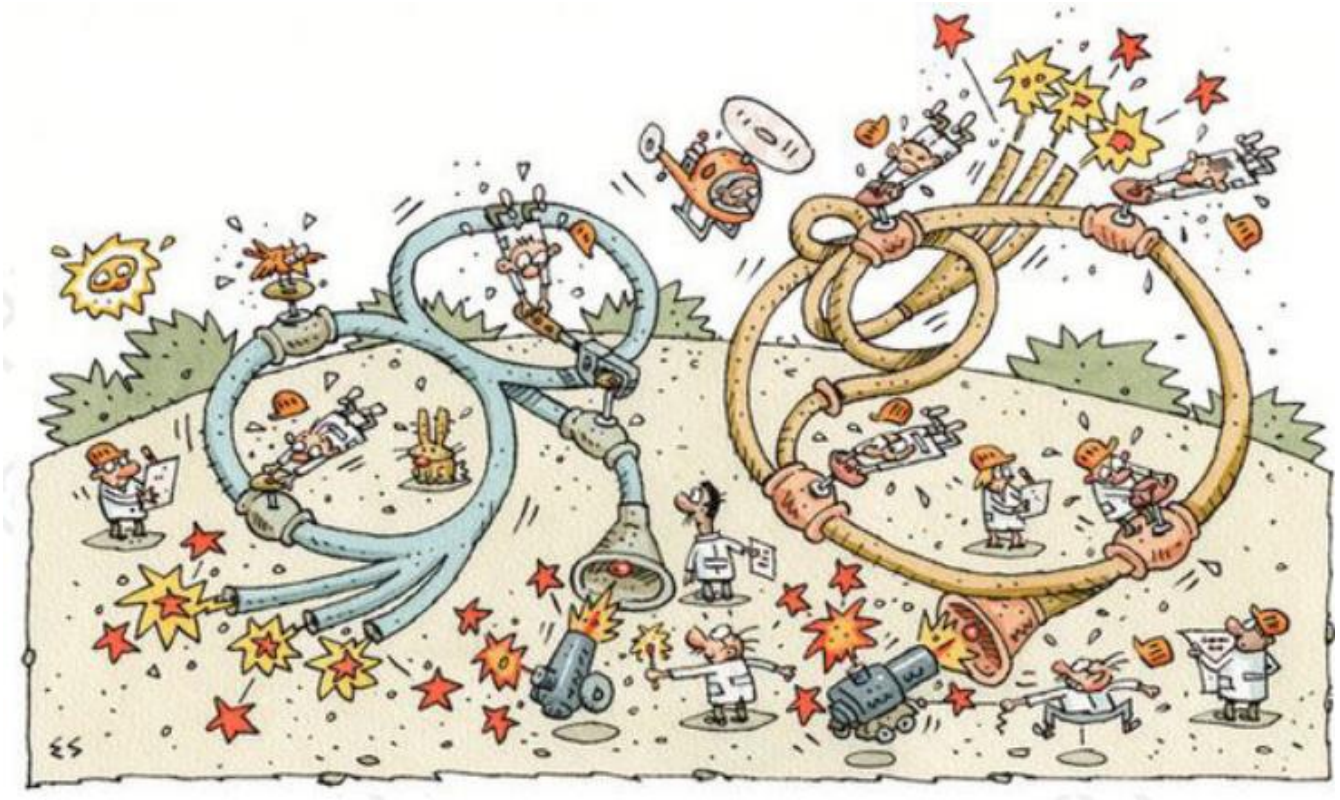
Aceleradores de partículas y sus aplicaciones

N. Fuster Martínez, IFIC-UV CSIC

IFIC Summer Student Programme, 22 de Julio 2025

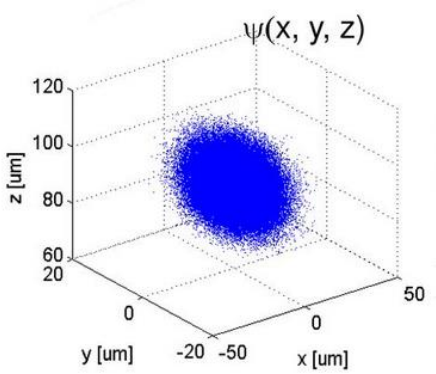
Contenido

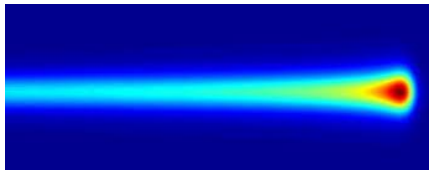
- ¿Qué es un acelerador de partículas? ¿Para qué sirve?
- Tecnologías principales
- Tipos de aceleradores
- Aplicaciones
- I+D en aceleradores médicos



¿Qué es un acelerador de partículas?

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

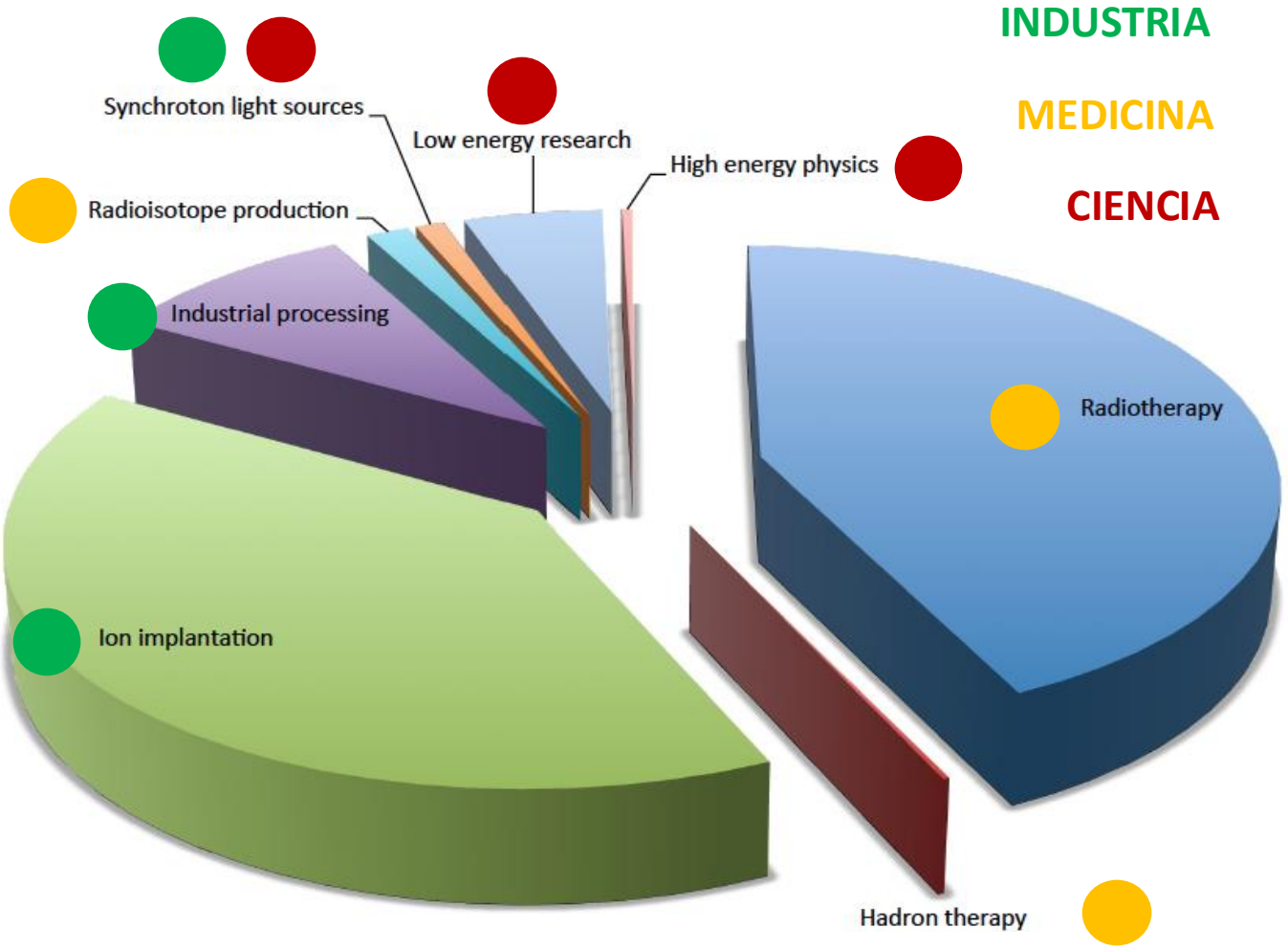




Principalmente caracterizado por:

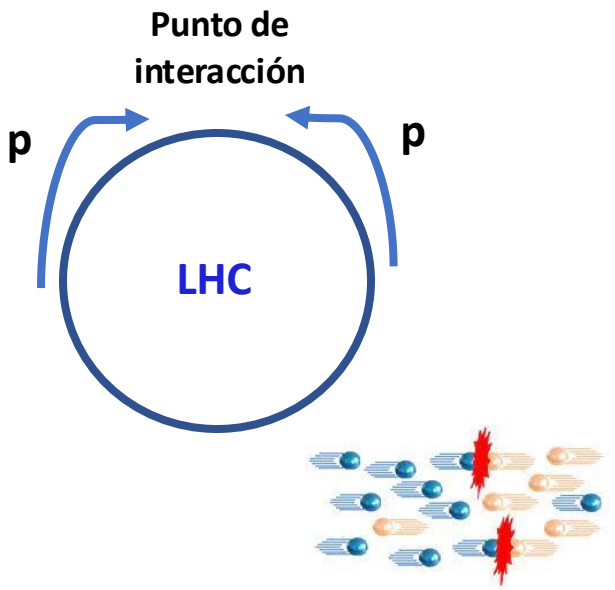
- Tipo de partícula (e, p, iones: $^{4}He^{2+}$, $^{12}C^{6+}$…), intensidad, tamaño transversal y longitudinal, energía y dispersión de energía

> 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

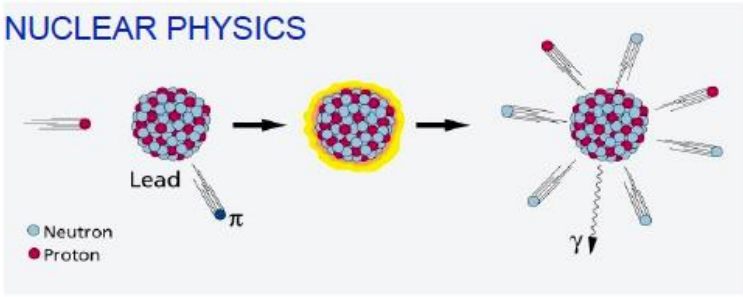
	Protón del LHC	**150 gr yogur**	**Tren de alta velocidad**
Energía	$1.1\ 10^{-6}$ J	$5\ 10^{5}$ J	$3.4\ 10^{8}$ J
Volumen	$2.1\ 10^{-45}$ m^3	$2.3\ 10^{-4}$ m^3	$1.2\ 10^{3}$ m^3
Densidad de energía	$5.1\ 10^{38}$ J/m^3	$2.2\ 10^{9}$ J/m^3	$2.7\ 10^{5}$ J/m^3
Tipo de energía	Energía cinética Escala subatómicas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

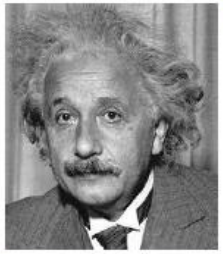
Gracias a Maurizio Vetrenar (CERN)

¿Qué podemos hacer con un haz de partículas?

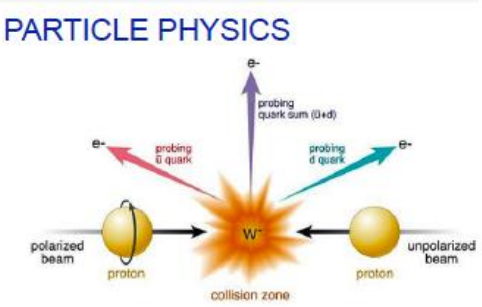
Podemos acceder al mundo sub-atómico

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

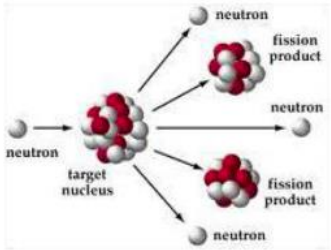


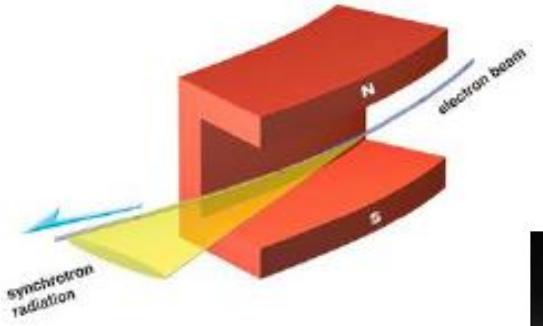


$E = m c^2$

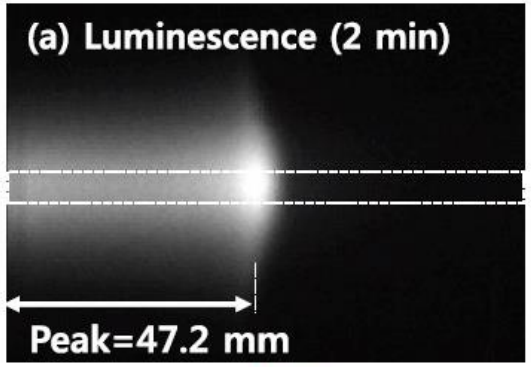


- Estudiar los constituyentes fundamentales de la naturaleza y las fuerzas que actúan sobre ellos





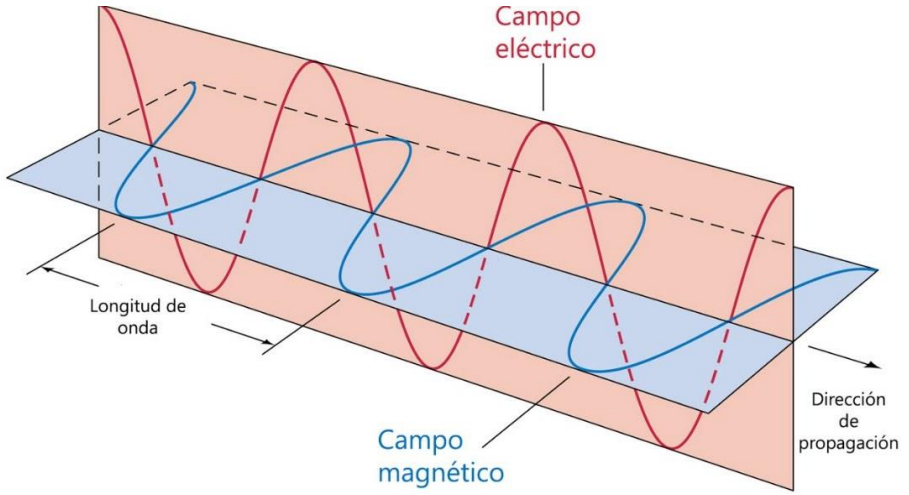
- Podemos generar haces secundarios de **rayos-X y neutrones**
  - ✓ Uso en multitud de técnicas de imagen avanzada



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

¿Cómo funciona un acelerador de partículas?

