulares

1932

E. O. Lawrence
M. S. Livingston
Ciclotrones



B, f_{RF} constantes

$$\vec{F}_{centrípeta} = \vec{F}_{magnética}$$

$$\frac{v}{\rho} = \frac{qB}{m} = cte$$

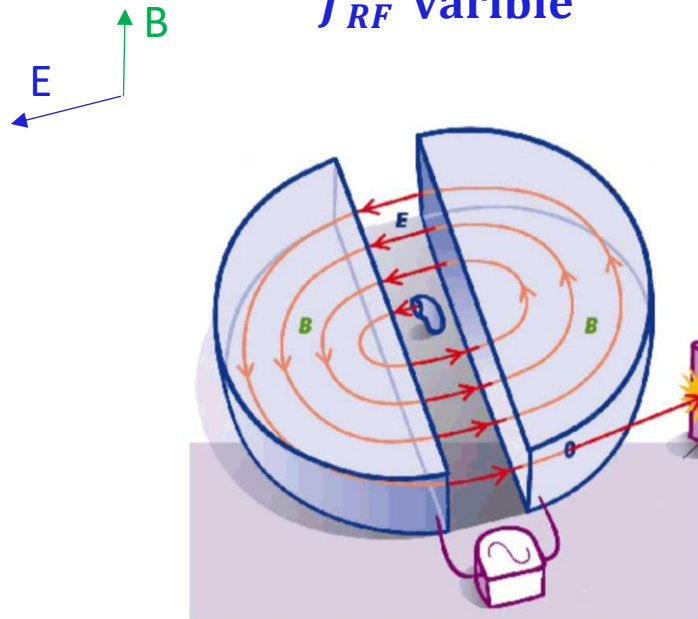
Condición de sincronización

$$f_r = f_{RF}$$

1946

E. O. Lawrence
Sincrociclotrón
Límite ~ 700 MeV

f_{RF} variable



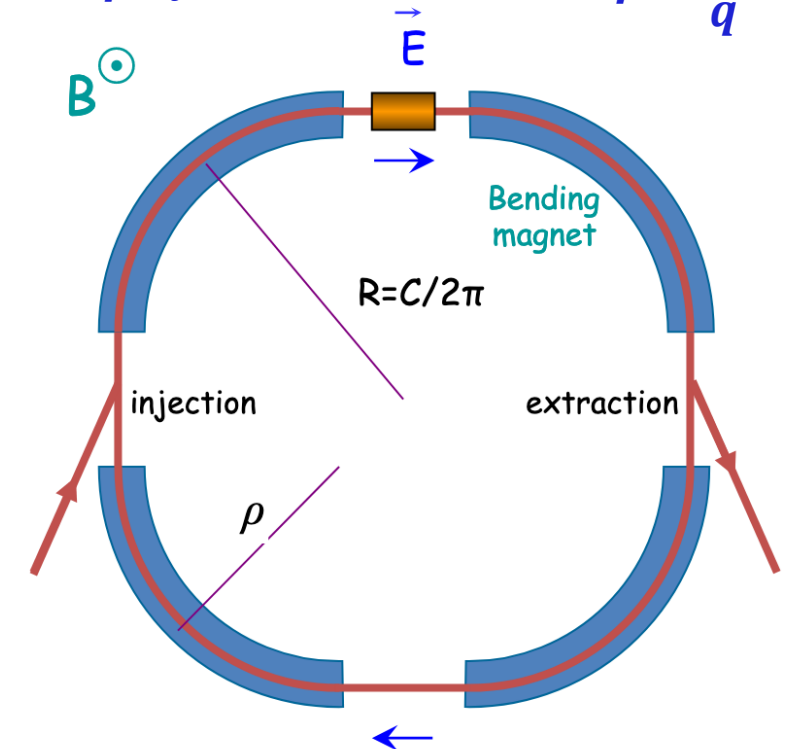
Límite para protones ~ 200 MeV
(efectos relativistas)

~ 1959

Sincrotrón
Propuesto por M. Oliphant (1943)
CERN-PS y el BNL-AGS

B variable, ρ fijo

$$B\rho = \frac{p}{q}$$

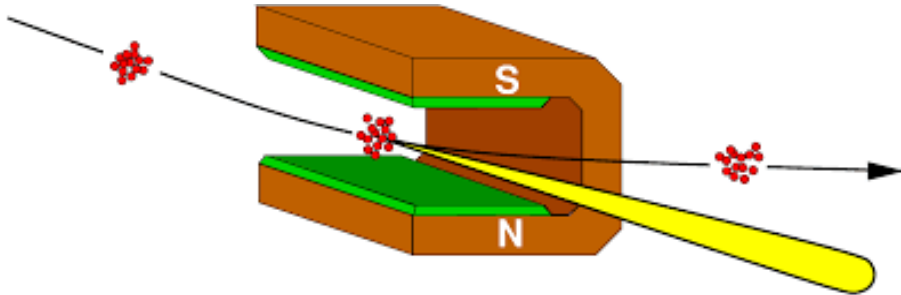


Si $v < c$ f_{RF} variable

Si $v \approx c$ (régimen ultra relativista) $f_s = cte$

$f_{RF} = cte$

Con el invento del sincrotrón se descubrió la radiación sincrotrón



Energía perdida
por radiación
sincrotrón por
vuelta

$$\Delta E = \frac{e^2}{3\epsilon_0 (m_0 c^2)^4} \frac{E^4}{\rho}$$

ALBA, cerca de Barcelona se
inauguró el 22 de marzo del
2012 (E= 3 GeV)

La primera fuente de RS fue
construida en el Reino Unido
~1980



$$E = h\nu = hc/\lambda$$



<https://www.albasynchrotron.es/>

Y allanó el camino hacia los colisionadores de partículas...

