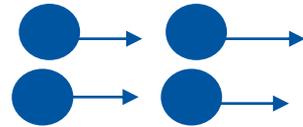


Aceleradores de partículas

Pablo Arrutia
Spanish Teacher Programme
Julio 2023

¿Qué es un acelerador de partículas?

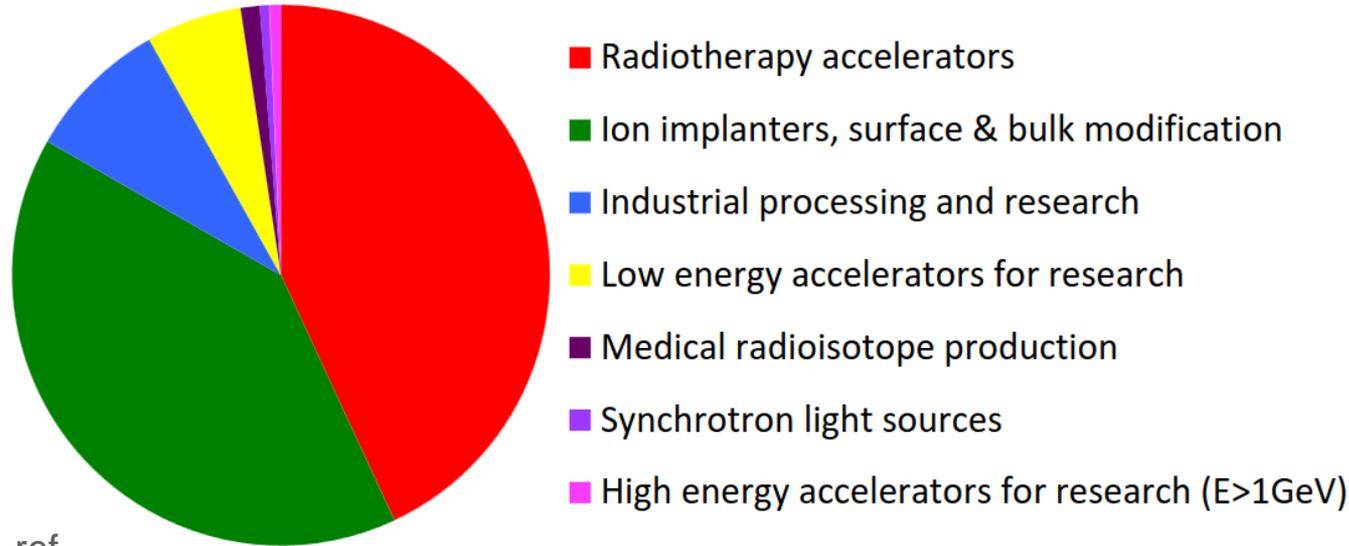
- Un acelerador de partículas es un dispositivo que utiliza campos electromagnéticos para acelerar partículas cargadas a altas velocidades. (Wikipedia)
- Un acelerador `convierte` muchas cargas lentas y dispersas (electricidad) en pocas cargas rápidas y concentradas (haz de partículas).



¿Para qué?

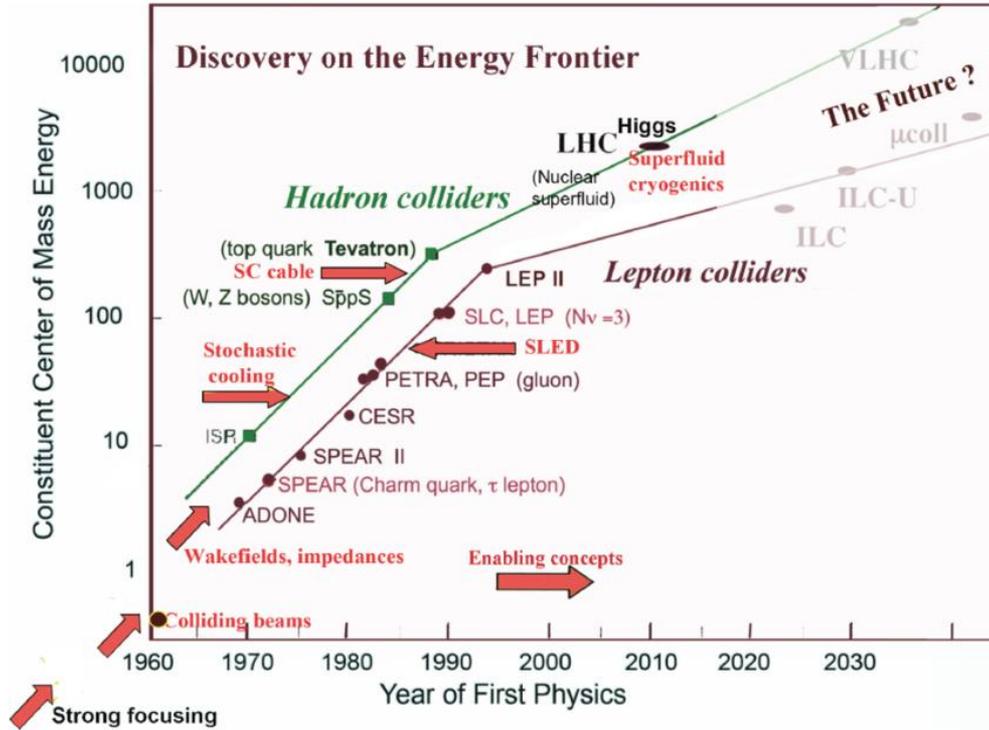
Más de 30 000 aceleradores en uso!

-Accelerators for Americas Future
Report, pp. 4, DoE, USA, 2011



ref

Física fundamental



Física fundamental

25 premios Nobel con contribuciones directas de aceleradores

Year	Name	Accelerator-Science Contribution to Nobel Prize-Winning Research
1939	Ernest O. Lawrence	Cyclotron at Berkeley in 1929
1951	John D. Cockcroft and Ernest T.S. Walton	Linear positive-ion accelerator at Cavendish 1932
1952	Felix Bloch	Use cyclotron at Berkeley - Discovery of the magnetic moment of the neutron in 1940
1957	Tsung-Dao Lee and Chen Ning Yang	Use Bevatron at Lawrence Radiation Laboratory – Parity is not conserved in weak interactions 1956
1959	Emilio G. Segrè and Owen Chamberlain	Use Bevatron at Lawrence Radiation Laboratory – Discovery of the antiproton 1955
1960	Donald A. Glaser	Use of high-energy protons from Cosmotron at Brookhaven - Bubble chamber 1955
1961	Robert Hofstadter	Use of the SLAC linac electron – Structure of nucleons 1959
1963	Maria Goeppert Mayer	Neutron beams University of Chicago cyclotron - Discoveries on high magic numbers 1948
1967	Hans A. Bethe	Analysis of nuclear reactions accelerated protons & other nuclei Discovered how energy is produced in stars 1939
1968	Luis W. Alvarez	Hydrogen bubble chamber and beams from Bevatron at the Lawrence Radiation Laboratory - resonance states
1976	Burton Richter and Samuel C.C. Ting	SPEAR collider at Stanford (Richter) and Brookhaven Alternating Gradient Synchrotron (Ting) – J/ particle 1974
	Sheldon L. Glashow, Abdus Salam, and Steven Weinberg	Experiments on the bombardment of nuclei with neutrinos at CERN - prediction of weak neutral currents 1973

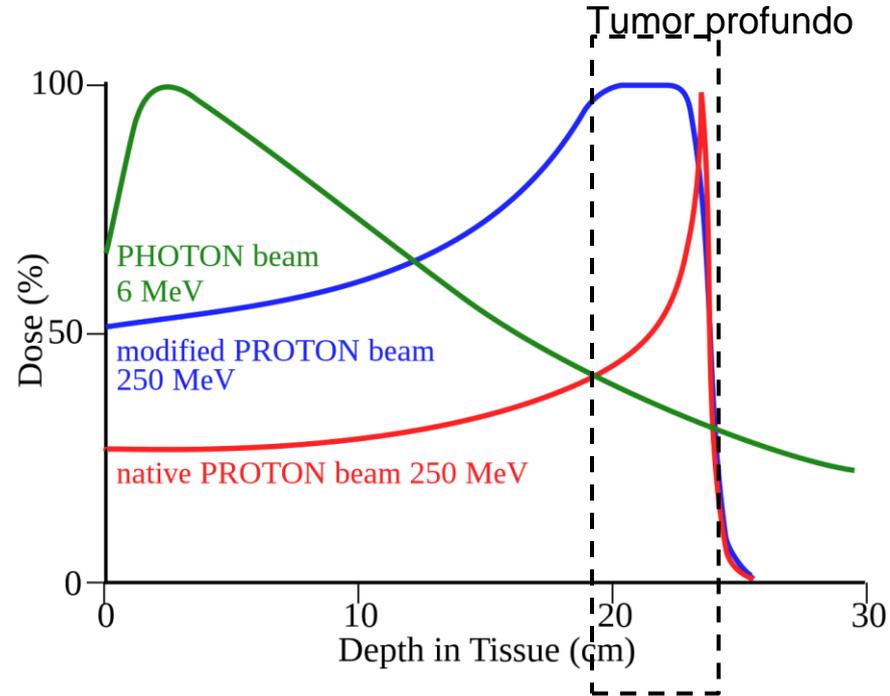
1980	James W. Cronin and Val L. Fitch	Brookhaven Alternating Gradient Synchrotron - CP (charge-parity) symmetry violation 1964
1981	Kai M. Siegbahn	Weak-focusing principle for betatrons 1944
1983	William A. Fowler	Analysis accelerator-based experiments – stellar-fusion processes 1957
1984	Carlo Rubbia and Simon van der Meer	SPS CERN Observed the intermediate vector bosons W and Z 1983
1986	Ernst Ruska	Magnetic optical system that provided large magnification - Electron microscope in 1933
1988	Leon M. Lederman, Melvin Schwartz, and Jack Steinberger	Brookhaven's Alternating Gradient Synchrotron – Muon neutrino 1962
1989	Wolfgang Paul	Paul's idea in the early 1950s of building ion traps grew out of accelerator physics
1990	Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall, Richard E. Taylor	SLAC linac – Deep inelastic scattering of electrons on protons and bound neutrons 1974
1992	Georges Charpak	CERN multiwire proportional chambers 1970
1995	Martin L. Perl	Stanford's SPEAR collider Tau lepton 1975
2004	David J. Gross, Frank Wilczek, and H. David Politzer	SLAC linac on electron-proton scattering – Asymptotic freedom in the theory of strong interactions 1973
	Makoto Kobayashi Toshihide Maskawa	KEKB accelerator at KEK and the PEP II at SLAC – Theory of quark mixing 1973