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

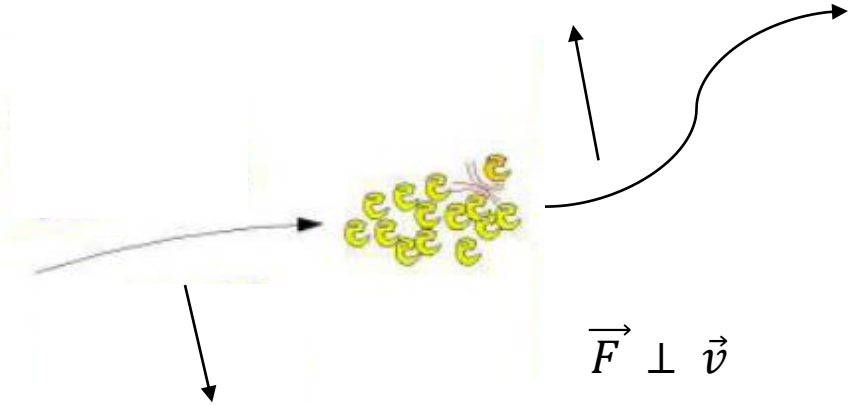


Las dos principales funciones de un acelerador son:

- ❑ Incrementar la energía de las partículas

$\vec{F} \parallel \vec{v}$

- ❑ Controlar la trayectoria de las partículas y mantenerlas agrupadas



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

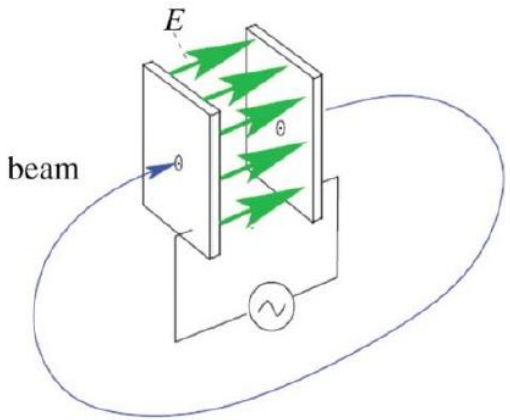
Fuerza de Lorentz

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

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

¿ Y para cambiar la trayectoria de las partículas ? $\vec{F} \perp \vec{v}$

CAMPOS ELÉCTRICOS: ACELERACIÓN



CAMPOS MAGNÉTICOS GUIADO DE TRAYECTORIA Y FOCALIZACIÓN

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

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

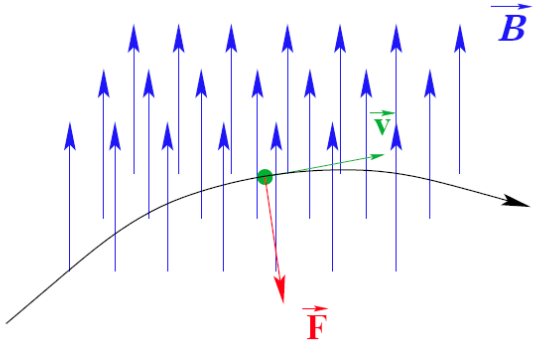
β~0.99: $|\vec{F}_m| \sim 297\,|\vec{F}_e|$

β~0.5: $|\vec{F}_m| \sim 150\,|\vec{F}_e|$

β~0.005: $|\vec{F}_m| \sim 1.5\,|\vec{F}_e|$

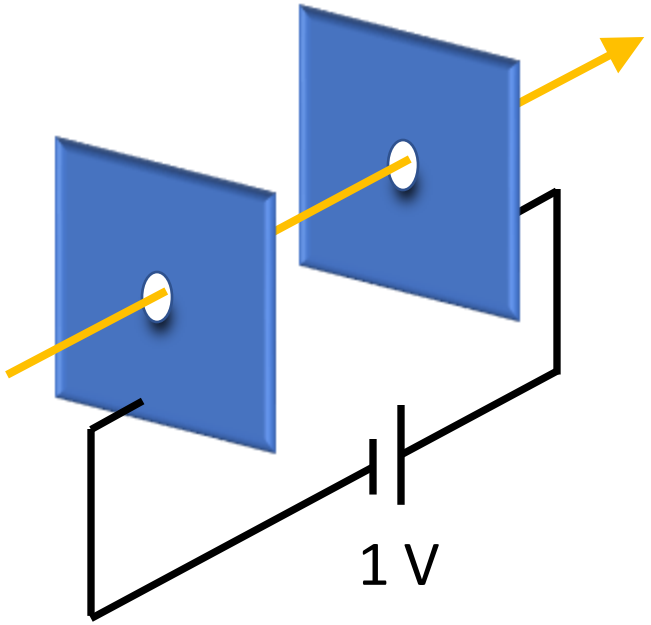
$|B| = 1$ T

$|E| = 1$ MV/m



Unidades de energía

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



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

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

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

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

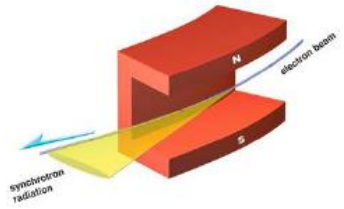
$1\ TeV = 10^{12}\ eV$

Seguridad (~300 KeV)

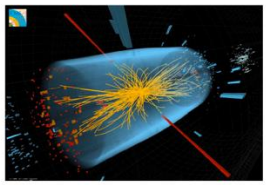
Industria (~KeV-70 MeV/n)

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 estás 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

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

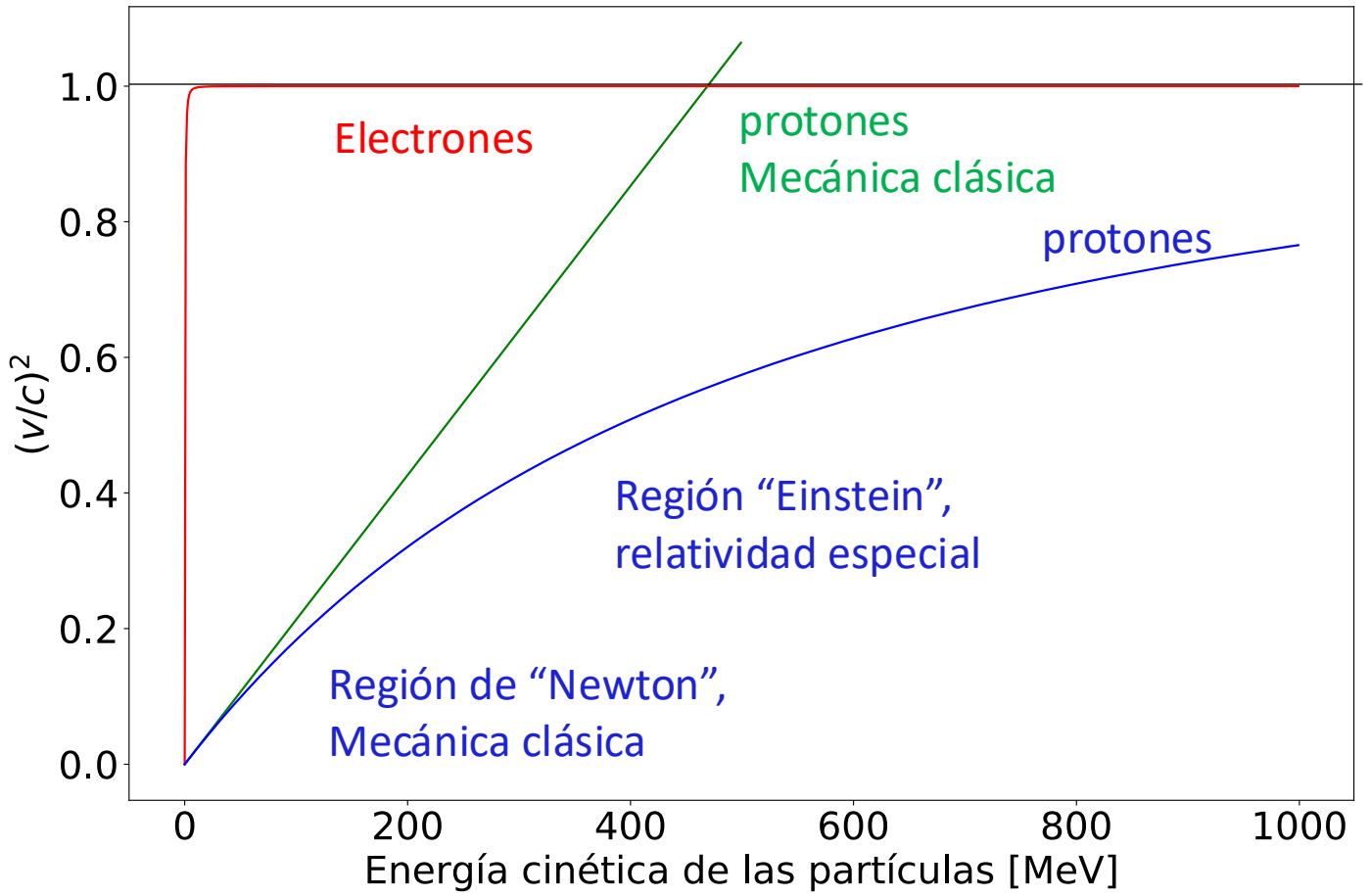
Relatividad especial

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

Protones con **5x10^5 KeV** (β = 0.75)

Electrones con **5x10^2 KeV** (β = 0.86)

$$\textbf{\textit{Factor relativista}}\ \beta = \frac{v}{c}$$



Tecnologías principales

Fuente de partículas

Tecnologías de aceleración

Imanes

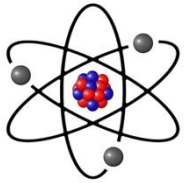
…

A grandes rasgos un acelerador esta formado por…

Sistemas a través de los que circulan las partículas
Tubos de vacío

Sistemas de protección
Colimadores

Sistemas que generan las partículas
Fuente



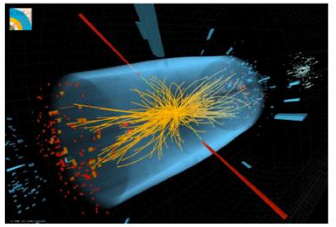
Sistemas que aceleran partículas:
Fuentes de campo eléctrico

$\vec{E}$

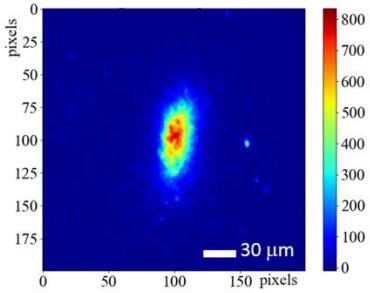
Sistemas que guían, focalizan y corrigen la trayectoria de las partículas:
Imanes

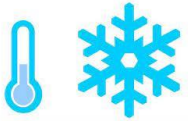
$\vec{B}$

Objetivo/usuario (Detector, material, paciente…)



Sistemas que miden las características de las partículas
Detectores de posición, de corriente, de pérdidas…