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) es el **sincrotrón** más grande y potente del mundo

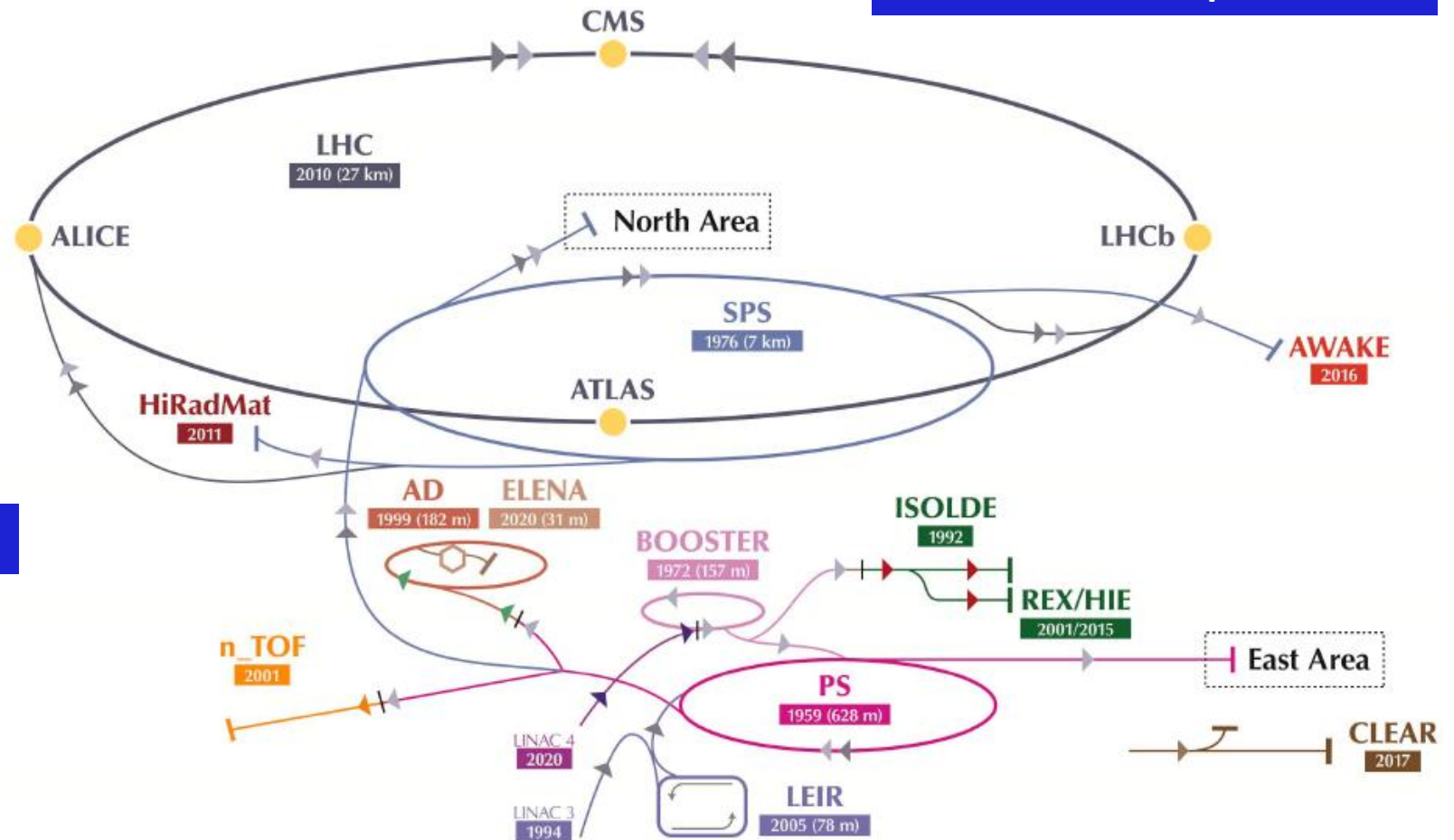
Circunferencia de 27 Km

Basado en **tecnología superconductora** una temperatura de $-271.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1.9 K)

La cadena de aceleradores del CERN...

Acelerador lineal (50 MeV)
Booster 1.4 GeV
PS 25 GeV
SPS 450 GeV
LHC 7 TeV

**El LHC tiene 9593 imanes !!
1232 dipolos
392 cuadrupolos**





Aplicaciones

Ciencia

Cultura y arte

Industria

Medicina

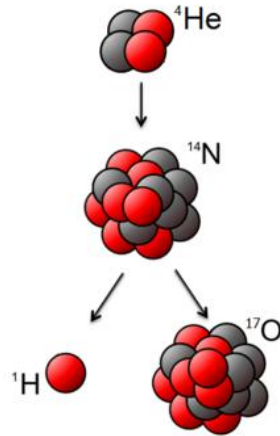
Application of particle accelerators in Europe

http://apae.ific.uv.es/apae/wp-content/uploads/2015/04/EuCARD_Applications-of-Accelerators-2017.pdf

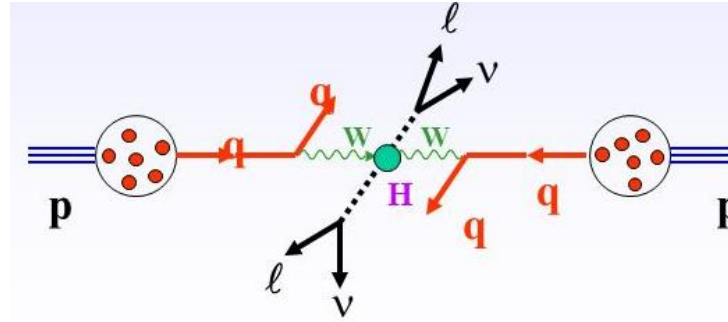
Aplicaciones en ciencia

e-, p, iones, γ , n ($\sim$ keV hasta TeV)