Terapia de protones

- El cáncer es la segunda causa de muerte más común.
- La terapia con protones permite aislar el daño celular en la zona del tumor, a diferencia de la radioterapia.
- El CERN colabora con centros (e.g. CNAO-MedAustron) y desarrolla nuevos diseños (NIMMS).

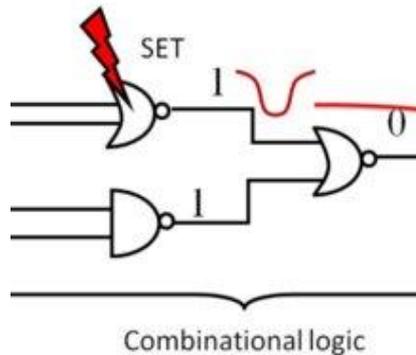
Mecanismo: la probabilidad de que un proton en movimiento ionice un núcleo en reposo aumenta a medida que su velocidad disminuye

($\sim 1/v^2$).



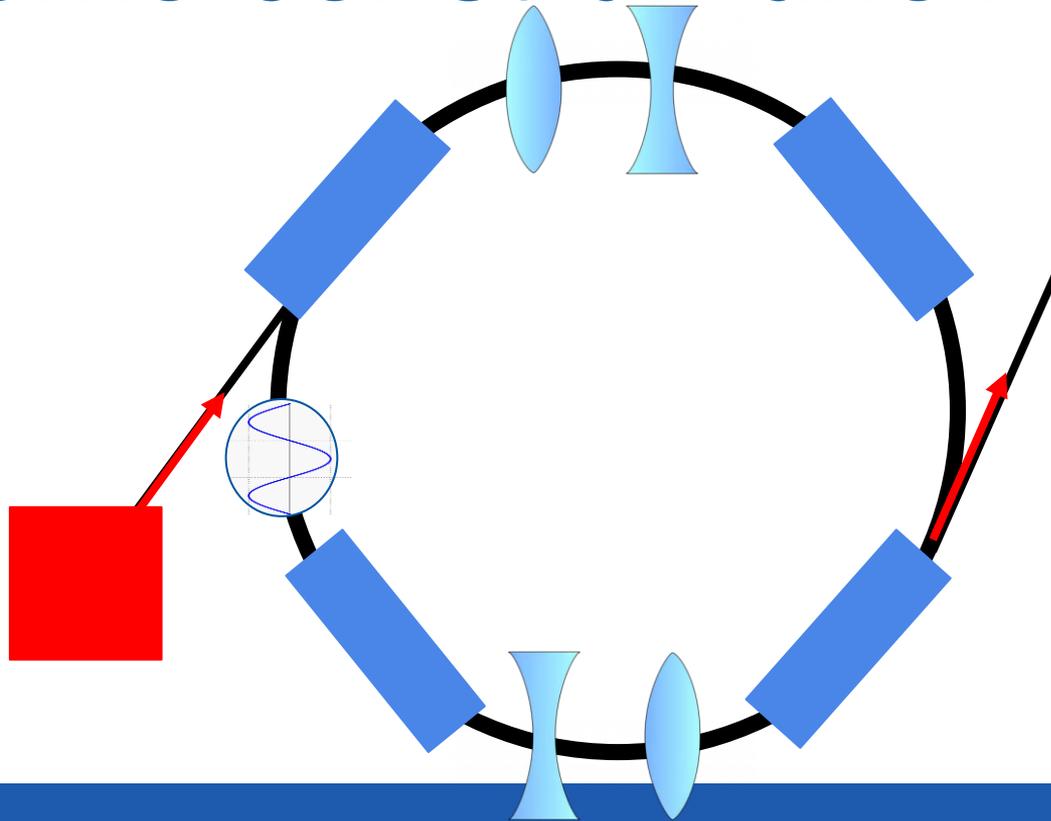
Viajes al espacio

- En satélites/aviones/naves, los rayos cósmicos pueden dañar los componentes electrónicos
- Podemos utilizar aceleradores para simular estas situaciones
- En el CERN, el PS extrae un haz de Pb a la zona Este (HEARTS-CHIMERA)

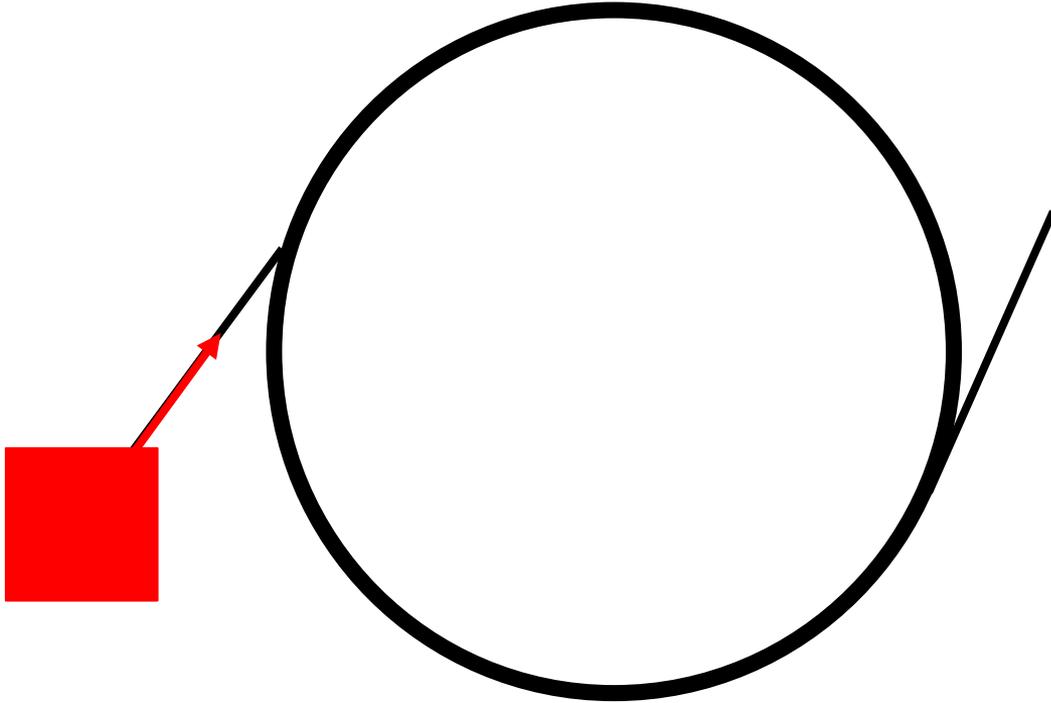


A single-event upset in the flight computers of this Airbus A330 during Qantas Flight 72 on 7 October 2008 is suspected to have resulted in an aircraft upset that nearly ended in a crash after the computers experienced several malfunctions.^[1]

¿Cómo construir uno?



Fuente de partículas



Fuentes de partículas

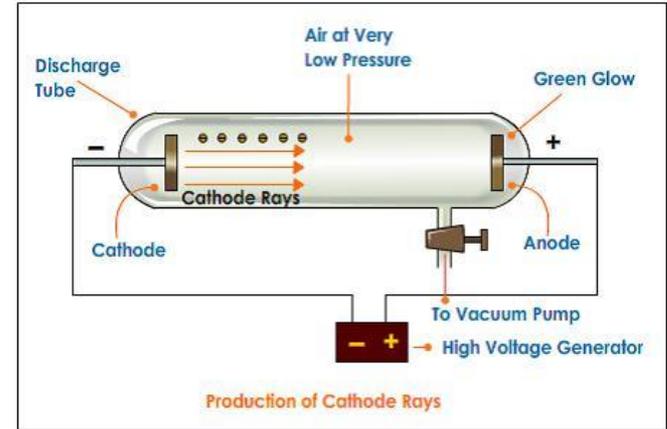
La materia que nos rodea es (principalmente) neutra, pero necesitamos obtener partículas cargadas



Fuentes, historia

La fuente de rayos catódicos (finales siglo XIX):

- Voltaje ioniza aire.
- Cationes chocan contra cátodo y generan electrones.
- Electrones son acelerados hacia ánodo.
- Colisión con tubo/aire genera luz.