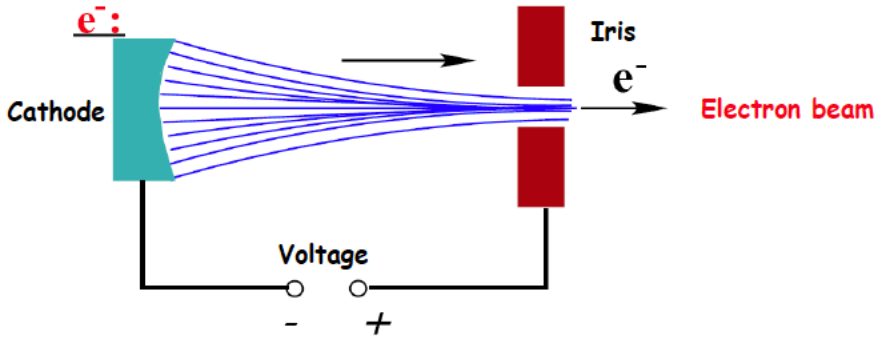


Sistemas de refrigeración, de control, de sincronización, ordenadores…

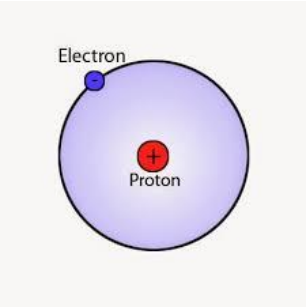
Fuentes de partículas

Aquí es donde empieza todo…

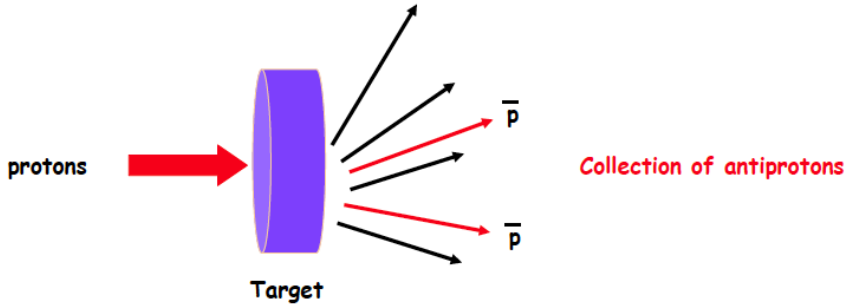
Electrones

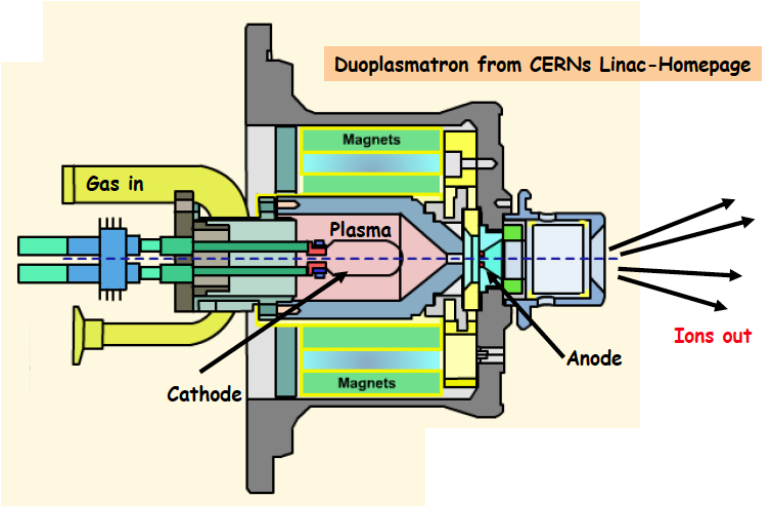


Protones, iones…



Antiprotones, positrones





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

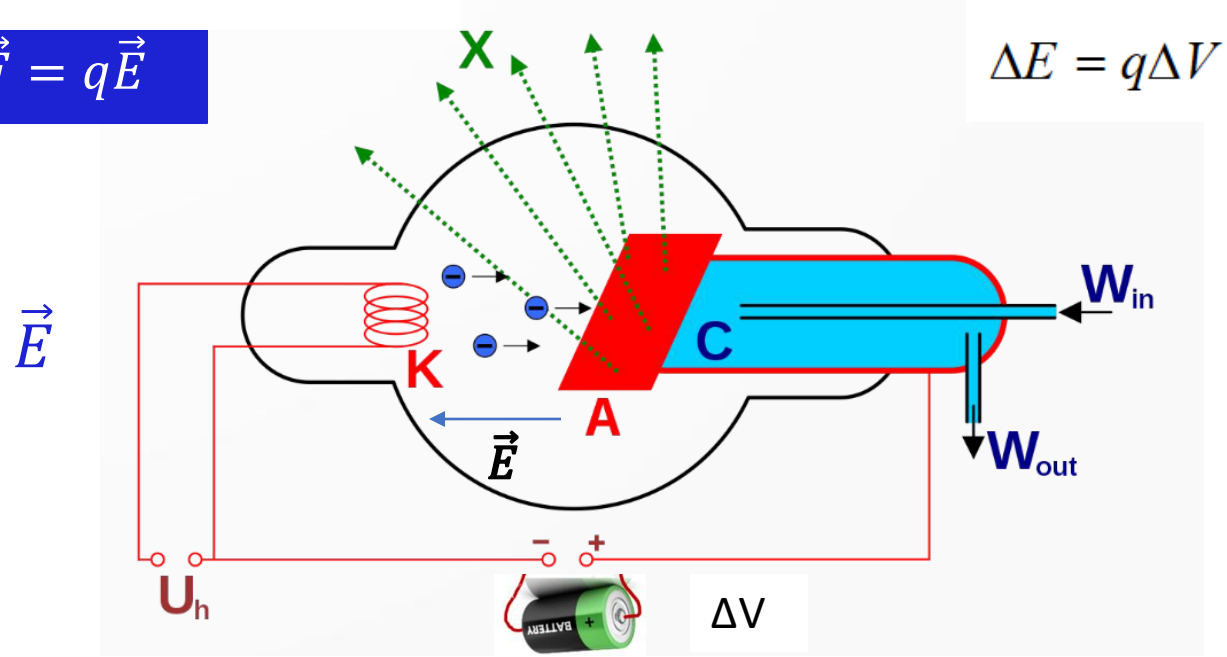
Fuentes de campo eléctrico: corriente continua

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

Bertha Röntgen's Hand 8 Nov, 1895

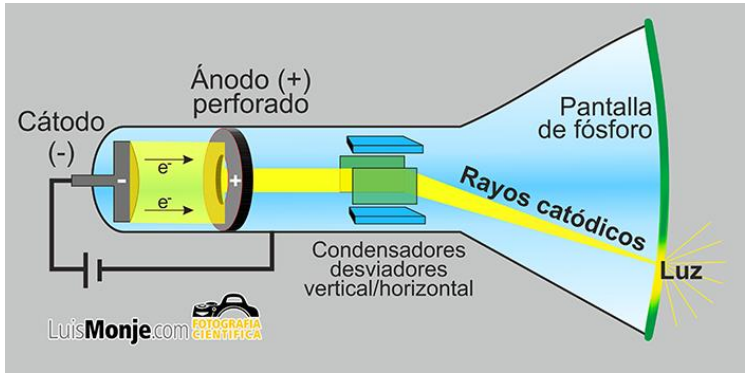
$$\vec{F} = q\vec{E}$$

$$\Delta E = q\Delta V$$



Tubos de rayos catódicos

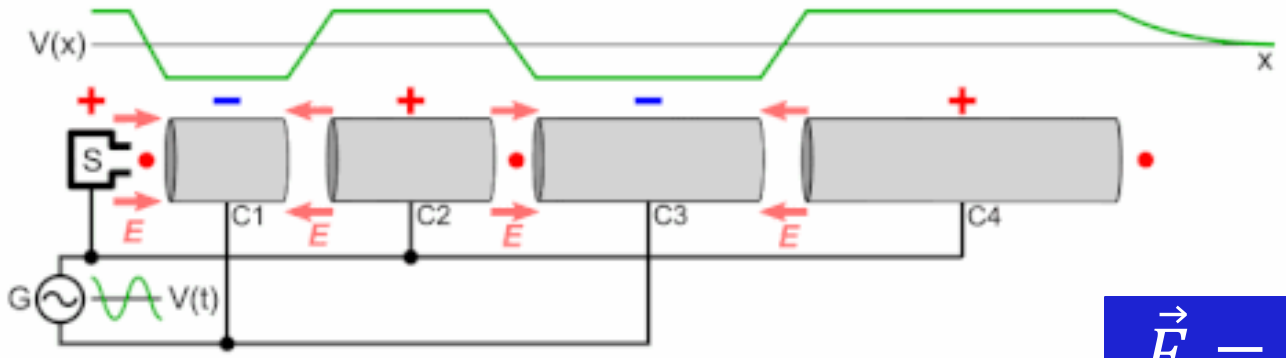
Primer televisor con tubos de rayos catódicos (1934) extensivamente utilizado hasta ~2010



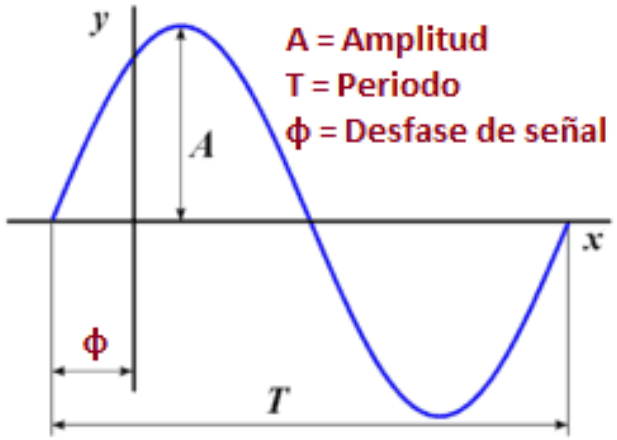
Fuentes de campo eléctrico: corriente alterna

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 conforme aumentamos la energía de las partículas

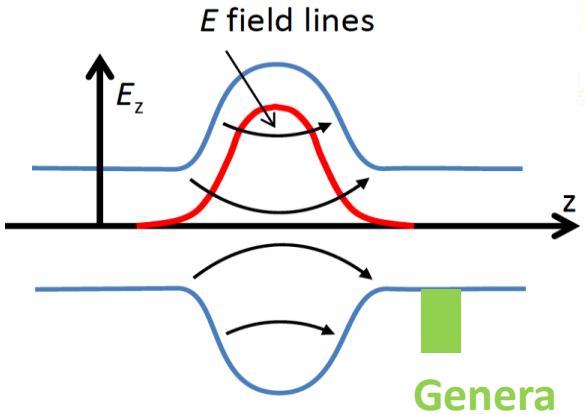
$$l_i = \frac{v_i T_{RF}}{2} = \frac{v_i}{2f_{RF}}$$

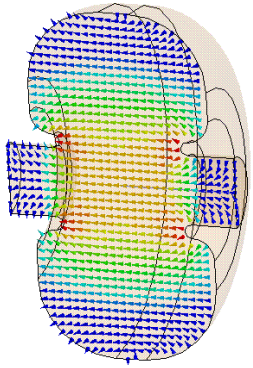
Fuentes de campo eléctrico: cavidades resonantes de RF

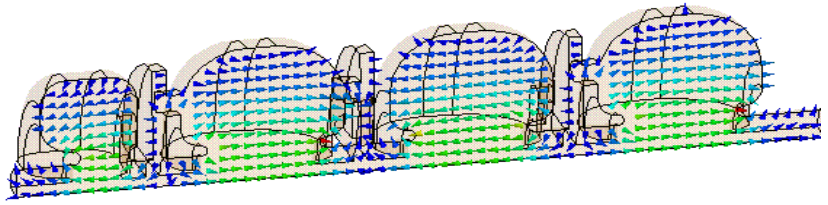
Desarrolladas en los **años ~1950**

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
- Este tecnología nos permite alcanzar más altos gradientes de aceleración y por tanto aceleradores más compactos



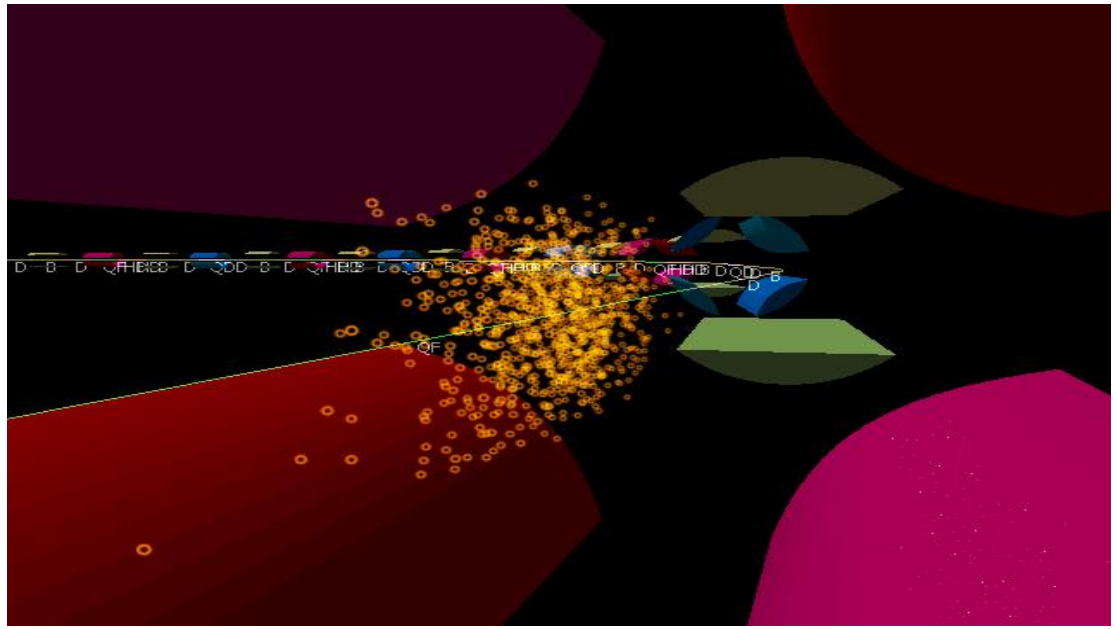




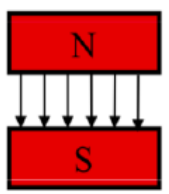
Fuentes de campo magnético: imanes

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

Simulation by Stephen Brooks (Brookhaven National Laboratory)



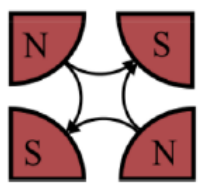
dipole



$n = 1$

Curvar la trayectoria en un plano

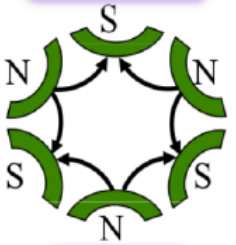
quadrupole



$n = 2$

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

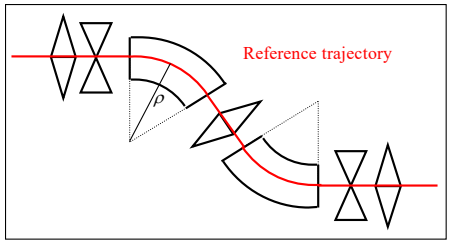
...