Física Nuclear

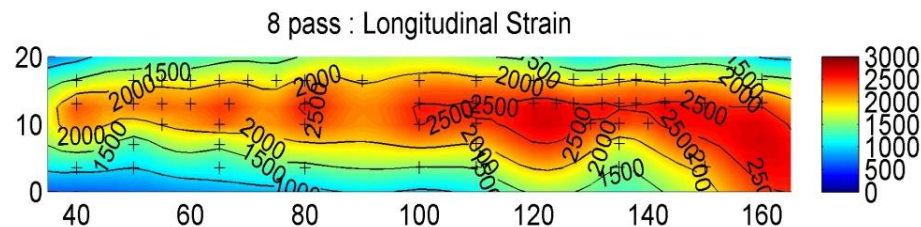


Física de Partículas



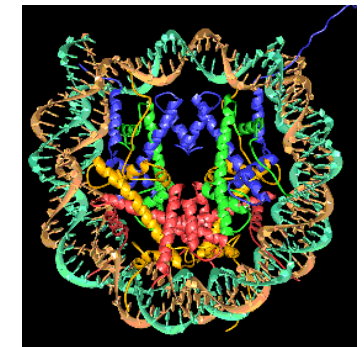
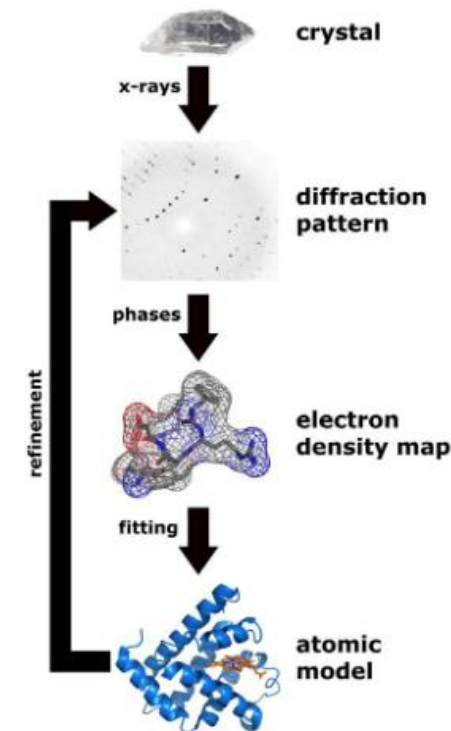
Ciencia de materiales

‘Bombardeando materiales con neutrones podemos saber donde están los átomos de un material’



Biología, Bioquímica, química...

Cristalografía de proteínas



Reconstruction of the 3D structure of a nucleosome (DNA packaging) with a resolution of 0.2 nm

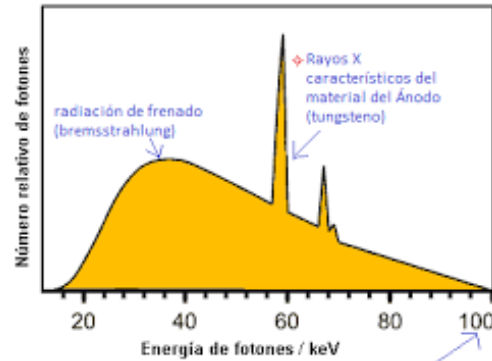
Estudiar la estructura proteica que permite esclarecer la función y diseñar nuevos compuestos con valor farmacológico o biotecnológico

Medidas del estrés en un ala de un Airbus A380

Aplicaciones en preservación de patrimonio cultural y arte

Fluorescencia de rayos-X

Fuentes de radiación sincrotrón



Espectro de rayos-X característicos

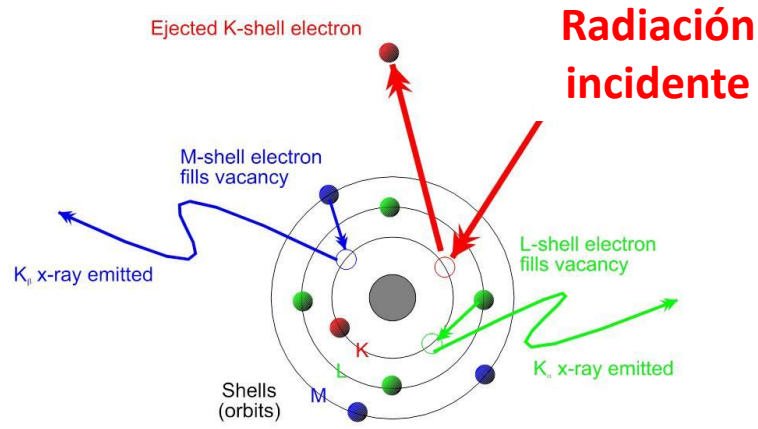
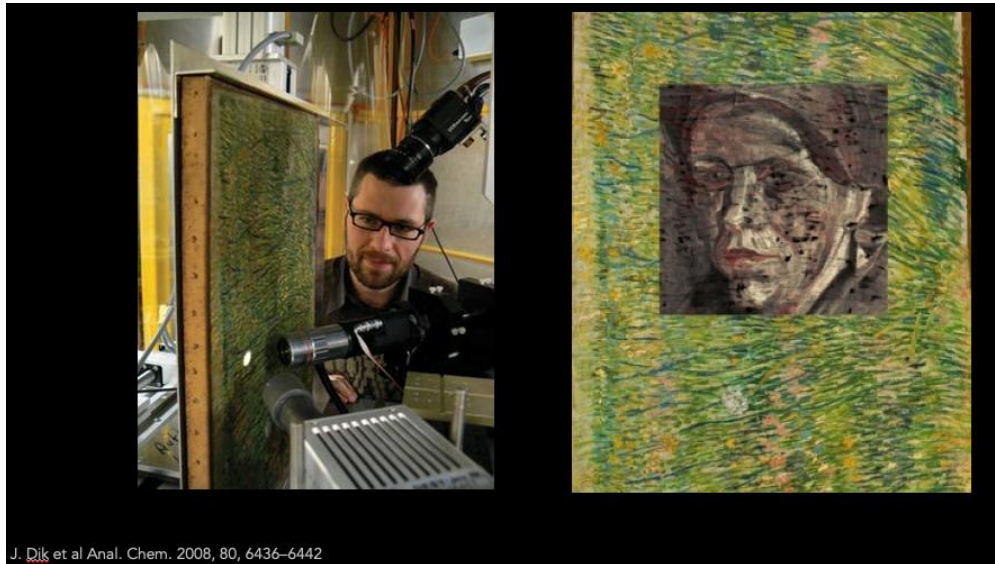


Figure 15.9 Panel B.