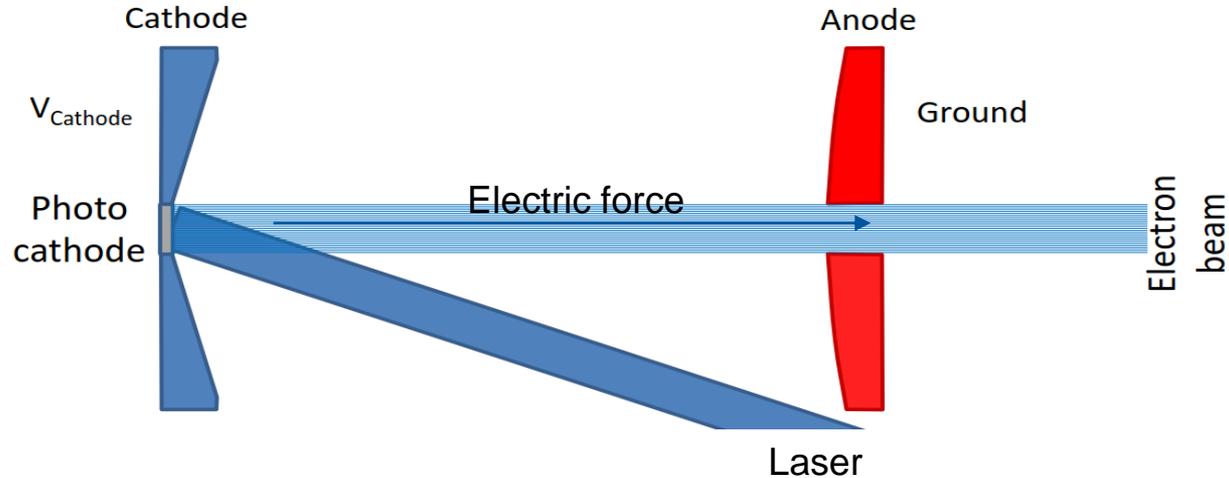


Fuentes: estrategia principal

1. Desenlazar núcleo y electrones, superando la función de trabajo
2. Extraer el núcleo o los electrones con campos eléctricos

Métodos típicos:

- Electrones: efecto termoiónico, efecto fotoeléctrico
- Protones/iones: ionización por electrones

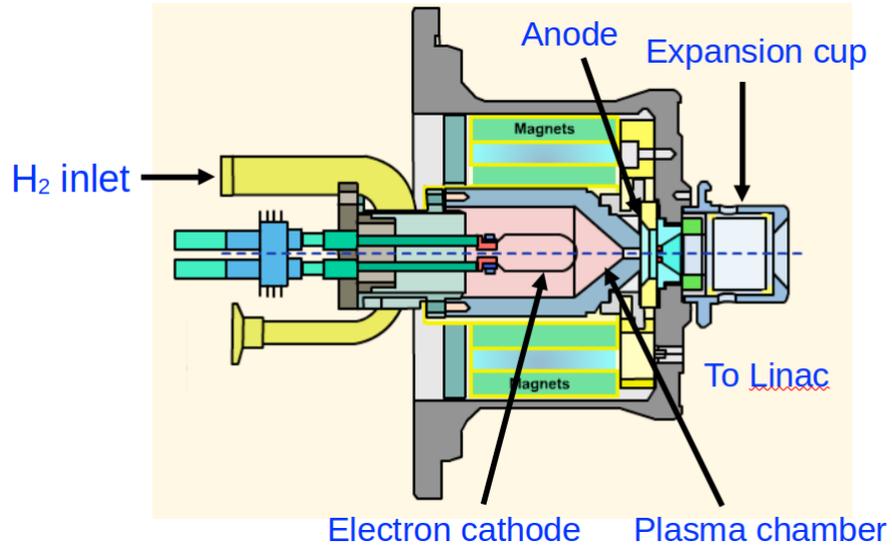


Fuentes: estrategia principal

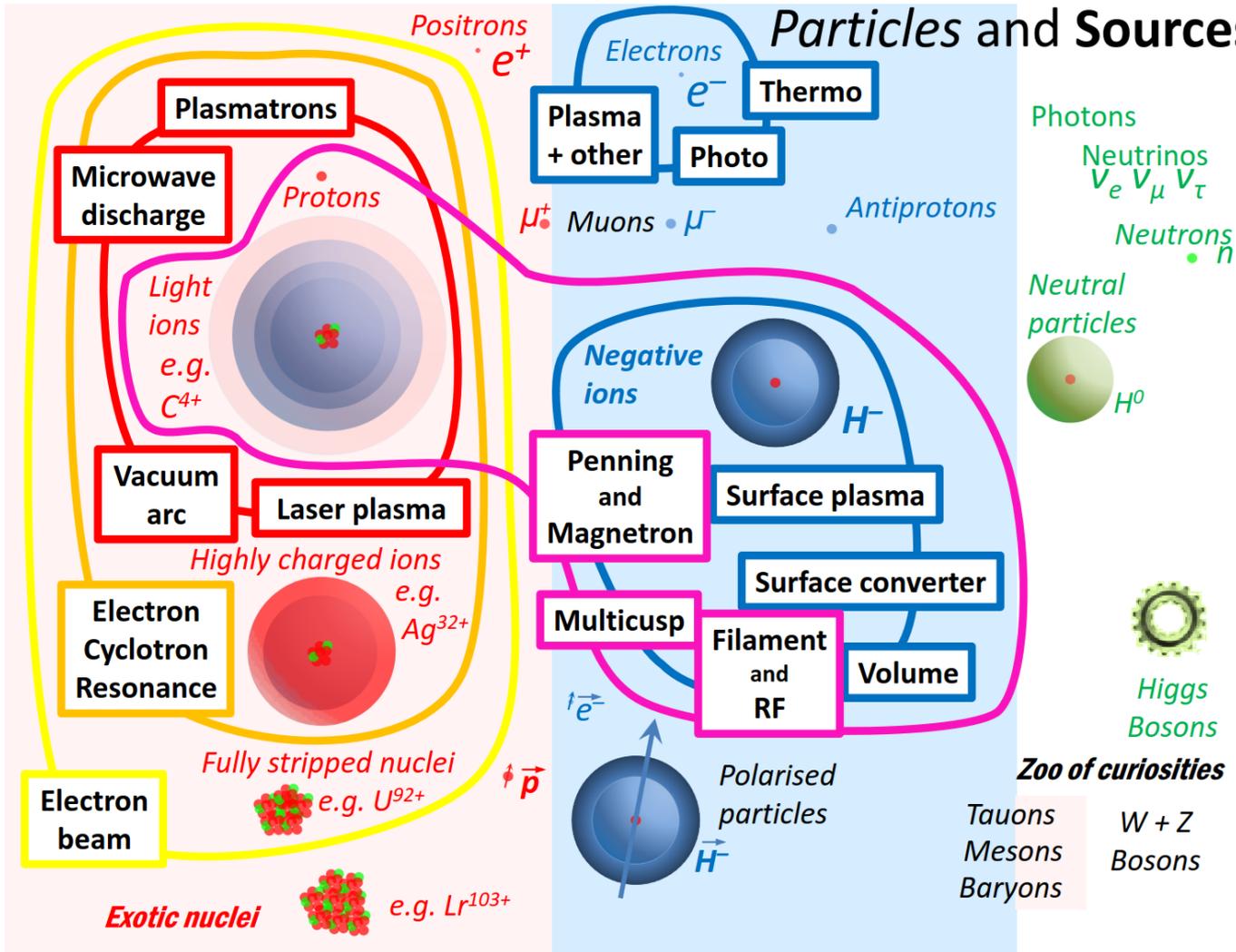
1. Desenlazar núcleo y electrones, superando la función de trabajo
2. Extraer el núcleo o los electrones con campos eléctricos

Métodos típicos:

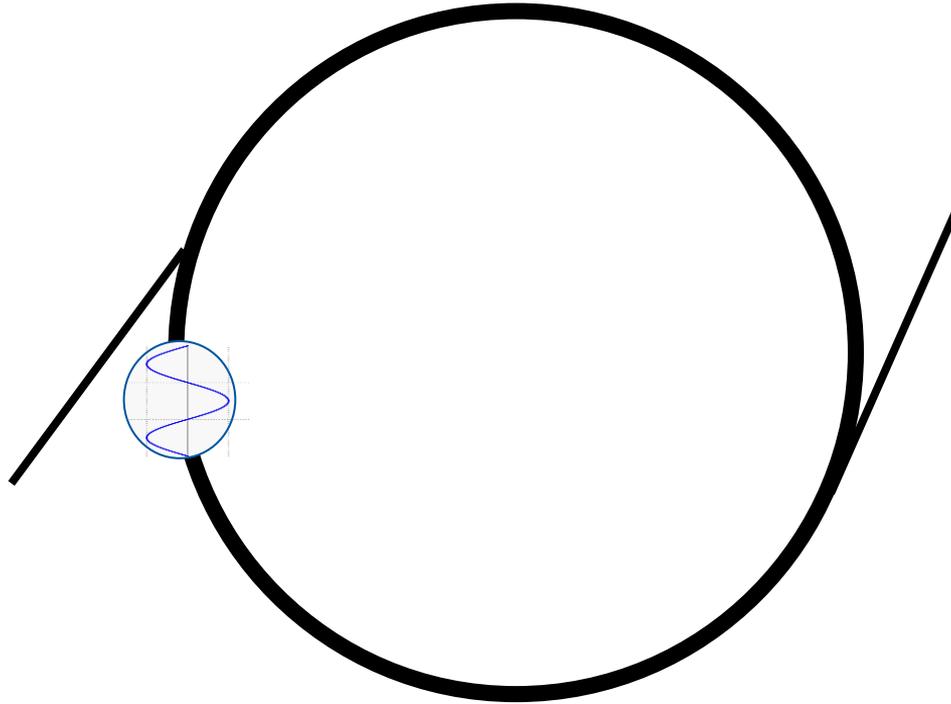
- Electrones: efecto termoiónico, efecto fotoeléctrico
- Protones/iones: ionización por electrones



Particles and Sources



Aceleración



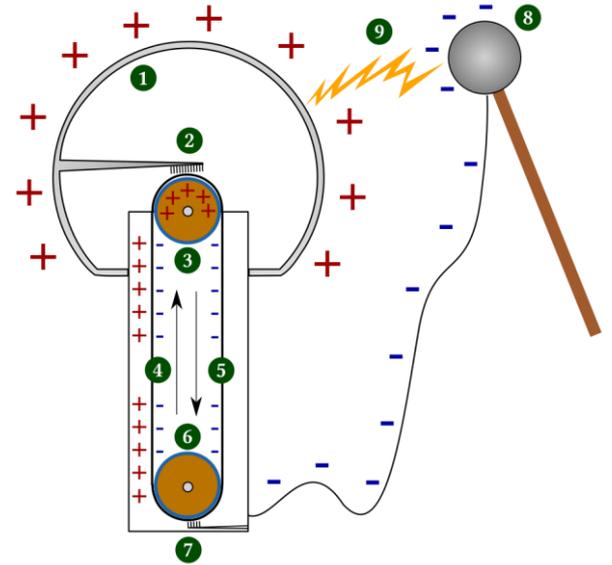
Aceleración, historia

- Diferencia de voltaje -> aceleración
- Robert Van de Graaff (1929), y John Cockcroft/Ernest Walton (1932) crean los primeros aceleradores electrostáticos

En el acelerador Van de Graaff la carga se separa usando el efecto triboeléctrico!



Van de Graaff Generator



1. hollow metal sphere
2. upper electrode
3. upper roller (for example an acrylic glass)
4. side of the belt with positive charges
5. opposite side of belt, with negative charges
6. lower roller (metal)
7. lower electrode (ground)
8. spherical device with negative charges
9. spark produced by the difference of potentials

Aceleración, historia

- Diferencia de voltaje -> aceleración
- Robert Van de Graaff (1929), y John Cockcroft/Ernest Walton (1932) crean los primeros aceleradores electrostáticos

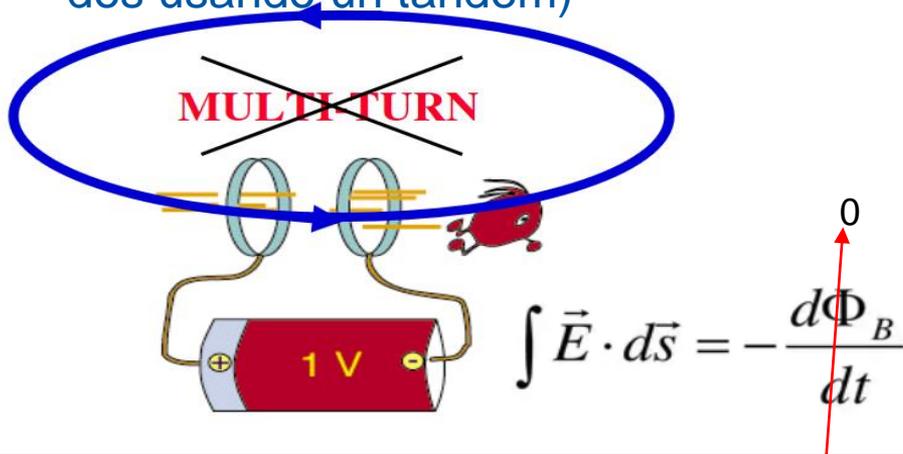
En el acelerador Van de Graaff la carga se separa usando el efecto triboeléctrico!



Aceleración, historia

Los aceleradores electrostáticos están limitados:

Solo se pueden travesar una vez (o dos usando un tandem)



Descarga eléctrica

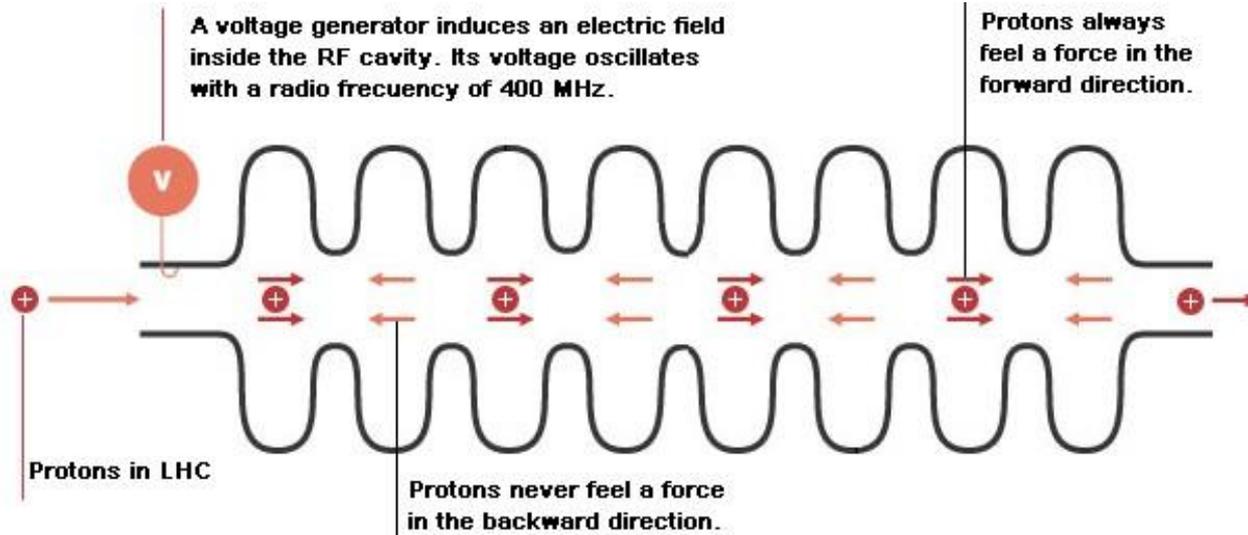


Aceleración, cavidad RF

Solución: alternar el campo electromagnético usando tecnología de radiofrecuencia

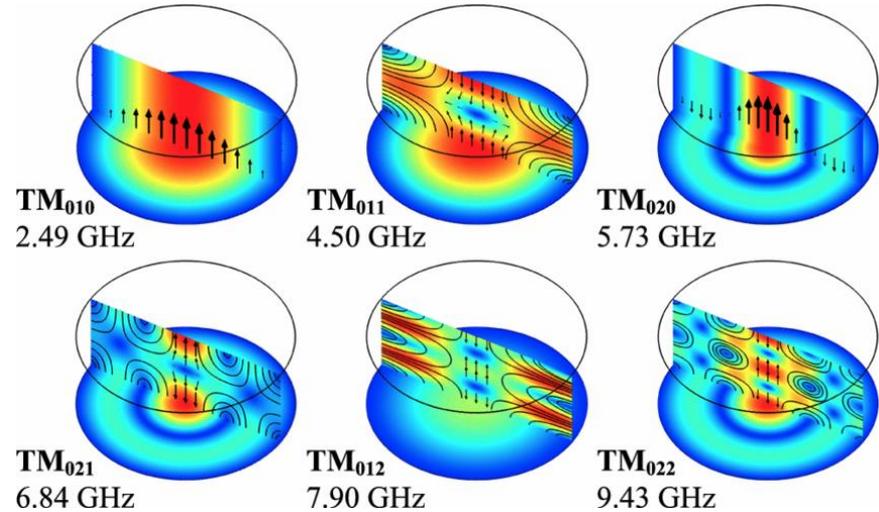
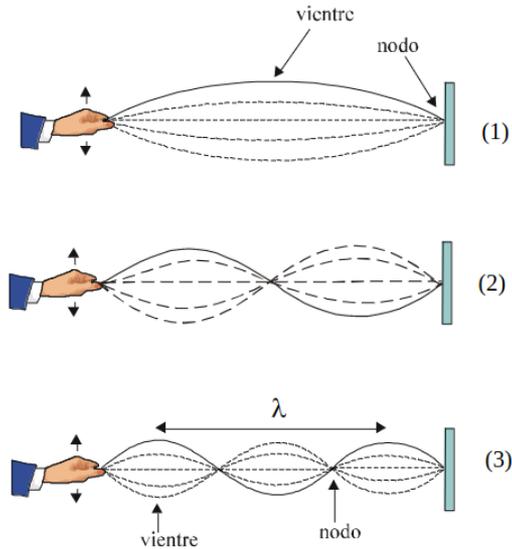
- evita la acumulación de carga