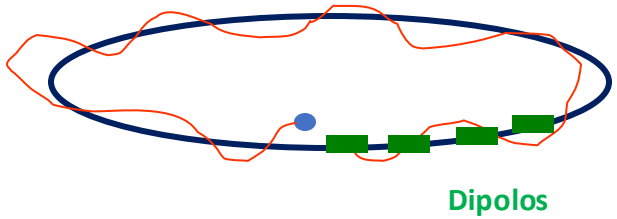
n > 3

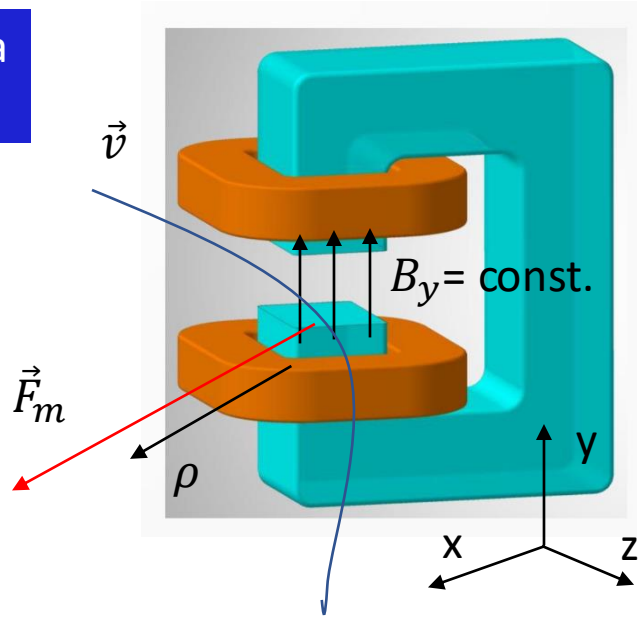
Correcciones de orden superior

Dipolos

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



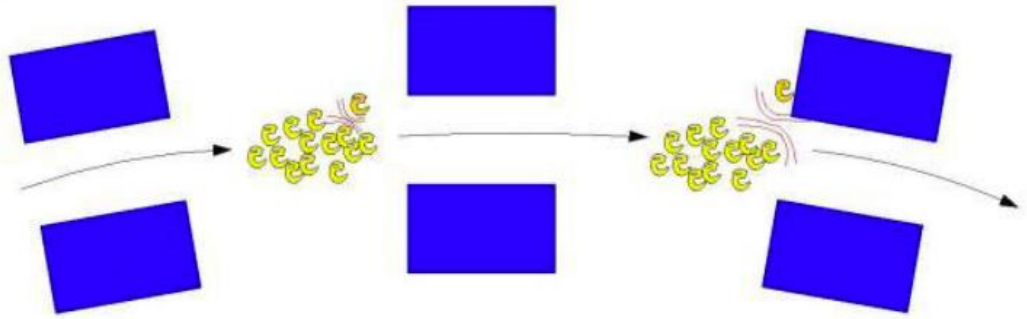




Igualando la **fuerza magnética** a la **fuerza centrípeta**

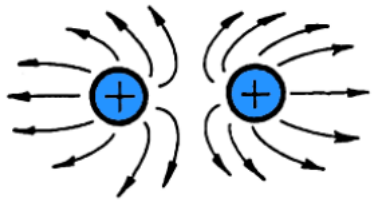
$$B\rho = \frac{p}{q}$$

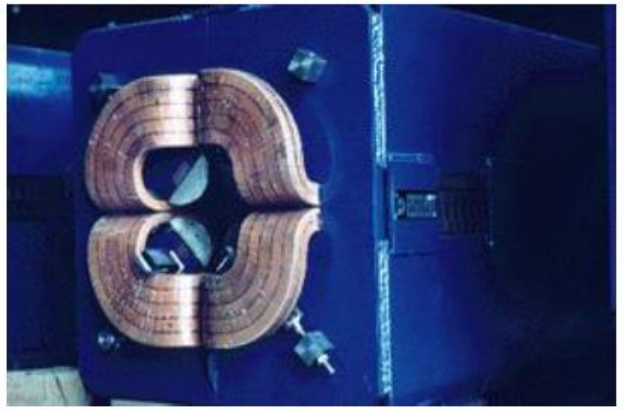
"Bρ" se define como la **rigidez magnética** del haz de partículas

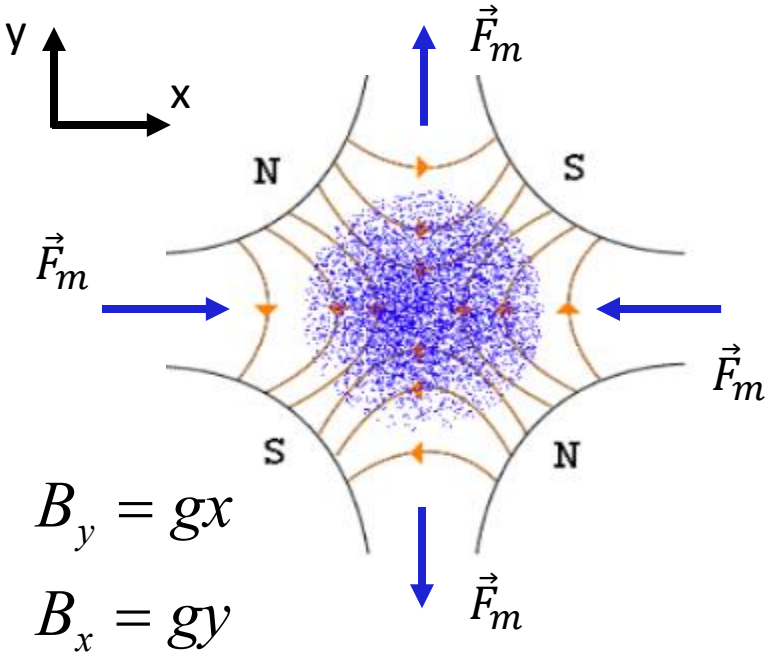


Cuadrupolos

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







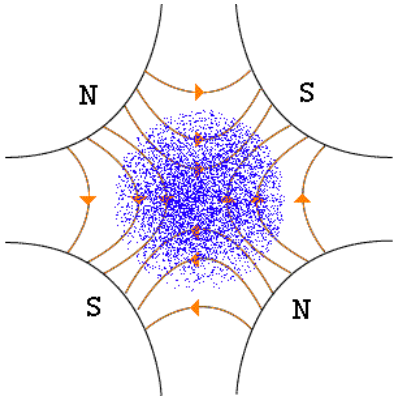
"Strong focusing" (1952) o enfoque de gradiente alterno

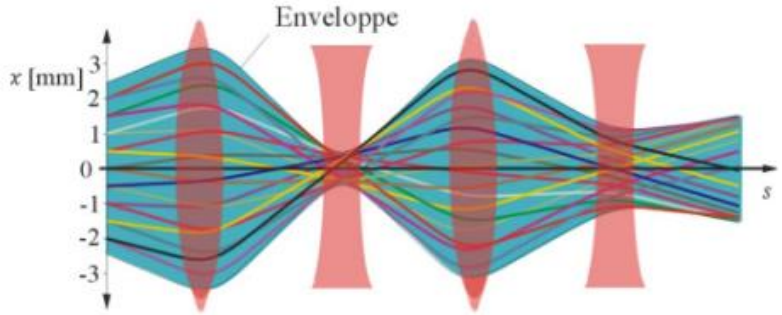
Consiste en añadir un cuadrupolo por plano (x, y) cada pocos dipolos

La envolvente del haz oscila pero las partículas se mantienen confinadas

$$B_y = gx$$

$$B_x = gy$$



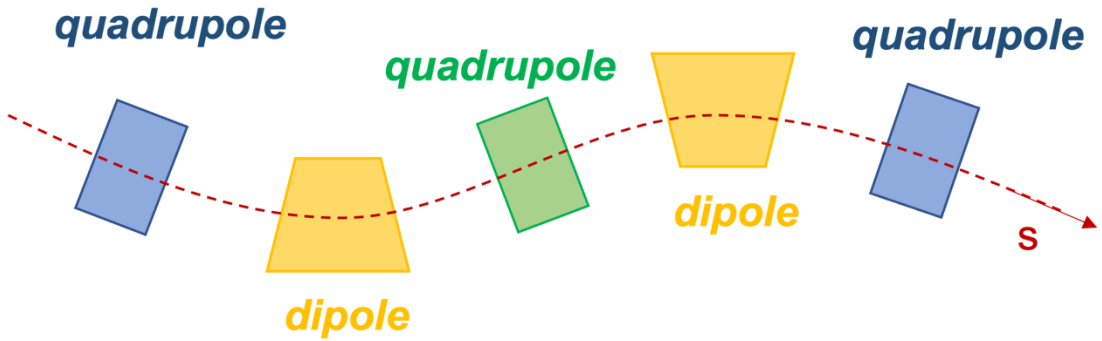


Ha permitido obtener tamaños de haces más pequeños y controlados y por tanto también tubos de vacío más pequeños

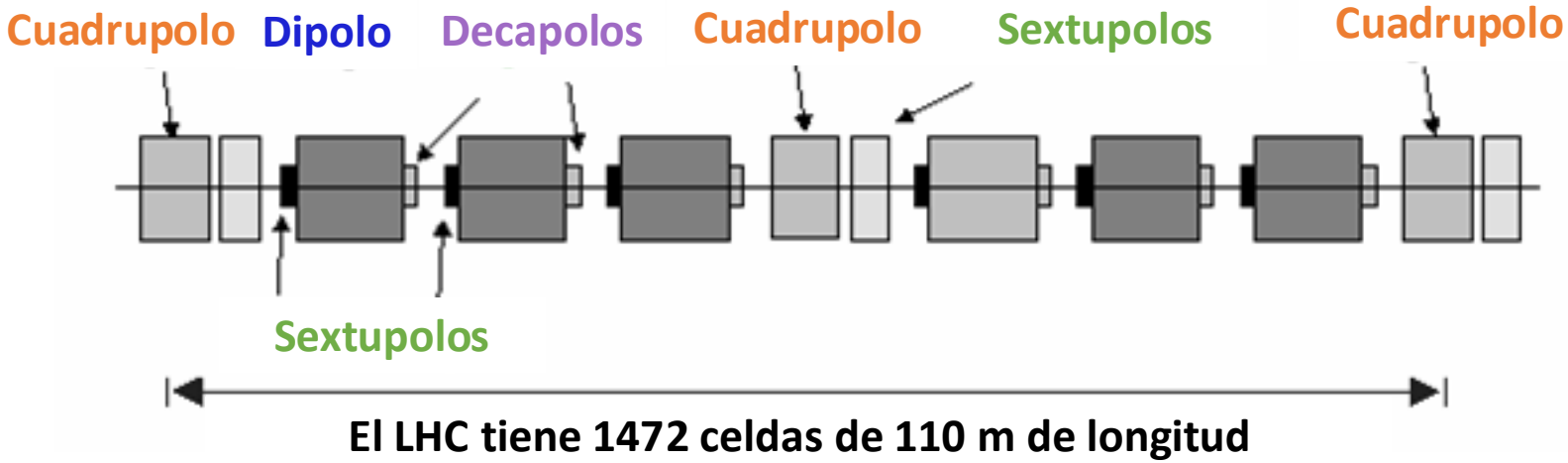
La “lattice” de un acelerador

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



El LHC tiene 1472 celdas de 110 m de longitud

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

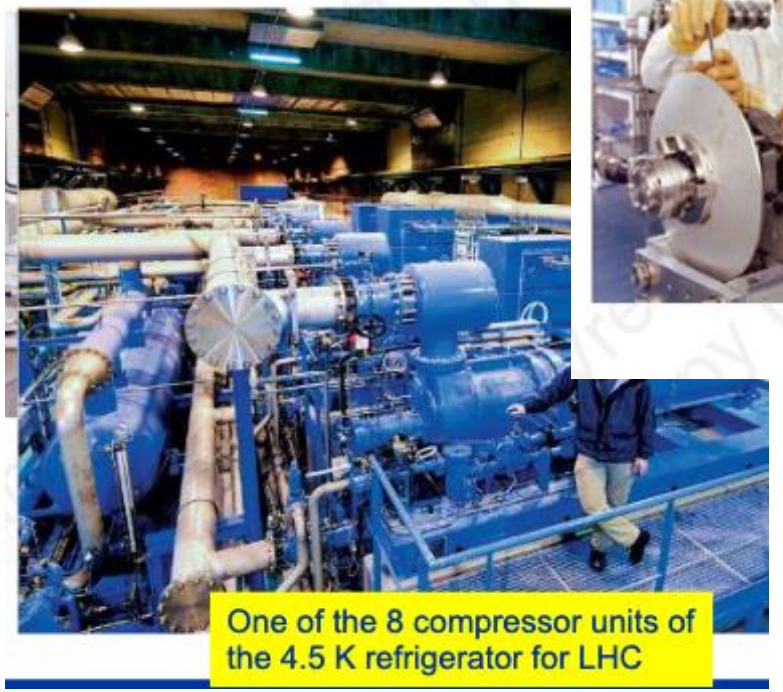
Nos permite construir **imanes** que pueden soportar corrientes eléctricas y campos electromagnéticos más altos y **cavidades aceleradoras de RF** que no disipan potencia y por tanto son más eficientes