Source: Photograph by Robert Gunn.



J. Dik et al Anal. Chem. 2008, 80, 6436–6442

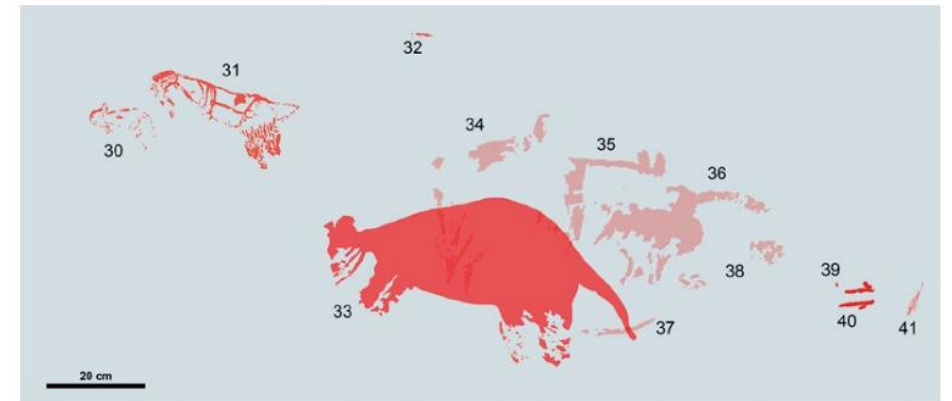
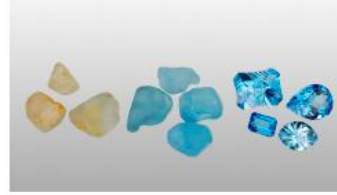


Figure 15.10 Photo-tracing of the Panel B images.

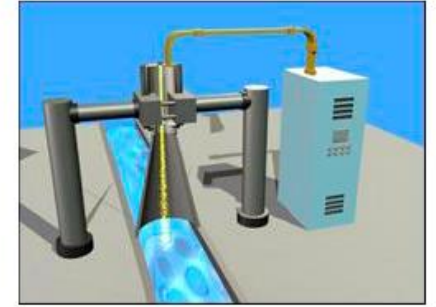
Source: Digital tracing by Robert Gunn.

Aplicaciones en la industria, seguridad

e-, p, iones, γ , n ($\sim$ eV hasta 100 MeV/n)



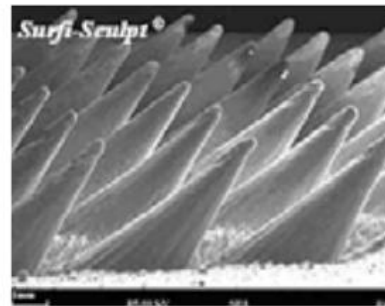
Tratamiento de aguas residuales



Procesos industriales

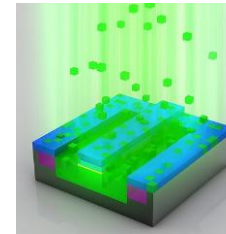
Fundir metales
Soldadura y unión
Mecanizado y estructurado de superficies

Cambio color gemas

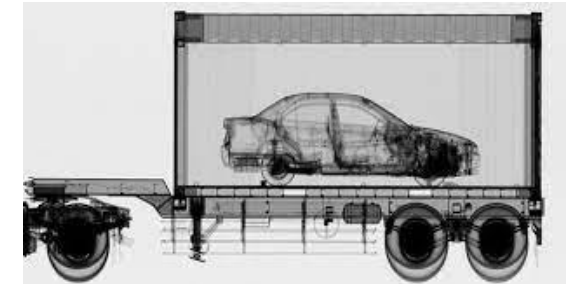


Quitar impurezas orgánicas no degradables

Implantación de iones

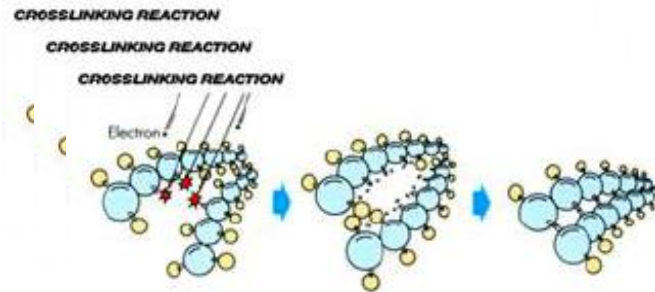


Seguridad



Procesamiento de materiales

Más resistentes a la temperatura, más resistentes a la tracción y a romperse



Images courtesy of Intel



Esterilización de comida



Lower dose $\longrightarrow$ Higher dose

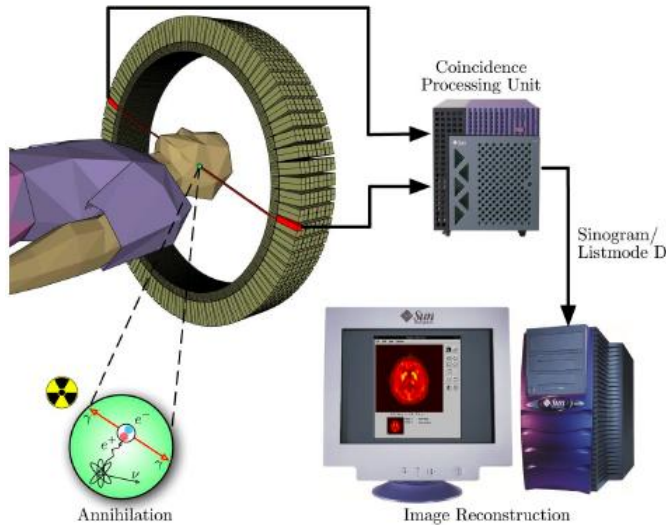


Se conoce como pasteurización fría o electrónica
Se realiza con electrones o Rayos-X

Aplicaciones en medicina

e-,p, iones, γ , n ($\sim$ keV hasta 430 MeV/n)