- Con B variable, Maxwell nos permite ejercer trabajo sobre las cargas $\int \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$

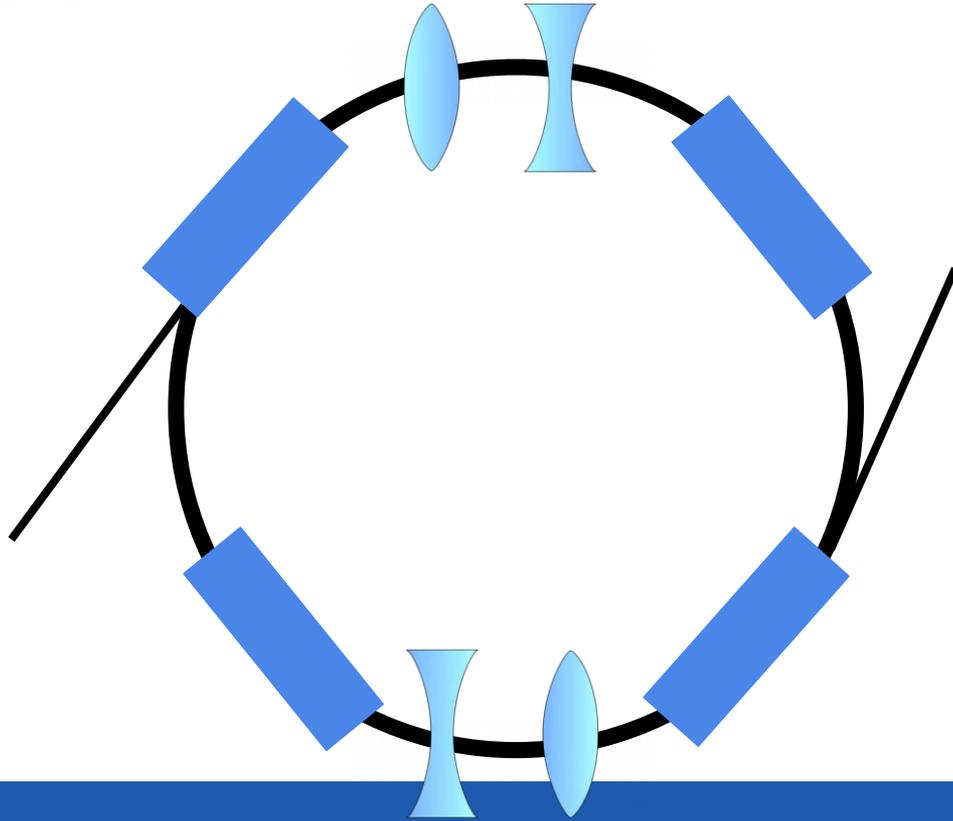


Aceleración, cavidad RF

- La geometría/material de la cavidad solo permite ciertas ondas estacionarias
- Las frecuencia propia de la cavidad debe coincidir con la frecuencia de paso de las cargas (o ser un múltiplo de ella)



Imanes



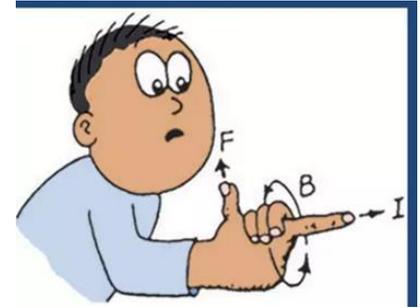
Imanes

Fuerza de Lorentz

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

↙
Aceleración tangencial y/o
centrípeta

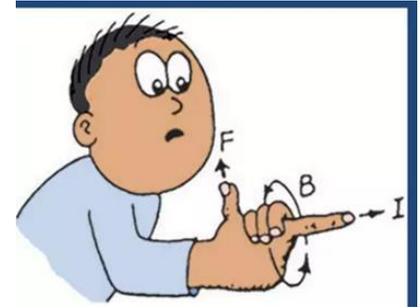
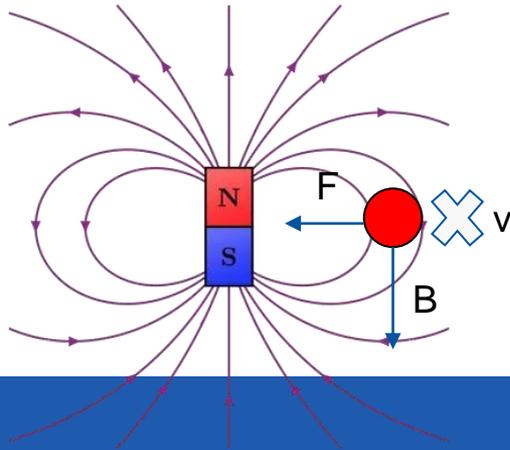
↘
Solo aceleración centrípeta!
No ejerce trabajo -> no
aumenta energía :(



Imanes, dipolo

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

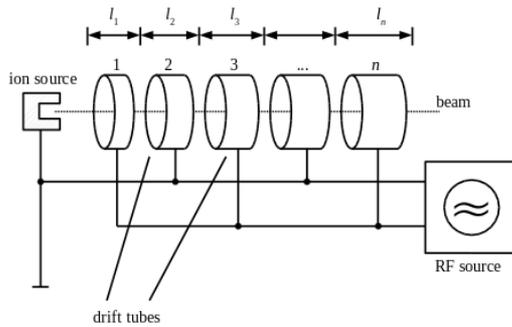
Dipolo



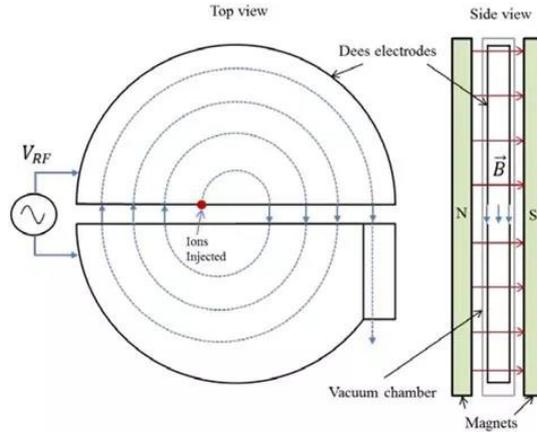
Pero su fuerza aumenta con
v :)

Imanes, tipos de aceleradores

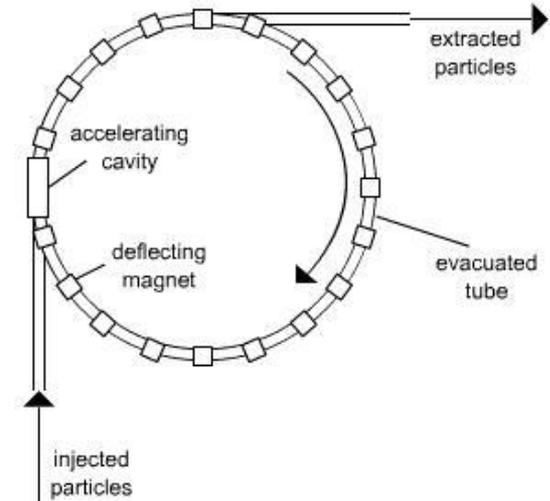
Linac (Sin dipolo)



Ciclotrón (Dipolo fijo)

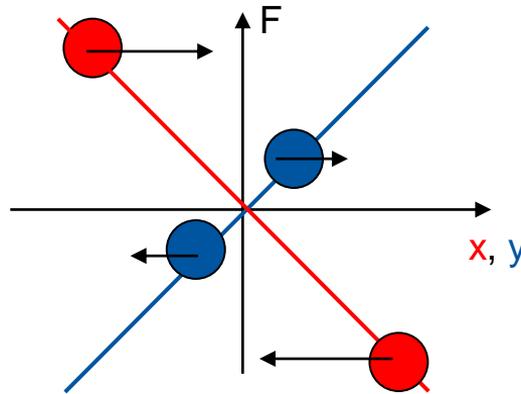
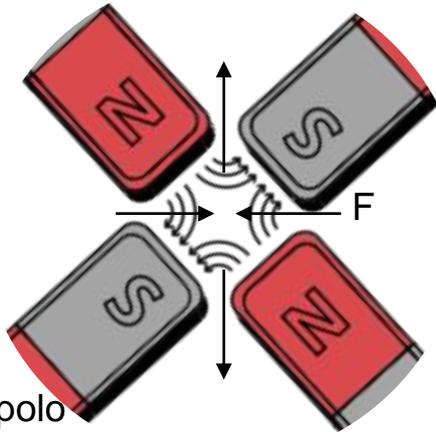


Sincrotrón (Dipolo variable)

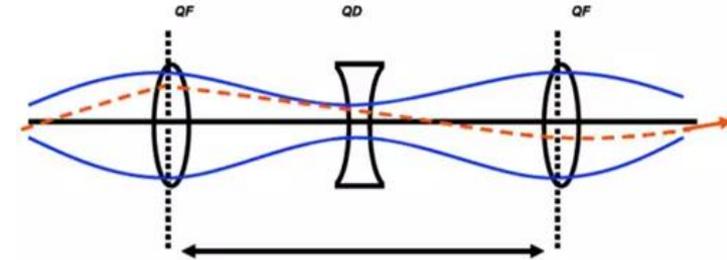


Imanes, cuadrupolo

- Un haz de partículas tiende a defocalizarse transversalmente, como un haz de luz...
- El campo que focaliza en una dirección de-focaliza con la misma fuerza en la dirección perpendicular (a diferencia de una lente).
- Aun así, es posible mantener las partículas confinadas transversalmente (alternating strong focusing).