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

Clean room assembly of superconducting RF cavities

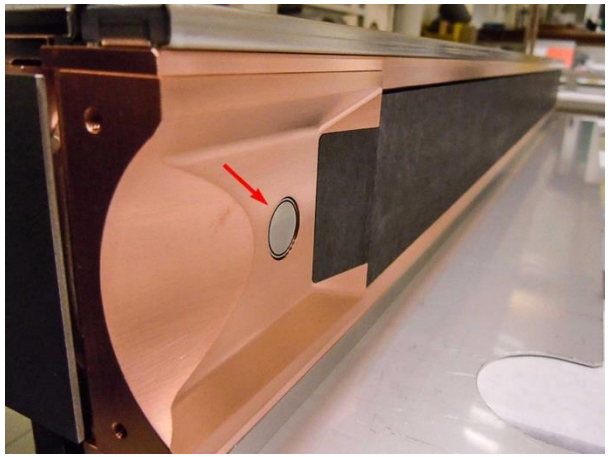

One of the 8 compressor units of the 4.5 K refrigerator for LHC

Y mucho más…

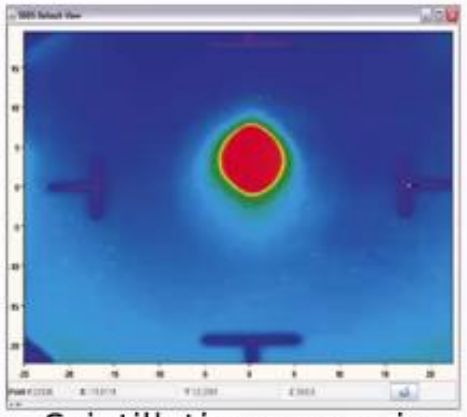
Sistemas de colimación y protección

Sistemas de almacenamiento de datos

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



Sistemas de alta potencia



Scintillating screen in LHC: first turn diagnostic

Sistemas eléctricos

…

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

Sistemas de control y sincronización, ordenadores

Tipos de Aceleradores

Electrostáticos

Lineales

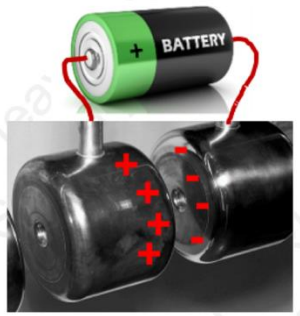
Circulares (ciclotrones y sincrotrones)

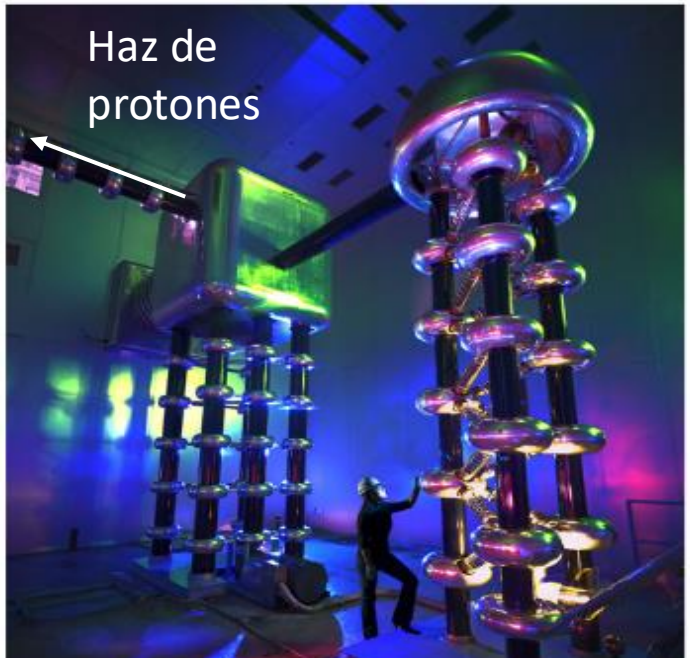
Aceleradores electrostáticos

1875/1895

William Crookes y Wilhelm Conrad Röntgen

Tubos de rayos catódicos



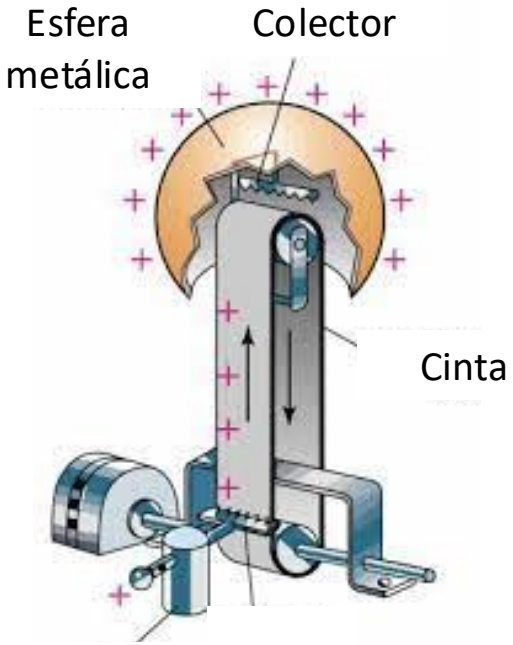


750 kV Cockroft-Walton generator at Fermilab (Proton source)

~ 1930

Cockcroft-Walton

Van der Graaff

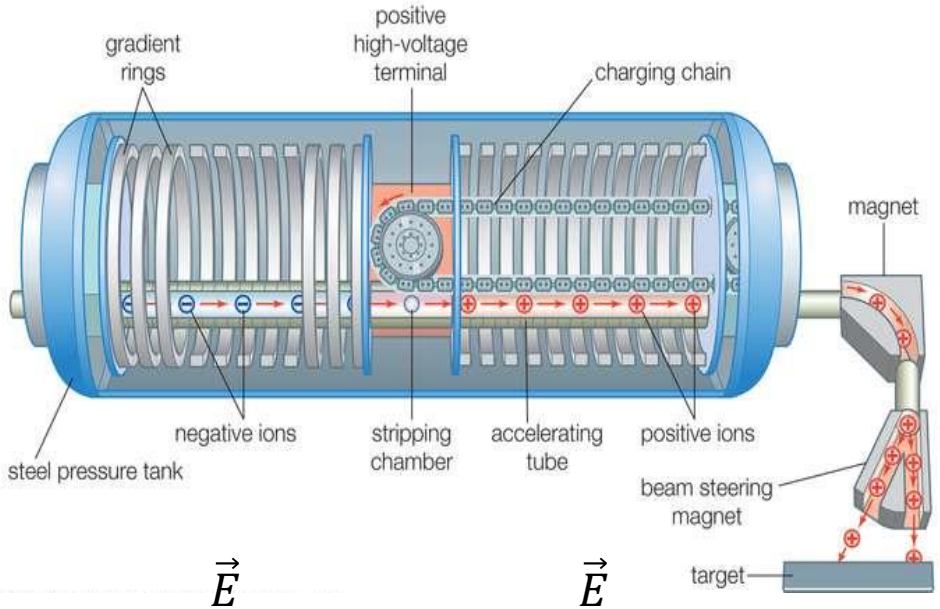


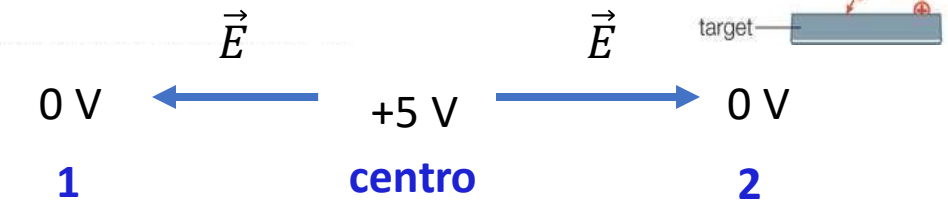
~ 1950

Tandem

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

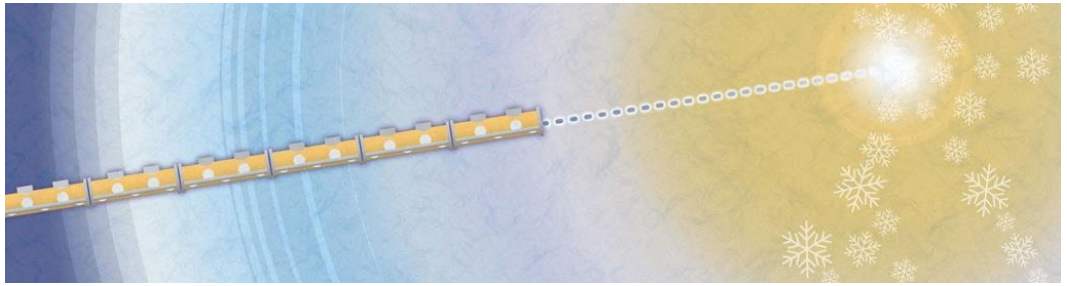
Limitados ~30MV





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)

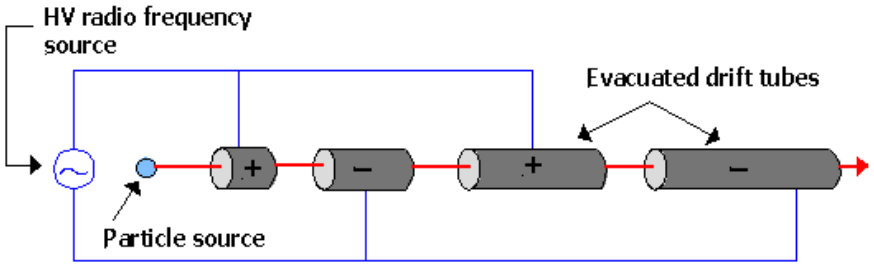


1924-1927

Gustav Ising y Rolf Wideroe

Tubos de deriva

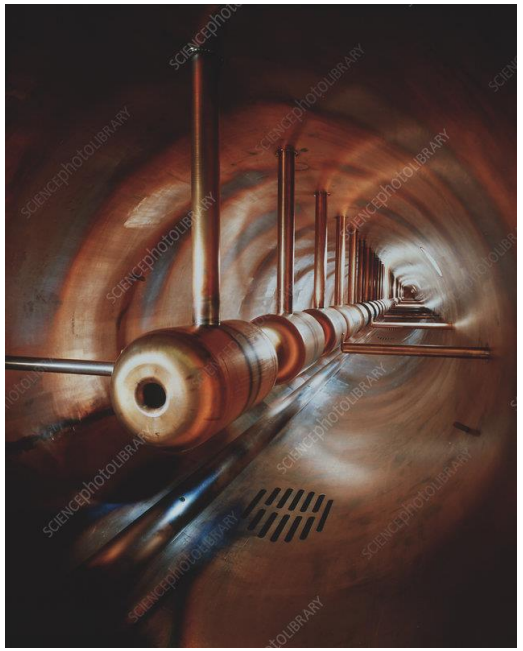
(β <0.02)



1946

Luís Álvarez

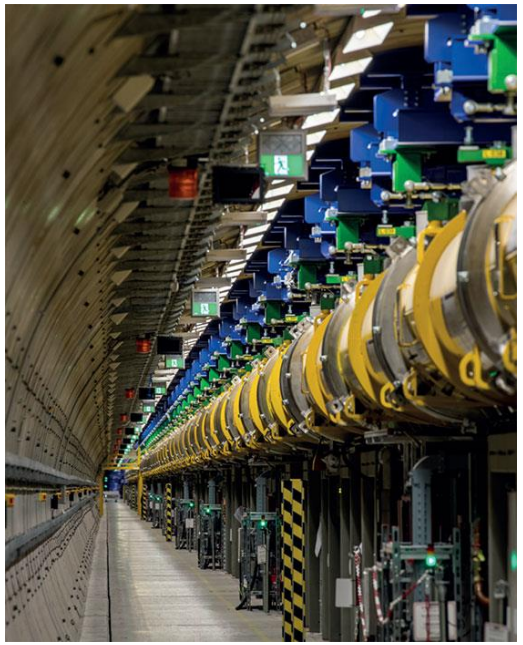
(0.02<< β <0.4)



~1950

Cavidades resonantes de alta frecuencia

(β>0.5)



“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

(XFEL), DESY, Hamburgo, Alemania

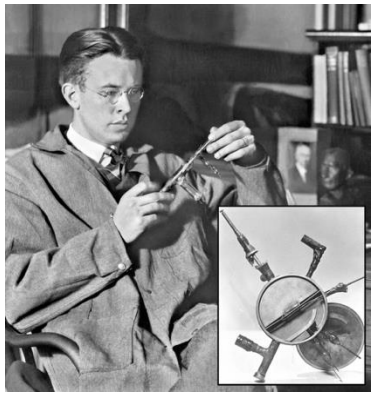
Aceleradores circulares

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

$$f_r = f_{RF}$$

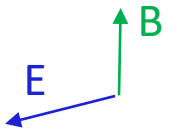
1946

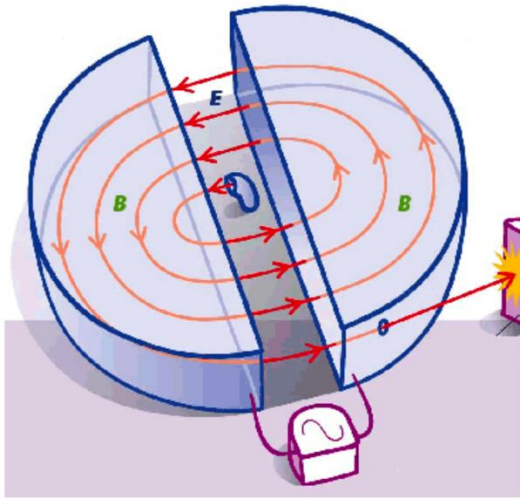
E. O. Lawrence

Sincrociclotrón

Límite ~700 MeV

f_{RF} **varible**





Límite para protones ~ 200 MeV

(efectos relativistas)