Imagen medica mediante

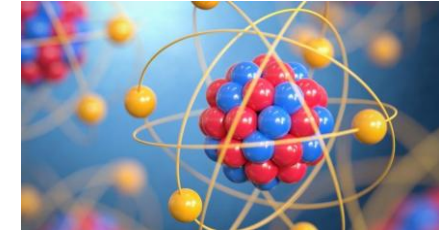


Rayos-X



Producción de radioisótopos

Ciclotrones o linacs
PET: Fluorine-18,
half life of 110 min



Esterilización de material médico

Proveedores de material
medico deben proporcionar
jeringuillas, vendajes...libres
de gérmenes

Suelen utilizarse haces de
electrones de baja energías



1938-Berkeley. Primer tumor irradiado con neutrones



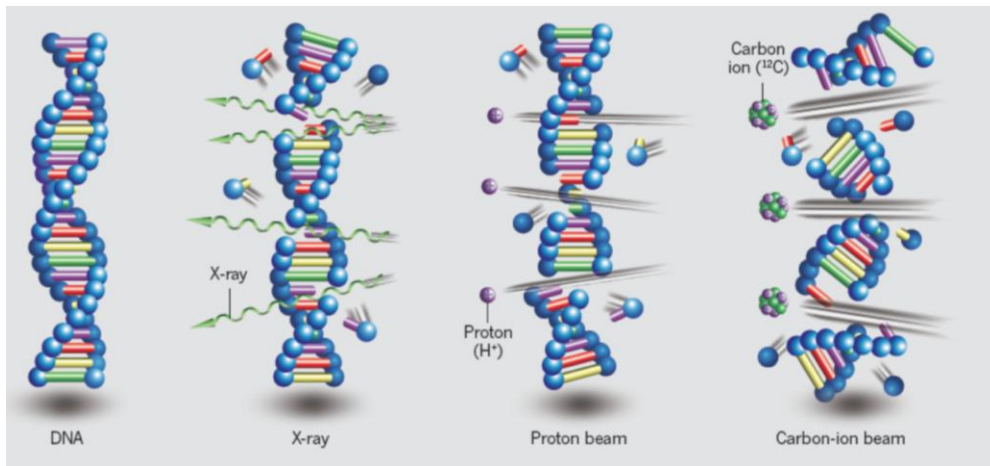
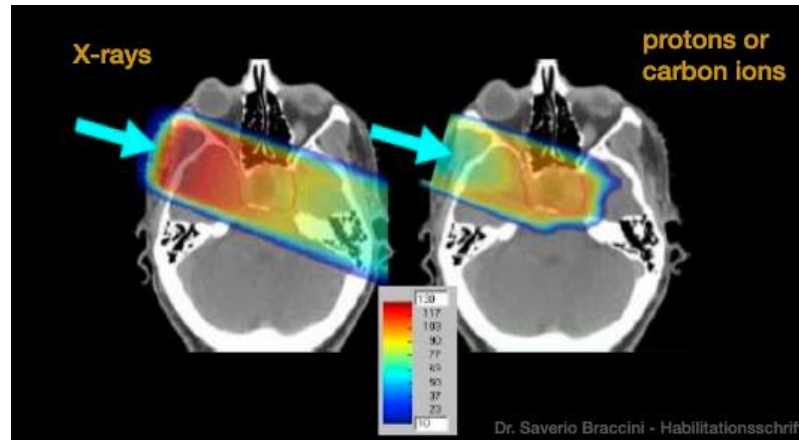
John Lawrence
watches Robert
Stone aligning a
patient in the
neutron beam
produced by the 60-
in. cyclotron
(Courtesy Lawrence
Berkeley National
Laboratory)

En 1948, Stone evaluó los efectos de la terapia con neutrones en 226 pacientes y concluyó: “La terapia con neutrones, tal como la hemos administrado, ha producido consecuencias tardías tan graves en proporción a los pocos buenos resultados, que no debería continuar usándose”

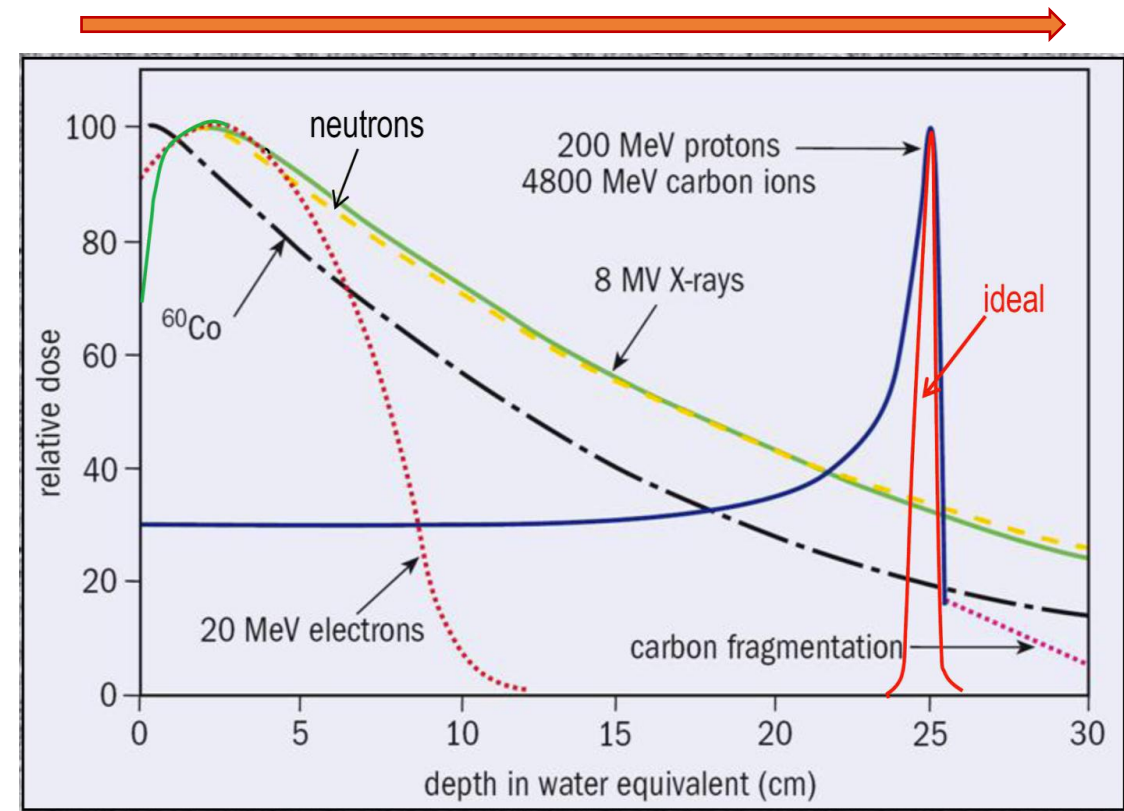
Aplicaciones en medicina: terapias contra el cáncer