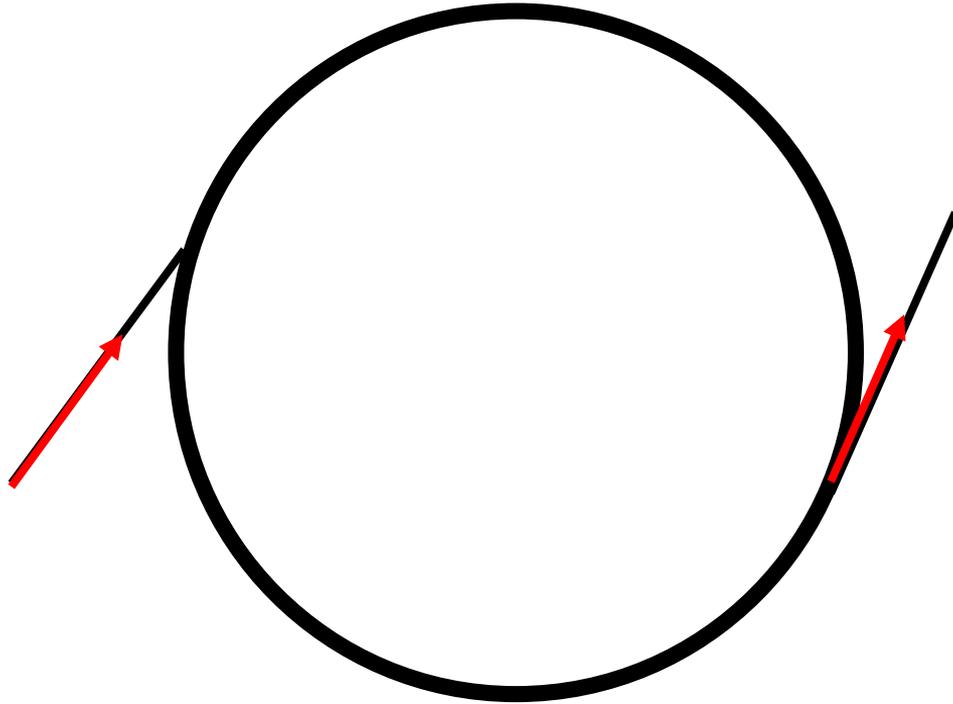


$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}.$$



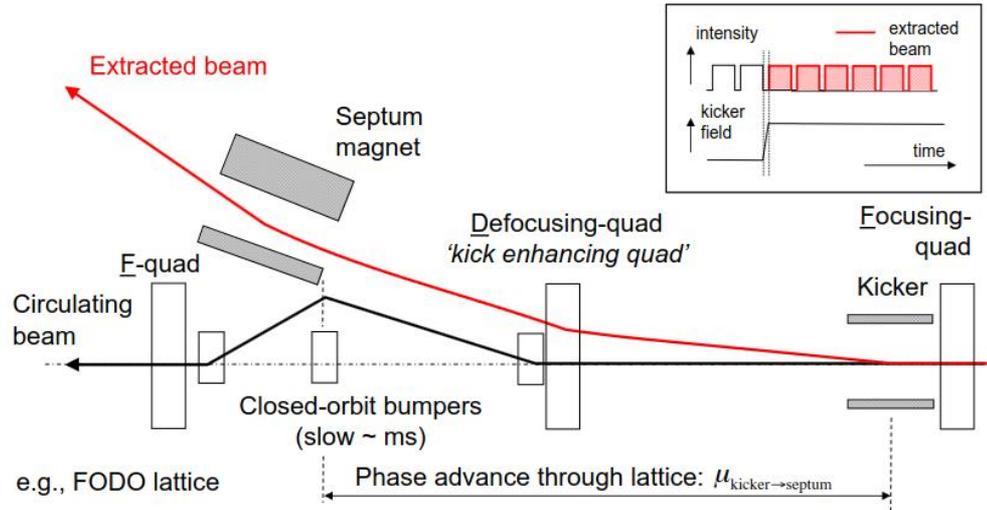
Cuadrupolo

Inyección y extracción



Inyección y extracción

El haz se inyecta o extrae utilizando un kicker, un imán que puede activar su campo en ~ 100 ns

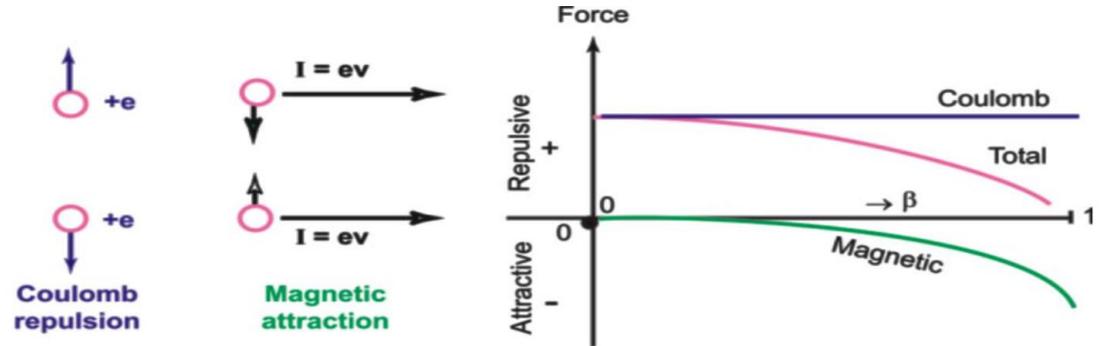


Limitaciones

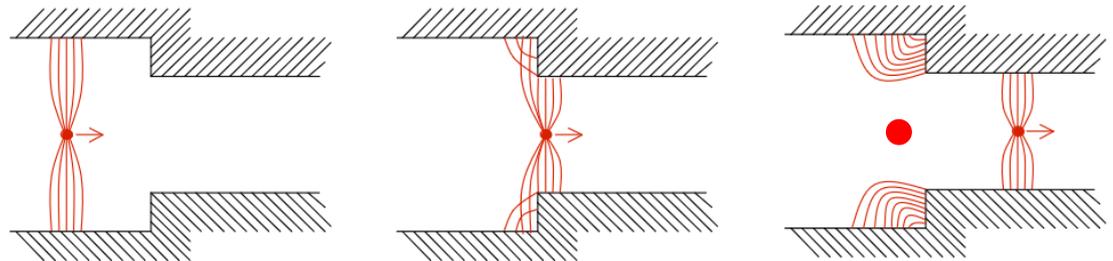


Limitaciones (Dos ejemplos)

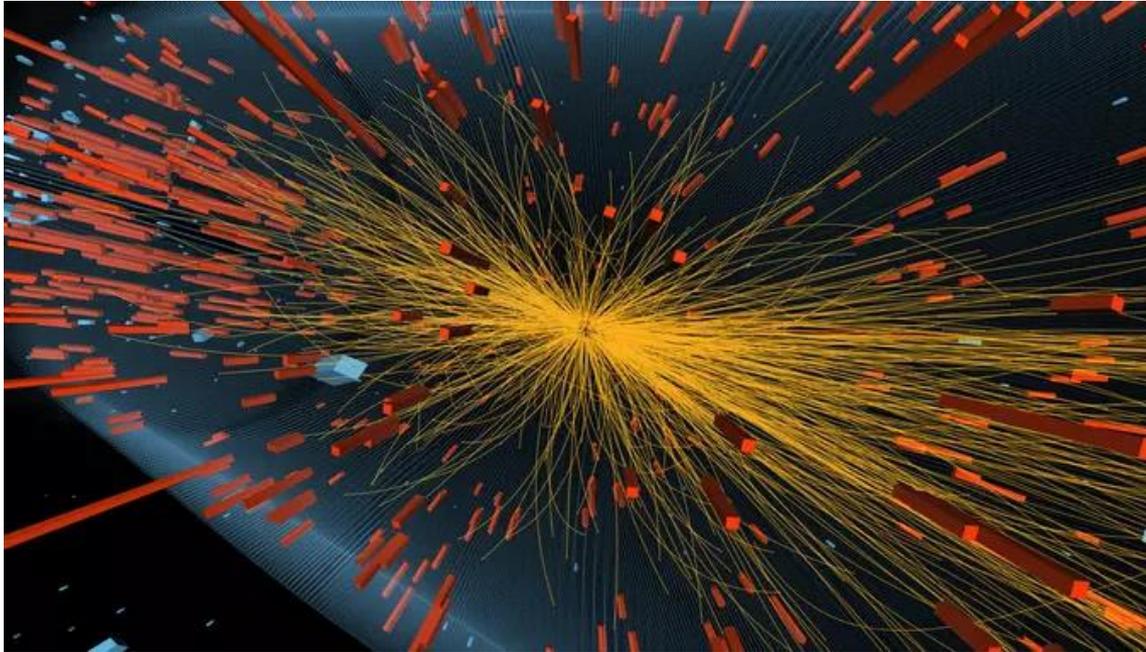
Space charge
(Coulomb contra
Biot-Savart)