~1959

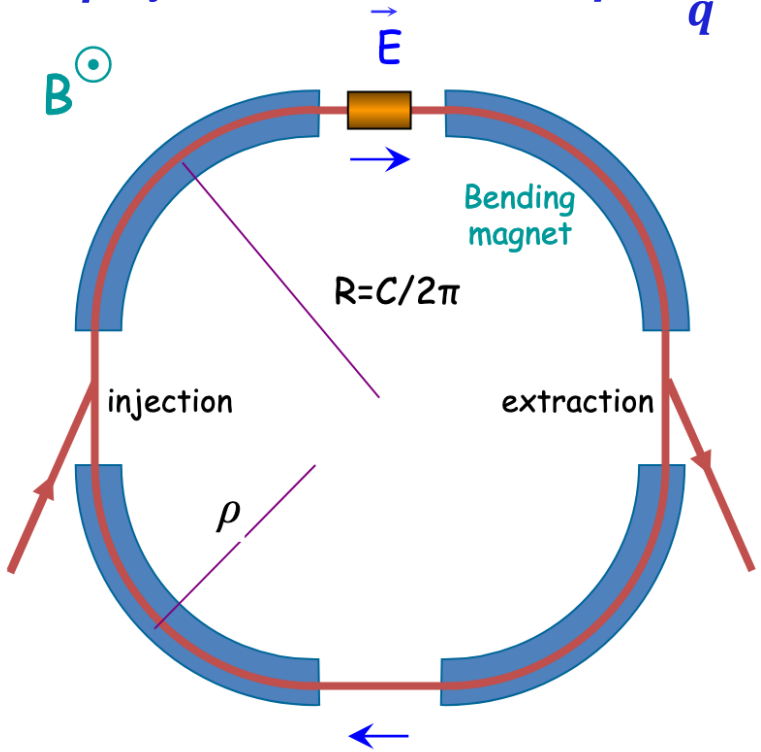
Sincrotrón

Propuesto por M. Oliphant (1943)

CERN-PS y el BNL-AGS

B variable, ρ fijo

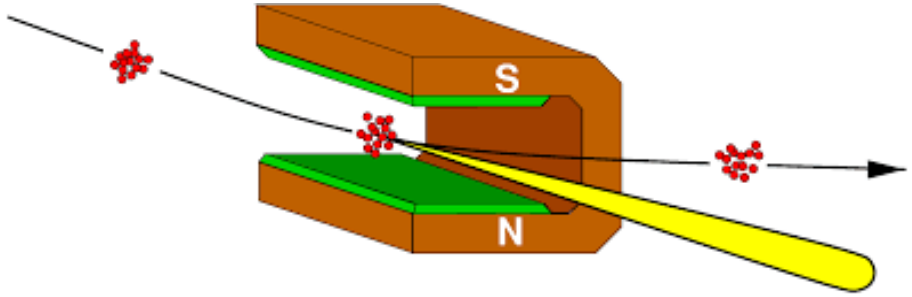
$$B\rho = \frac{p}{q}$$



Si v < c f_{RF} **variable**

Si v≈c (régimen ultra relativista) $f_s = f_{RF}$= **cte**

Con el invento del sincrotrón se descubrió la radiación sincrotrón



Energía perdida por radiación sincrotrón por vuelta

$$\Delta E = \frac{e^2}{3\varepsilon_0 \left(m_0 c^2\right)^4} \frac{E^4}{\rho}$$

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

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

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

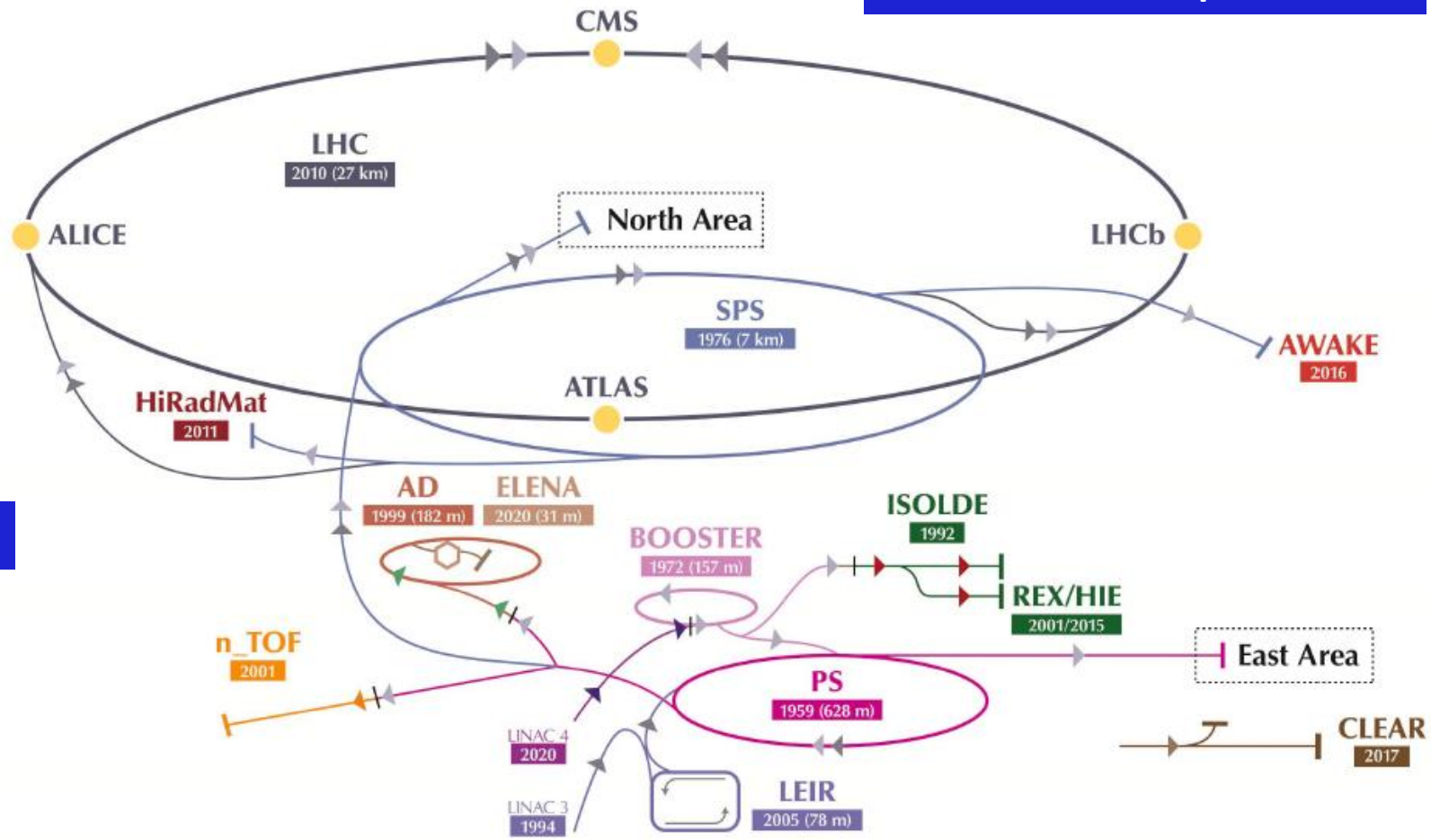
Circunferencia de 27 Km

Basado en **tecnología superconductora** una temperatura de -271.1 °C (1.9 K)

El LHC tiene 9593 imanes !!
1232 dipolos
392 cuadrupolos

La cadena de aceleradores del CERN…

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



Aplicaciones

Ciencia

Cultura y arte

Industria

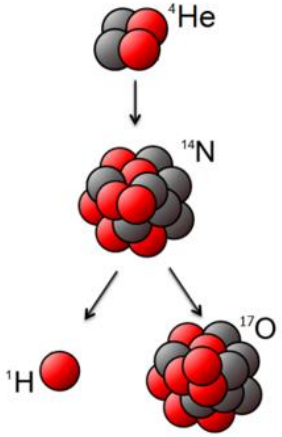
Medicina

Application of particle accelerators in Europe
http://apae.ific.uv.es/apae/wp-content/uploads/2015/04/EuCARD_Applications-of-Accelerators-2017.pdf

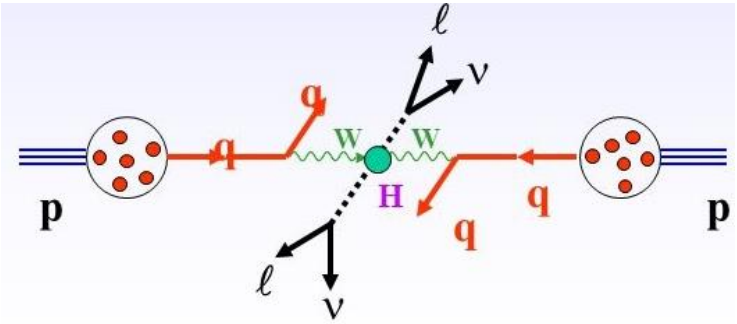
Aplicaciones en ciencia

e-,p, iones, γ, n (~ keV hasta TeV)

Física Nuclear

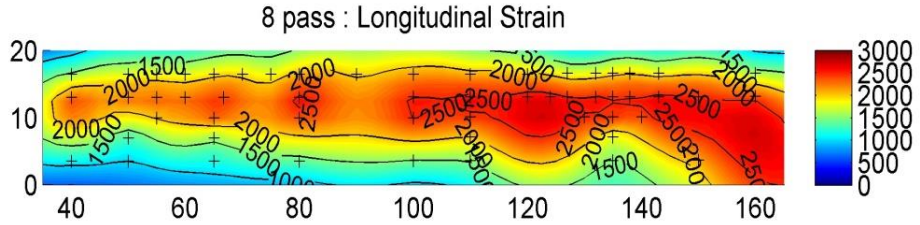


Física de Partículas



Ciencia de materiales

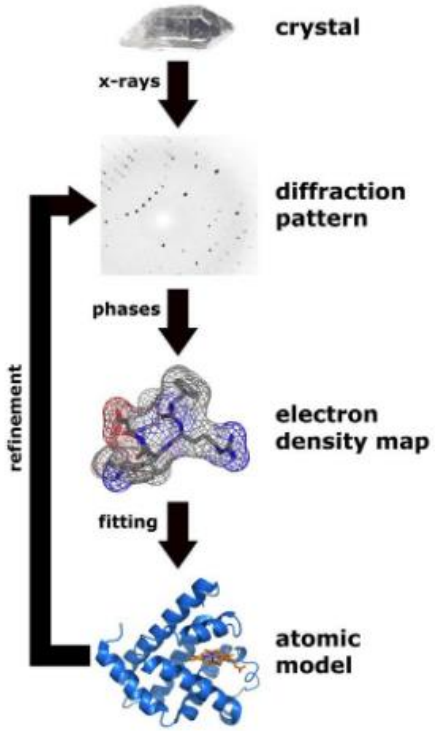
'Bombardeando materiales con neutrones podemos saber donde están los átomos de un material'

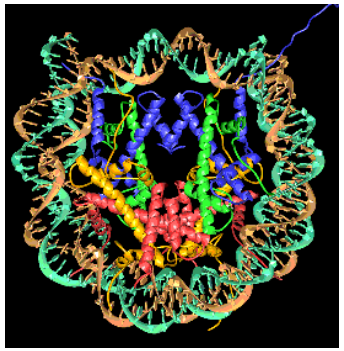


Medidas del estrés en un ala de un Airbus A380

Biología, Bioquímica, química…

Cristalografía de proteínas





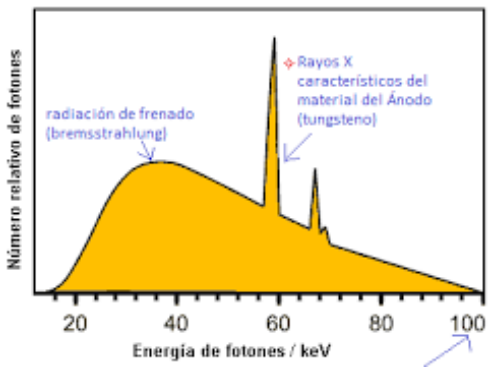
Reconstruction of the 3D structure of a nucleosome (DNA packaging) with a resolution of 0.2 nm