El reto de utilizar radiaciones para curar el cáncer está en conseguir:

- ☐ Tratar el tumor
- ☐ Todo el tumor
- ☐ Y solo el tumor

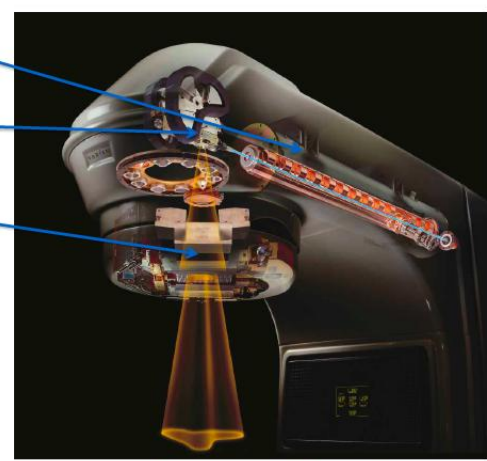
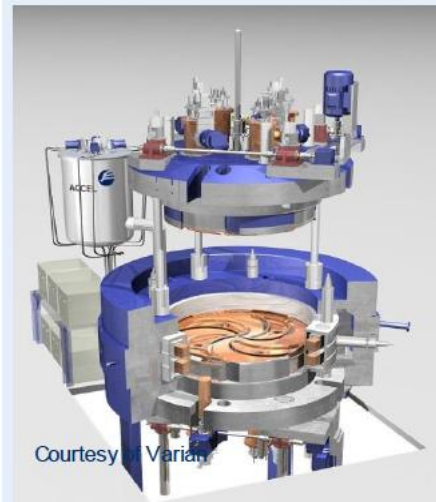
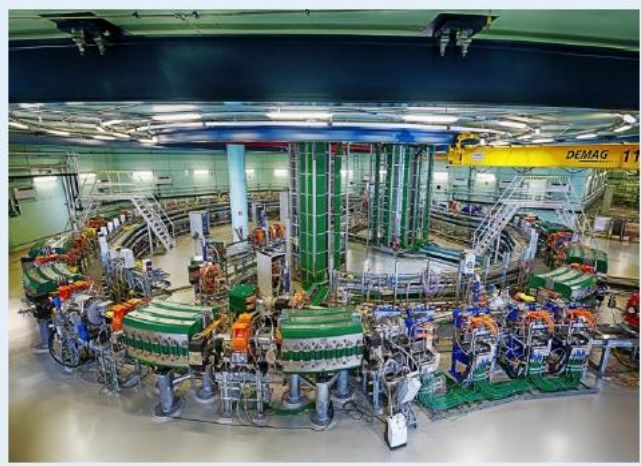


Haz penetrando la materia



Con rayos-X > 14000 en todo el mundo
Para protones en torno a 112 centros en Europa y creciendo
Para iones solo 4 centros en Europa

Tipos de aceleradores principales en medicina

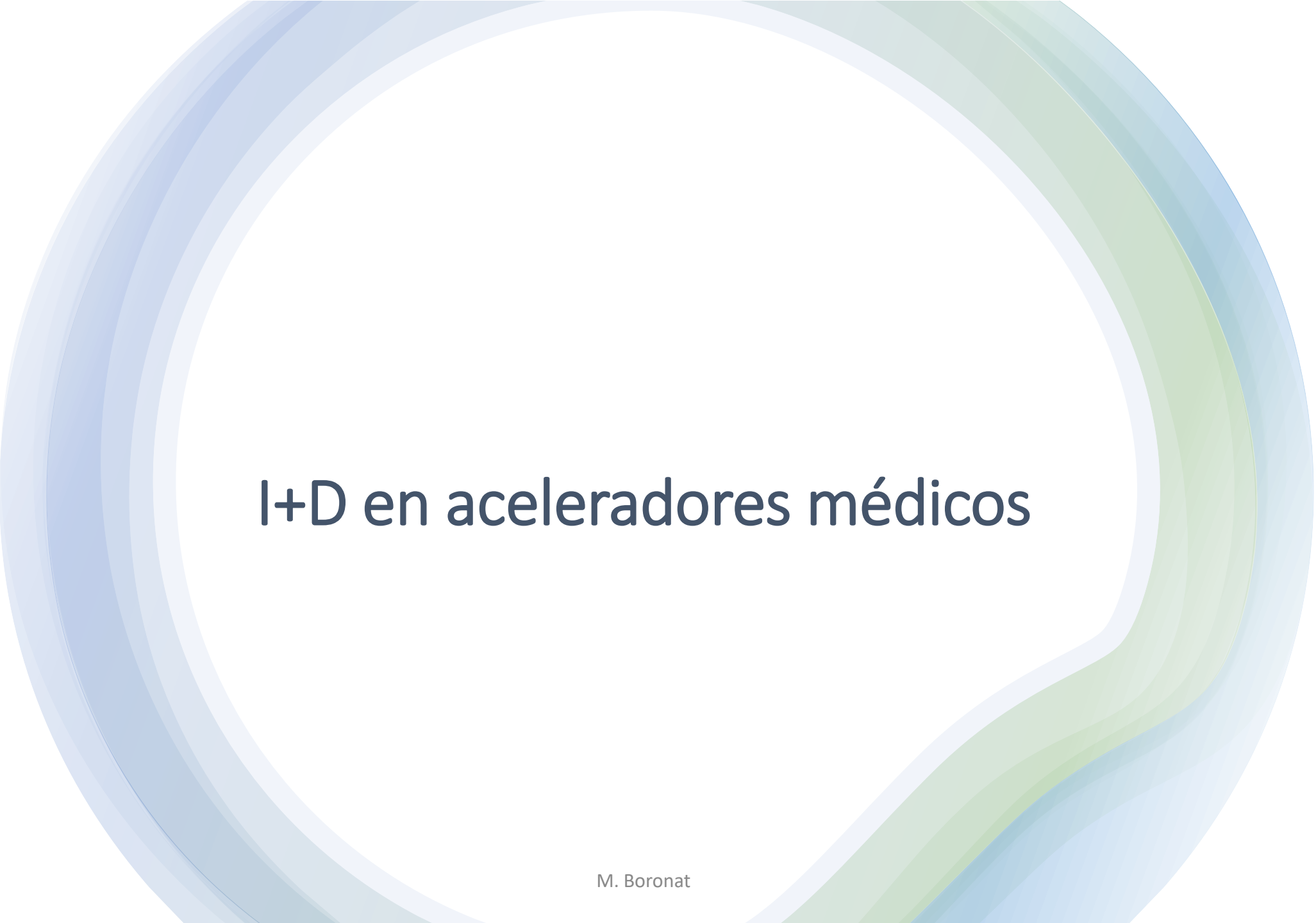
Tipo de acelerador	Acelerador lineal  Image: copyright Varian medical systems	Ciclotrón/sincrociclotrón  Courtesy Varian	Sincrotrón 
Uso	Imagen médica Terapias contra el cáncer	Radioisótopos Terapias contra el cáncer	Terapias contra el cáncer
Partículas	Electrones	Protones, iones	Protones e iones
Energías	4-20 MeV	11-230 MeV	70-430 MeV
#en el mundo	≈ 14300 ¡El acelerador de partículas más exitoso del mundo!	≈ 1500	≈ 89 protones ≈ 14 iones
≈ 16000			