Impedance
coupling
(la aceleración
que nadie pidió)



Colisionadores



Colisionadores, Luminosidad

Es una medida del número de colisiones que pueden producirse en un detector por cm^2 y por segundo. Para dos haces Gaussianos colisionando frontalmente, la luminosidad se expresa así:

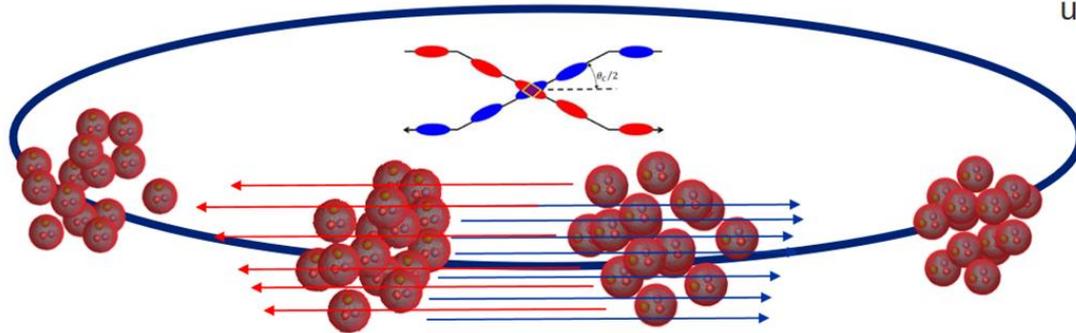
$$L = \frac{N^2 n_b f_{rep}}{4\pi\sigma^2}$$

$$N_{\text{event}} = L\sigma_{\text{event}}$$

Acelerador
Luminosidad

Natura

Sección Eficaz:
Probabilidad de que
un evento ocurra

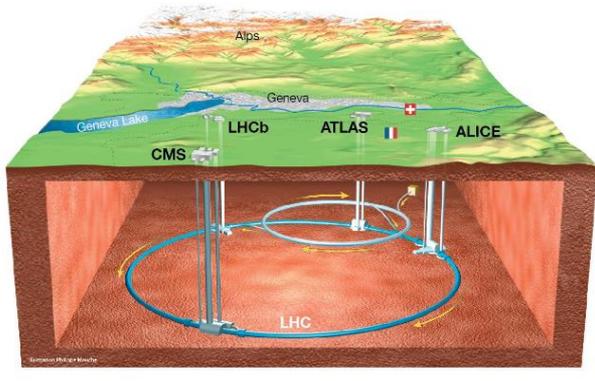


Ingrid Mases

Colisionadores, LHC

El acelerador más potente jamás creado:

- 27 km de circunferencia, 100m bajo tierra
- 3×10^{14} protones circulan a 7 TeV (comparable a un Airbus a380 a 100 km/h)
- 1232 dipolos producen un campo magnético de 8.3 T con cables superconductores enfriados a 1.9 K con corriente de 11800 Amperios!
- Vacío comparable al de la Luna, en un volumen del tamaño de una catedral



Ejemplo real: Enfriamiento estocástico

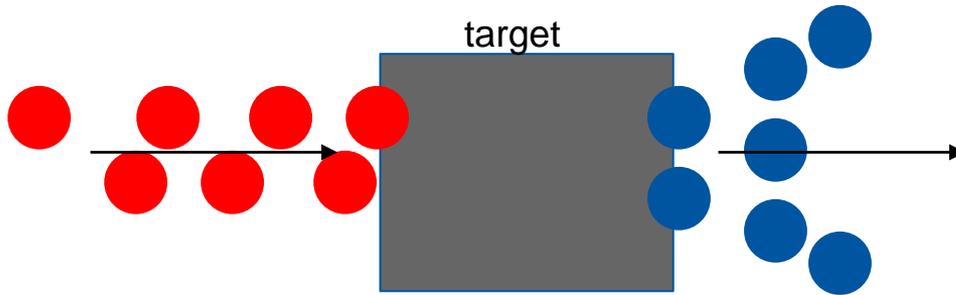


El físico de aceleradores es como un fontanero de partículas...
-Yo, intentando explicar mi trabajo en un bar

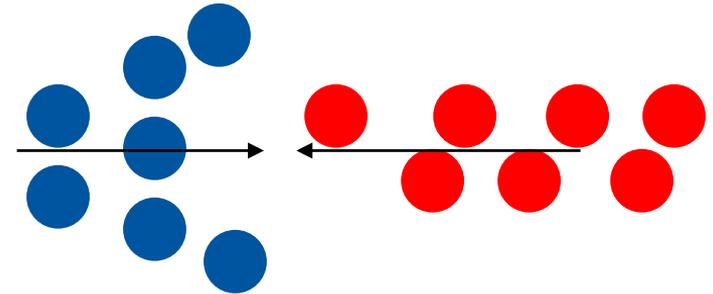
Problema

- Queremos colisionar protones y antiprotones en el SppS
- Es fácil generar un haz concentrado de protones, pero no de antiprotones
- Baja concentración \rightarrow baja luminosidad \rightarrow eventos insuficientes para descubrimientos

Generación de antiprotones

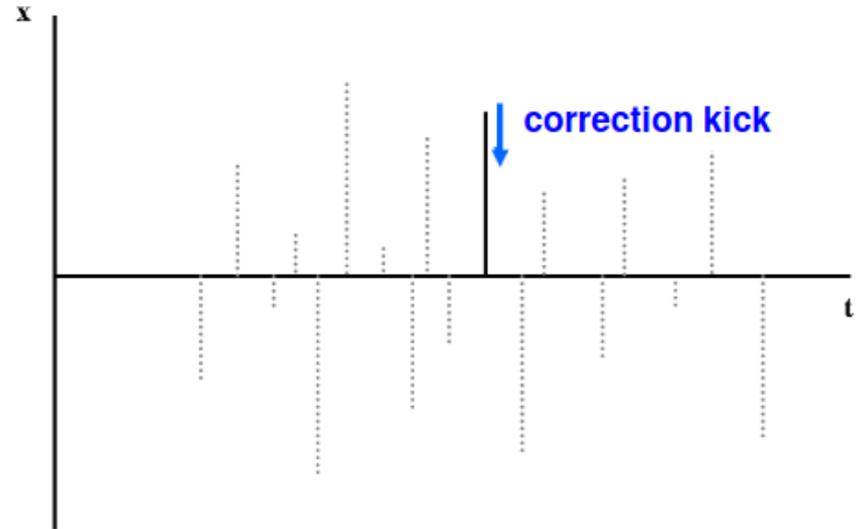
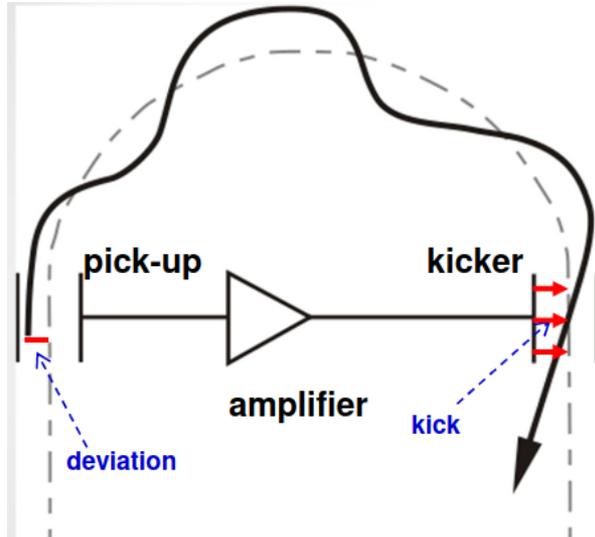


Colisiones (luminosidad baja)



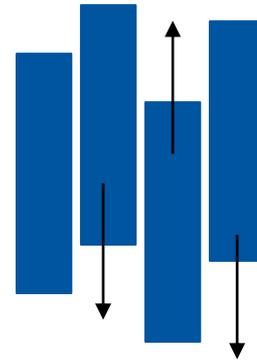
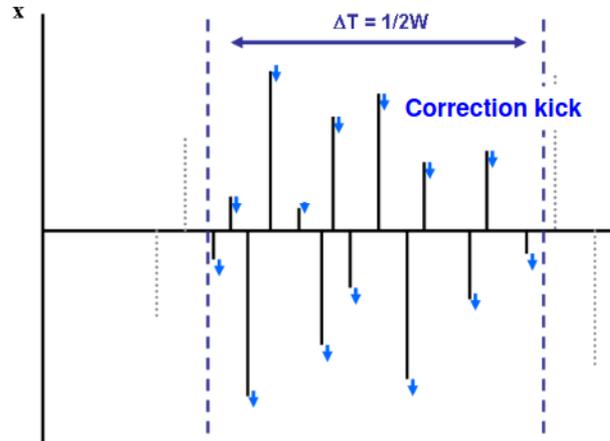
Solución: caso idealizado