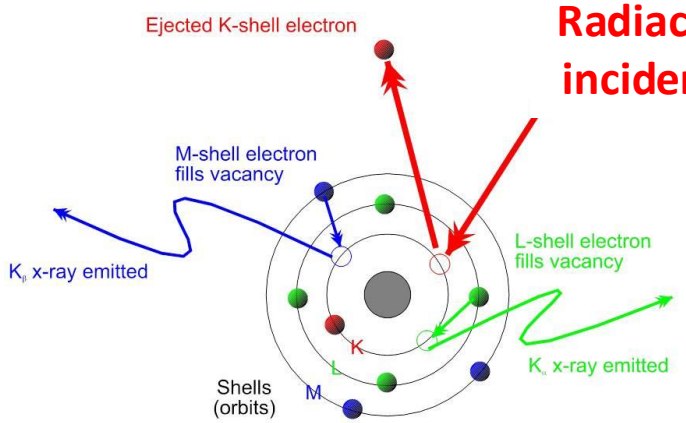
Estudiar la estructura proteica que permite esclarecer la función y diseñar nuevos compuestos con valor farmacológico o biotecnológico

Aplicaciones en preservación de patrimonio cultural y arte

Fluorescencia de rayos-X

Fuentes de radiación sincrotrón





Radiación incidente

Espectro de rayos-X característicos

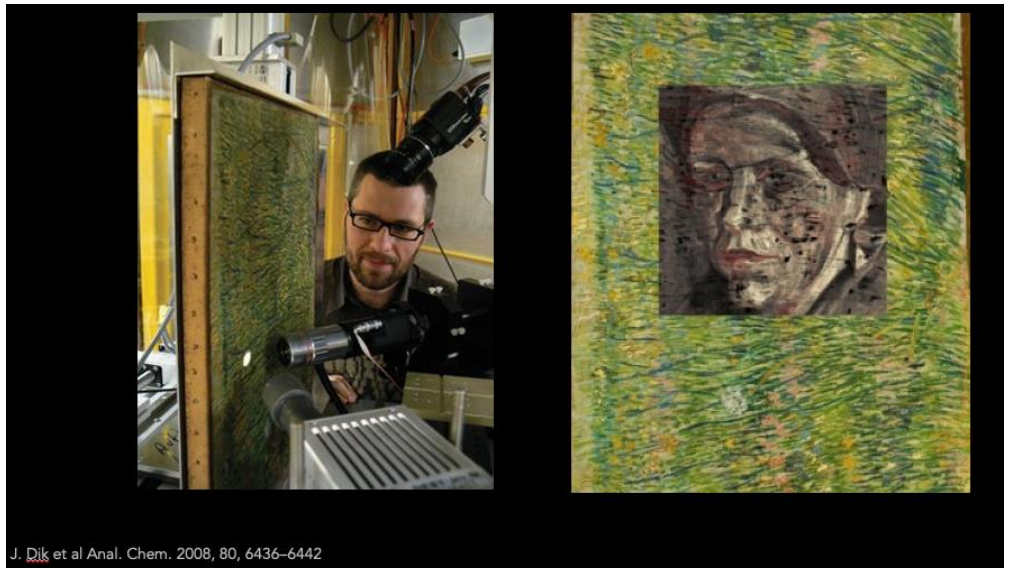


Figure 15.9 Panel B.
Source: Photograph by Robert Gunn.

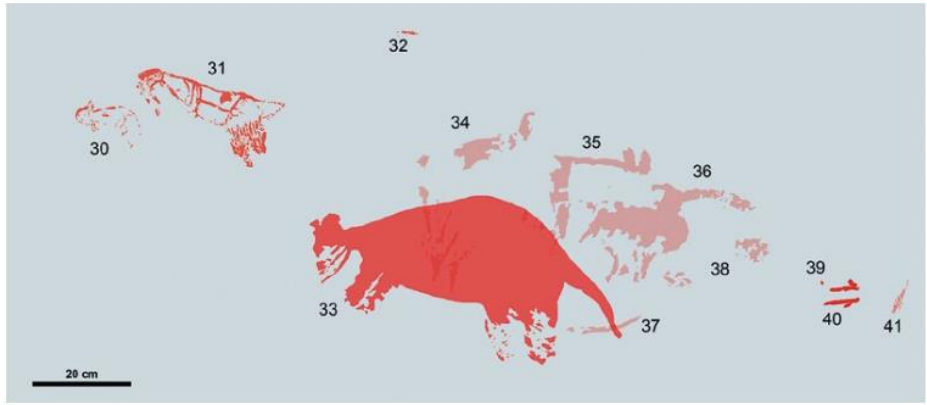
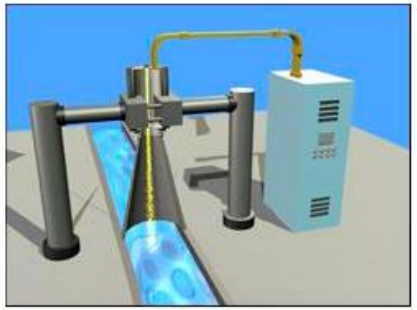


Figure 15.10 Photo-tracing of the Panel B images.
Source: Digital tracing by Robert Gunn.

Aplicaciones en la industria, seguridad

e-,p, iones, γ, n (~ eV hasta 100 MeV/n)

Tratamiento de aguas residuales

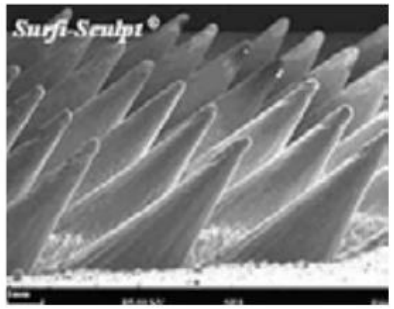


Quitar impurezas orgánicas no degradables

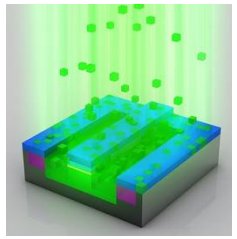
Procesos industriales

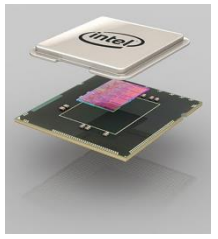
Fundir metales
Soldadura y unión
Mecanizado y estructurado de superficies

Cambio color gemas



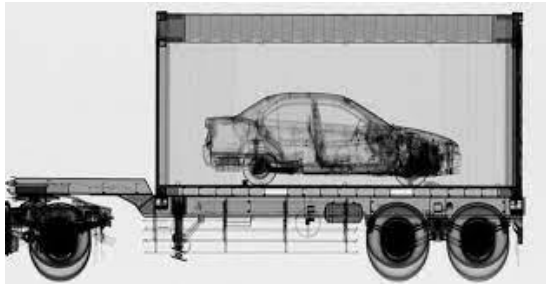
Implantación de iones





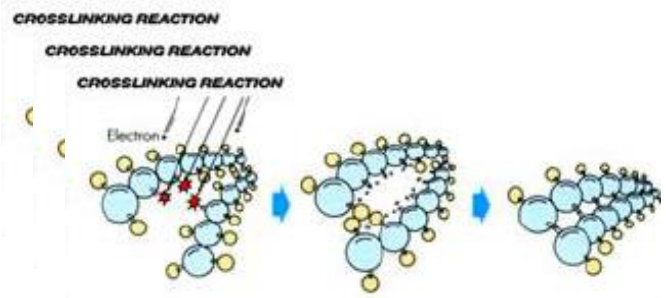
Images courtesy of Intel

Seguridad



Procesamiento de materiales

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



Esterilización de comida

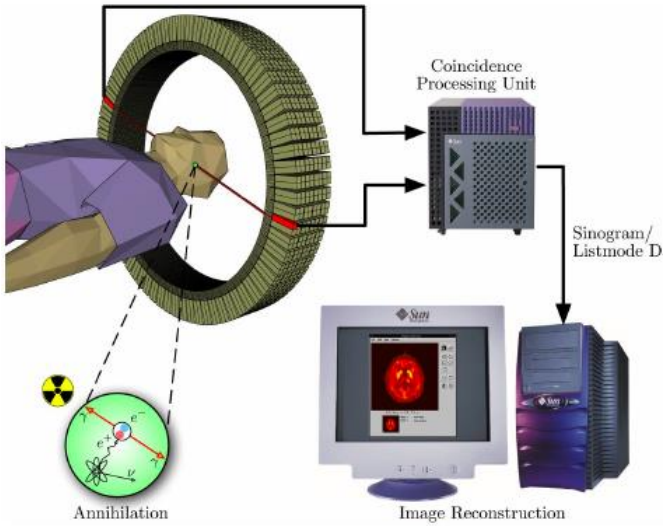
Lower dose → Higher dose

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

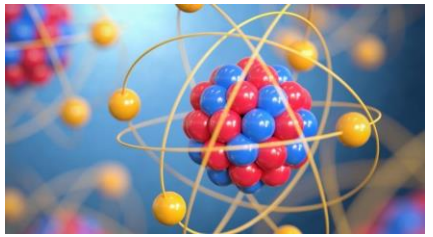
Aplicaciones en medicina

e-,p, iones, γ, n (~ keV hasta 430 MeV/n)

Imagen medica mediante



Producción de radioisótopos



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

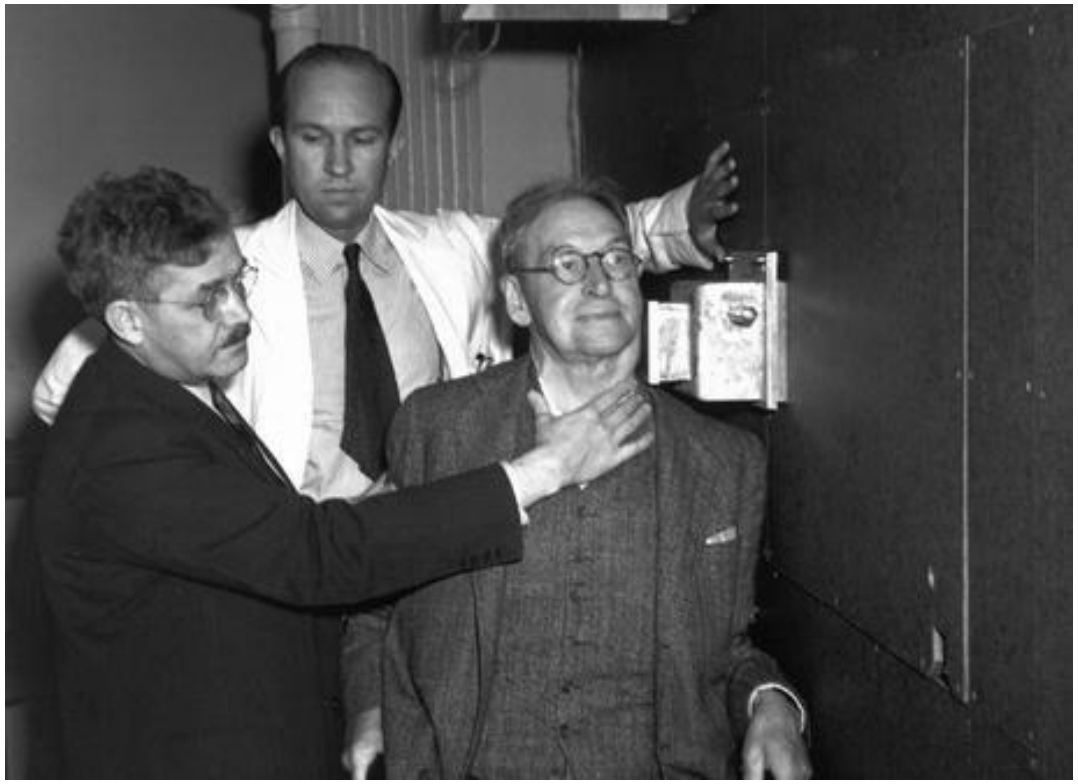
Esterilización de material médico

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

Suelen utilizarse haces de electrones de baja energías

Rayos-X

1938-Berkeley. Primer tumor irradiado con neutrones



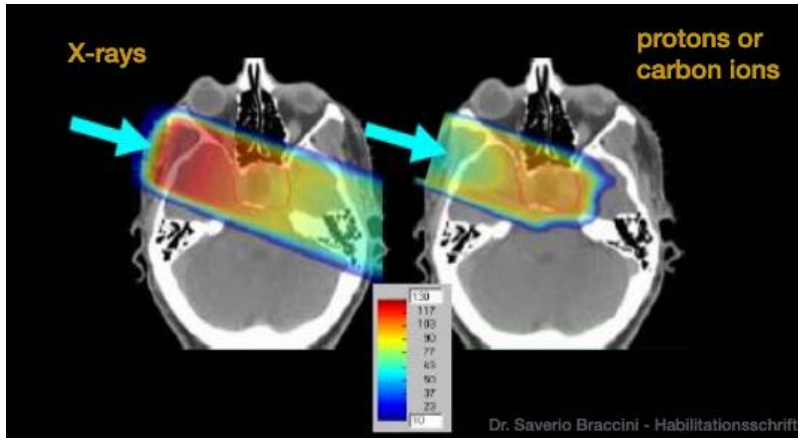
John Lawrence watches Robert Stone aligning a patient in the neutron beam produced by the 60-in. cyclotron (Courtesy Lawrence Berkeley National Laboratory)