Heidelberg Centro de terapia con iones (HIT)



Primera instalación de iones de carbono en Europa con "Gantry"
Primer paciente tratado en 2009

Uno de los retos más importantes que está abordando en la actualidad la comunidad de física de aceleradores para terapias con iones es el diseño y construcción de aceleradores más compactos y de menor coste



I+D en aceleradores médicos

Retos y áreas de I+D

Retos:

❑ Mejores prestaciones

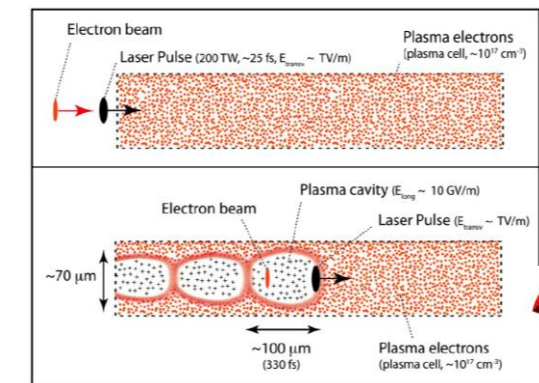
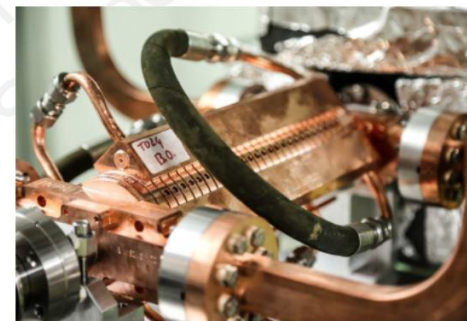
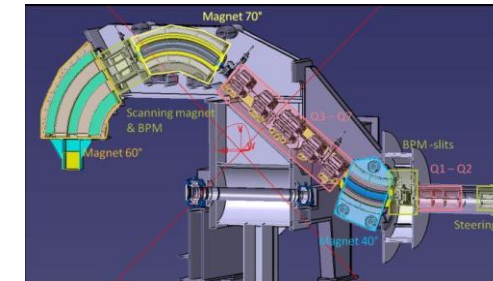
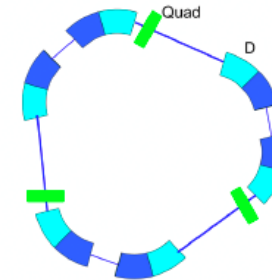
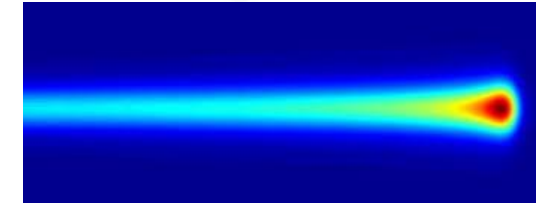
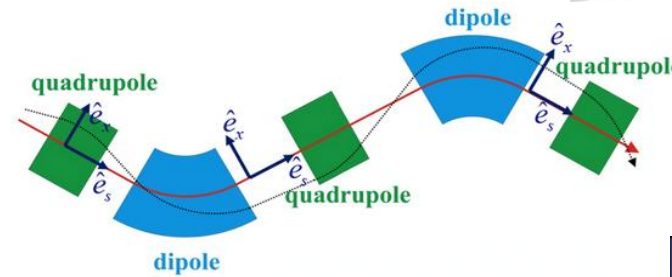
- ✓ Energías más altas, intensidades más altas, nano haces...
- ✓ Máquinas versátiles

❑ Reducir costes

- ✓ Máquinas más eficientes
- ✓ Máquinas más compactas

Área de I+D:

- ❑ El diseño/optimización de la “lattice” del acelerador
- ❑ Dinámica de haz (simulaciones, modelos, experimentos)
- ❑ I+D de nuevas tecnologías
 - ✓ Imanes
 - ✓ Cavidades aceleradoras de radiofrecuencia
 - ✓ Instrumentación de monitorización de haz
 - ✓ Fuentes de iones
 - ✓ Nuevas tecnologías de aceleración
- ❑ I+D de nuevas aplicaciones
- ❑ Operación de aceleradores



Grupo de física y tecnología de aceleradores de IFIC

AITANA

IFIC
INSTITUT DE FÍSICA
CORPUSCULAR



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

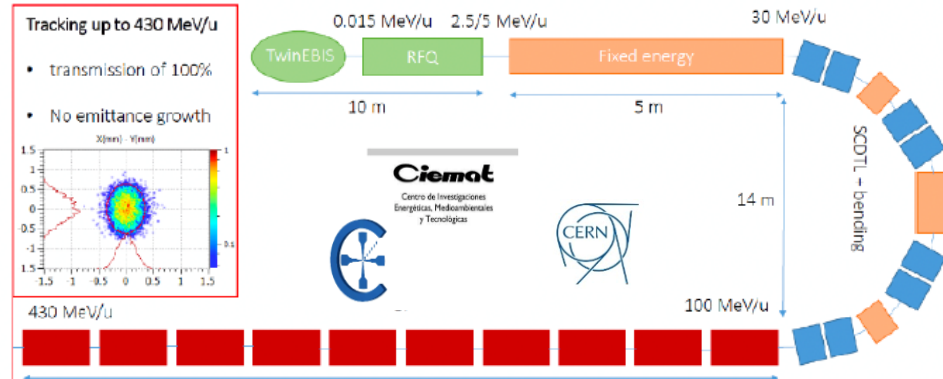


Desarrollo de nuevas tecnologías de aceleración

Estudios de dinámica de haz

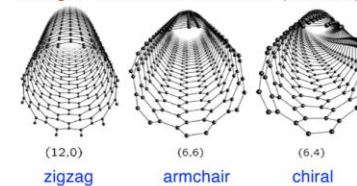
Desarrollo de instrumentación de haz

Desarrollo de aceleradores y nuevas técnicas para aplicaciones médicas



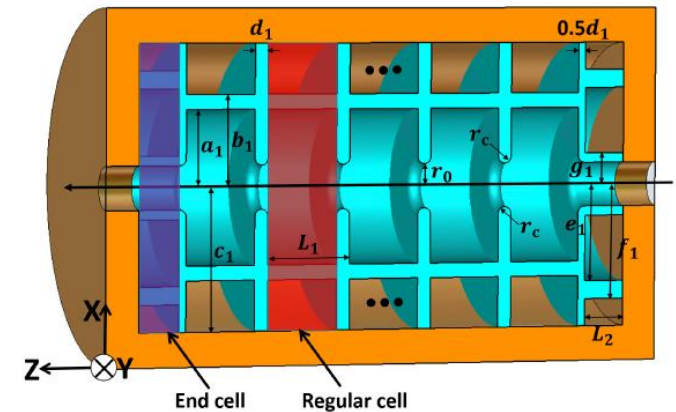
KEK

single-walled nanotubes (SWNT)



SWNT diameter – 0.3nm to 4nm

ICMUV
INSTITUT DE CIÈNCIA
DELS MATERIALS de la
Universitat de València



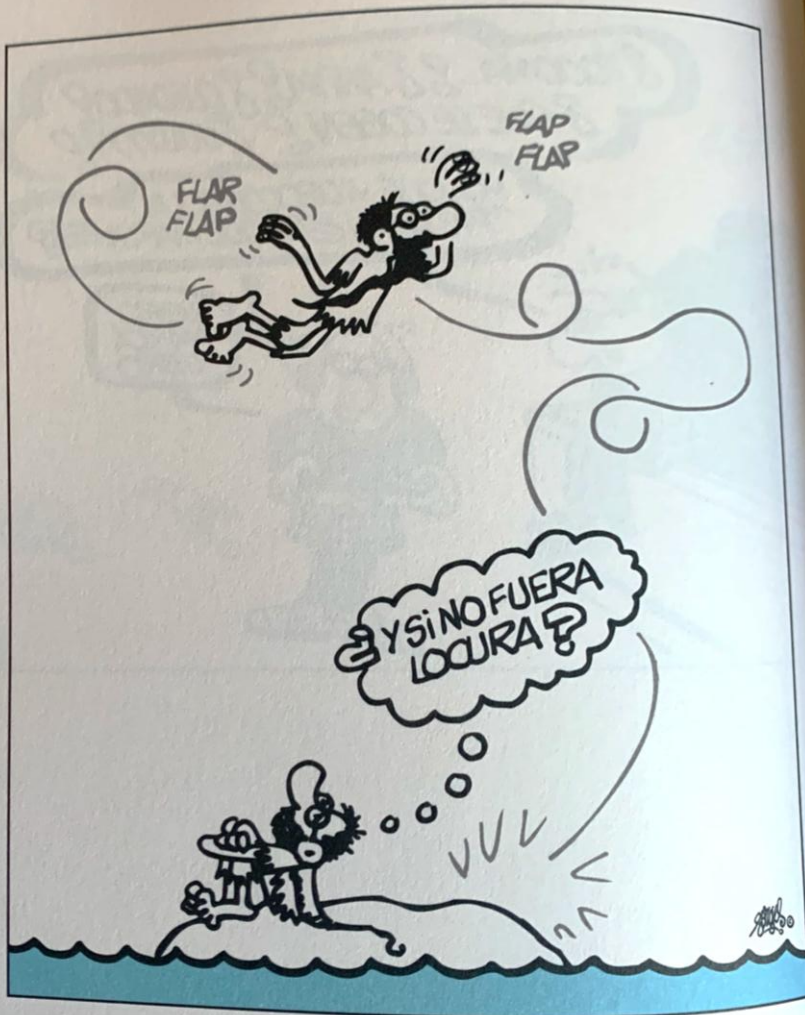
NOVAS group

¡Muchas gracias por vuestra atención!

boronat.arevalo@ific.uv.es

Ideas/transparencias/bibliografía:

Nuria Fuster (CSIC), Daniel Esperante (UV), Maurizio Vretenar (CERN), Mariusz Sapinski (SEEIIST), "Applications of particle accelerators in Europe" (EuCARD²), Javier Resta López (ICMUV), Juan Fuster (CSIC)



Tecnologías que nos permiten volar