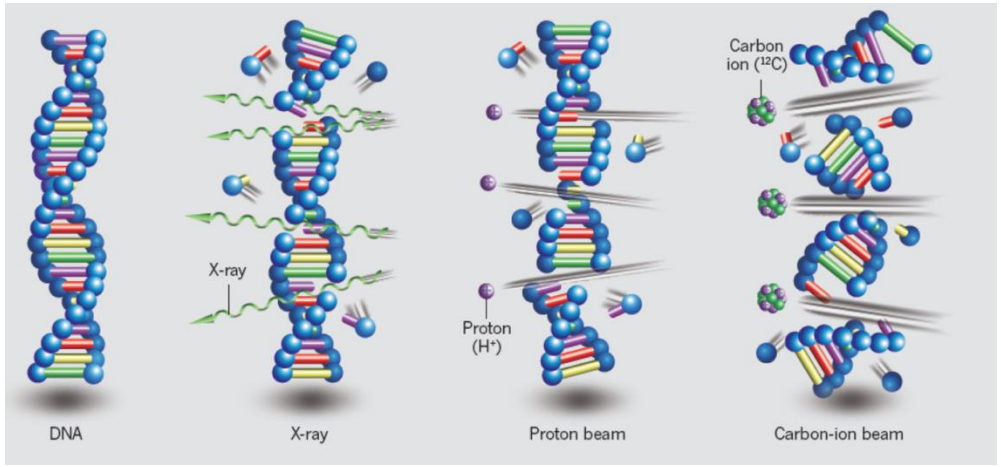
En 1948, Stone evaluó los efectos de la terapia con neutrones en 226 pacientes y concluyó: “La terapia con neutrones, tal como la hemos administrado, ha producido consecuencias tardías tan graves en proporción a los pocos buenos resultados, que no debería continuar usándose”

Aplicaciones en medicina: terapias contra el cáncer

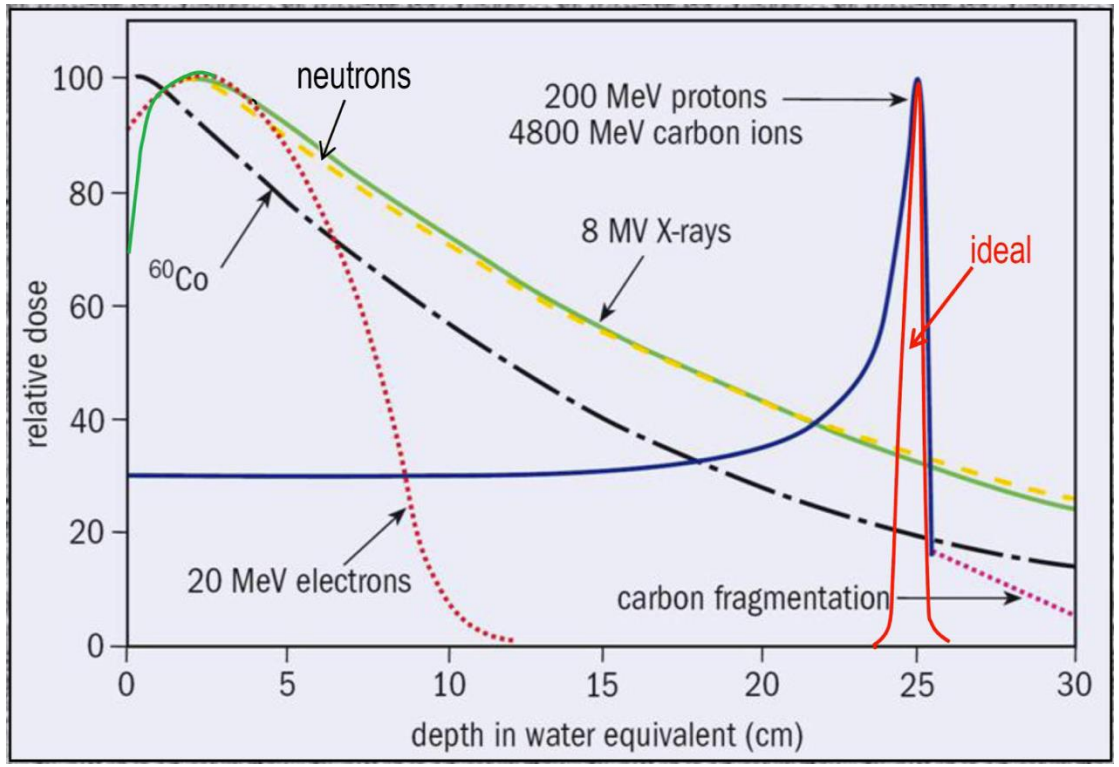
El reto de utilizar radiaciones para curar el cáncer está en conseguir:

- ❑ Tratar el tumor
- ❑ Todo el tumor
- ❑ Y solo el tumor



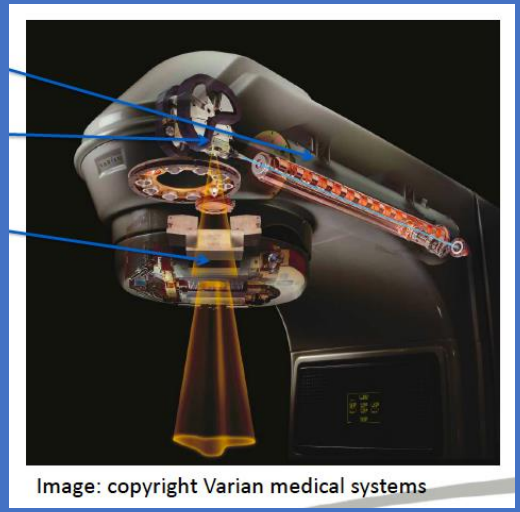
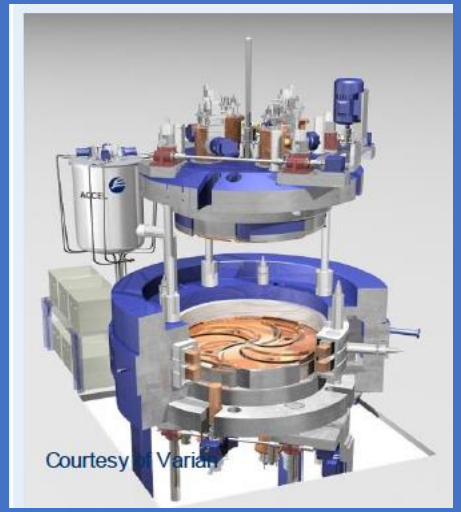
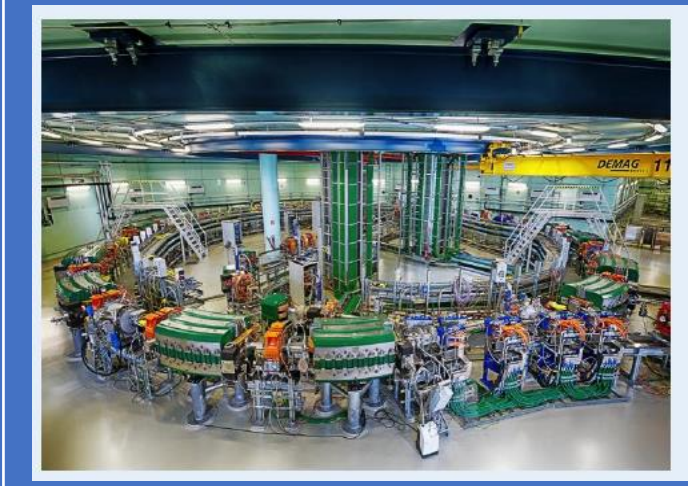


Haz penetrando la materia



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	Ciclotrón/sincrociclotrón	Sincrotrón
	 Image: copyright Varian medical systems	 Courtesy of Varian	
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

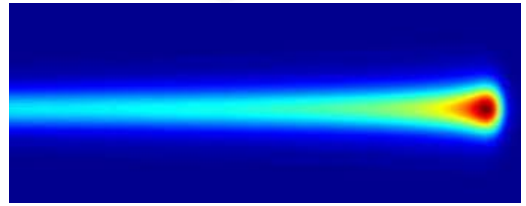
Uno de los retos más importantes que está abordando en la actualidad la comunidad de física de aceleradores para terapias con iones es el diseño y construcción de aceleradores más compactos y de menor coste

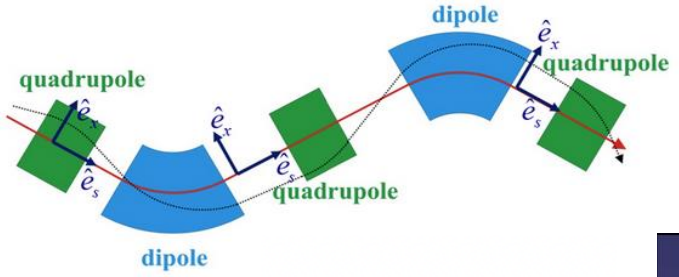
I+D en aceleradores médicos

Retos y áreas de I+D

Retos:

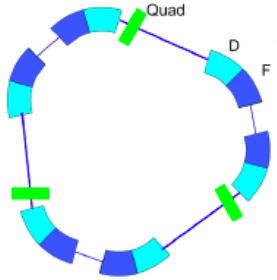
- ❑ **Mejores prestaciones**
  - ✓ Energías más altas, intensidades más altas, nano haces…
  - ✓ Máquinas versátiles
- ❑ **Reducir costes**
  - ✓ Máquinas más eficientes
  - ✓ Máquinas más compactas

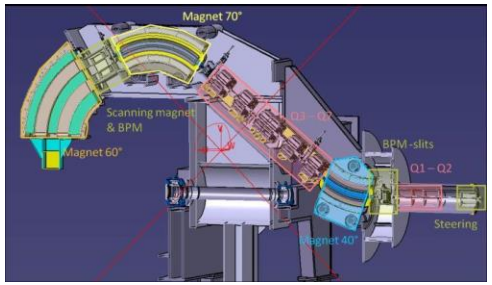


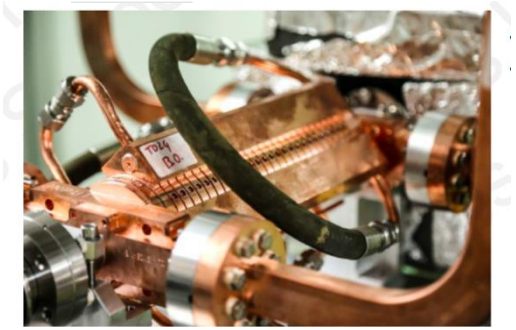


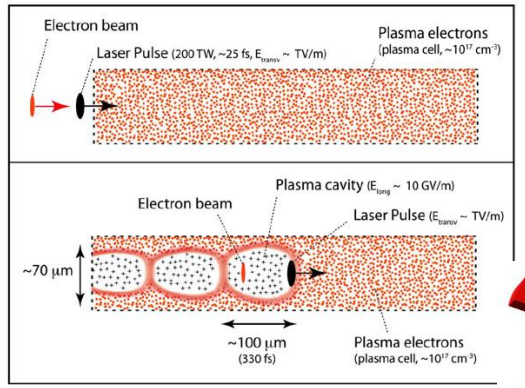
Área de I+D:

- ❑ 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

VNIVERSITAT DE VALÈNCIA

CSIC CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Desarrollo de nuevas tecnologías de aceleración

Estudios de dinámica de haz

Desarrollo de instrumentación de haz

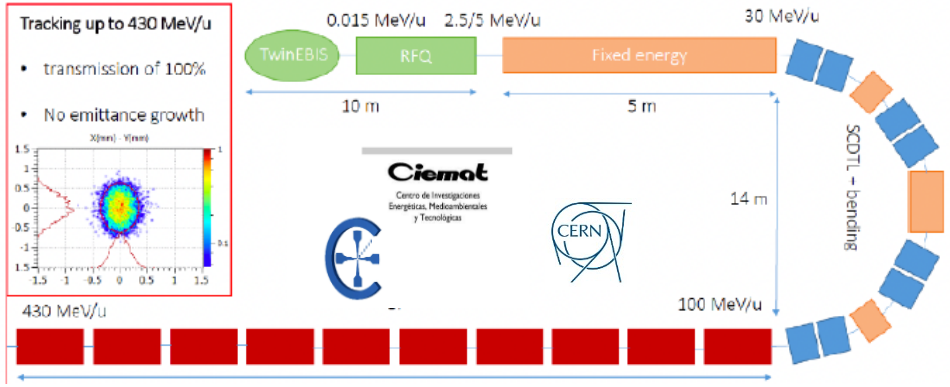
Desarrollo de aceleradores y nuevas técnicas para aplicaciones médicas

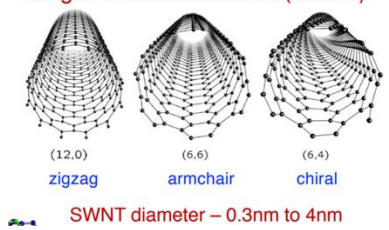
CERN

CLIC

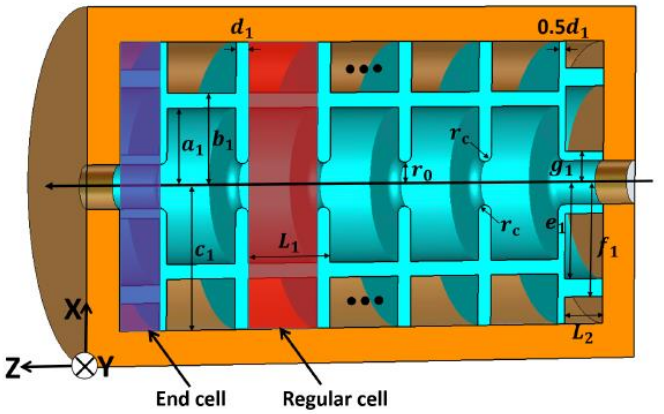
Ciemat Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

KEK





ICMUV INSTITUT DE CIÈNCIA DELS MATERIALS de la Universitat de València



NOVAS group

¡Muchas gracias por vuestra atención!

nuria.fuster@ific.uv.es

Ideas/transparencias/bibliografía:
Daniel Esperante (UV), Maurizio Vretenar (CERN), Mariusz Sapinski (SEEIIST), “Applications of particle accelerators in Europe” (EuCARD^2), Javier Resta López (ICMUV), Juan Fuster (CSIC)