- Inyectar en haz de antiprotones en un sincrotron
- Corregir la desviación partícula por partícula, revolución por revolución



Solución: caso realista

- Nuestro ancho de banda es limitado: corregimos la desviación 'rodaja por rodaja'
- Como el número de partículas en cada rodaja es finito, la posición media de cada rodaja no es exactamente cero (teorema del limite central) y podemos corregir ese error



Solución: modelo teórico

- La distribución de antiprotones evoluciona siguiendo una ecuación de difusión
- Con parámetros adecuados, la distribución se enfría

$$\text{cooling rate } \lambda = \tau^{-1} = \frac{2\dot{W}}{N} \left(\underbrace{2g}_{\text{cooling}} - \underbrace{g^2(M+U)}_{\text{heating}} \right)$$

← Corrección del valor medio de la rodaja

↙ Error debido a la varianza de la rodaja y el ruido del hardware

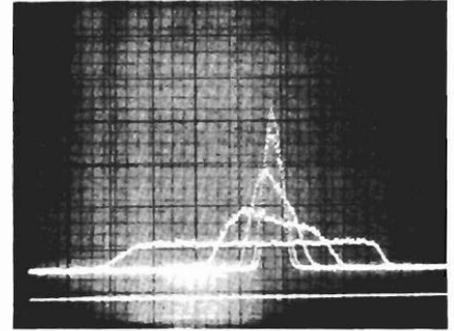


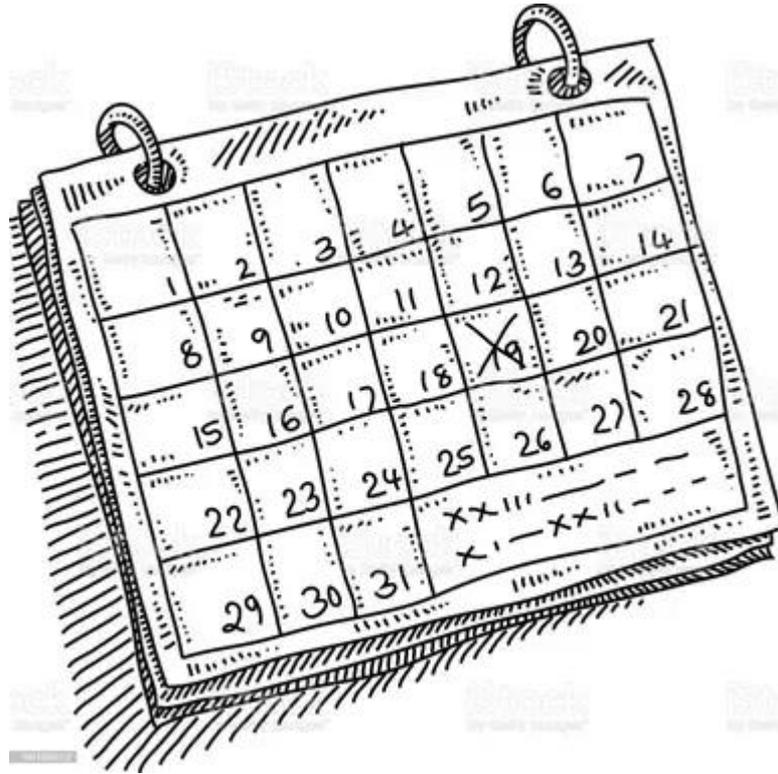
Fig. 3. Momentum cooling as obtained in the ICE experiment at CERN. Number of particles: 10^7 . These Schottky scans represent the square root of the density distributions. Successive scans were made at intervals of 1 minute.

Resultado

- El enfriamiento estocástico permitió aumentar la luminosidad del SppS, llevando al descubrimiento de los bosones W y Z .
- Simon van der Meer, inventor del método, recibió el premio Nobel de la Física junto con Carlo Rubbia en 1984

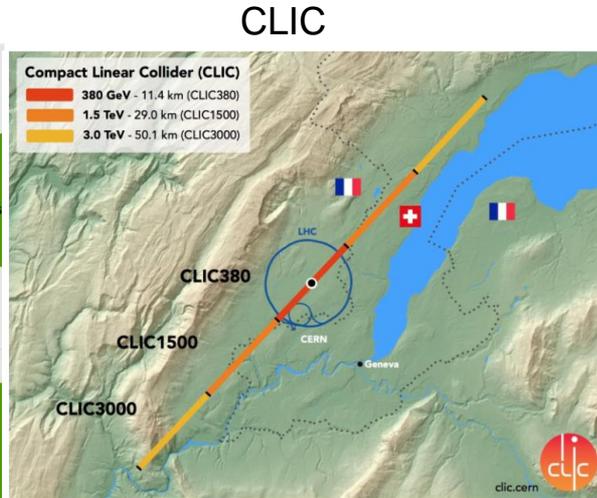
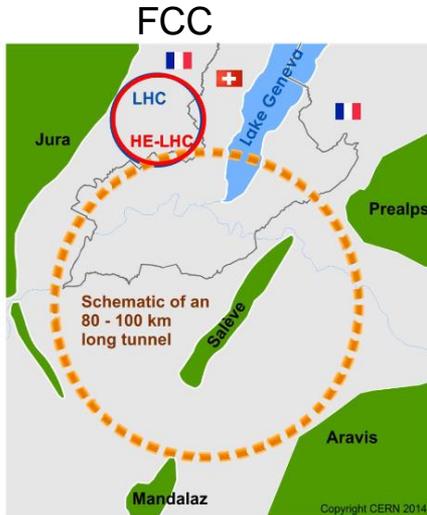


Futuro

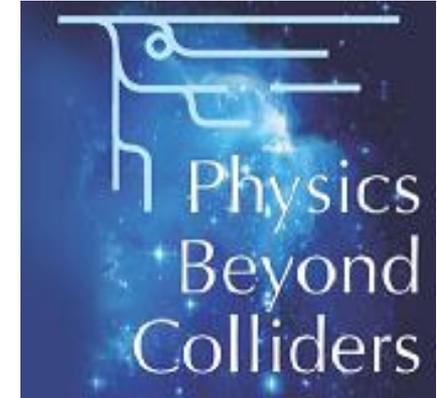


Física fundamental

Colisionadores



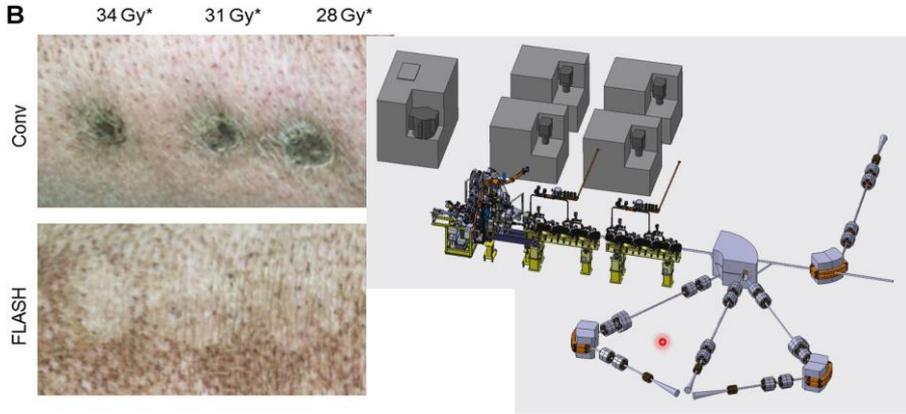
Más de 15 experimentos complementarios



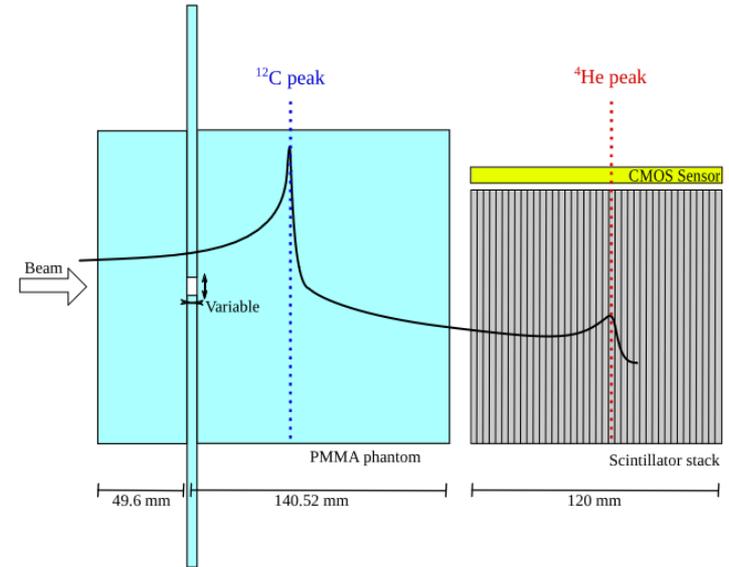
Terapia de cáncer

FLASH: Terapia en 100 ms

Mini-pig, Vozenin et al



Haces mixtos: terapia y diagnósticos al mismo tiempo



Otros

Limpieza de escape marítimo



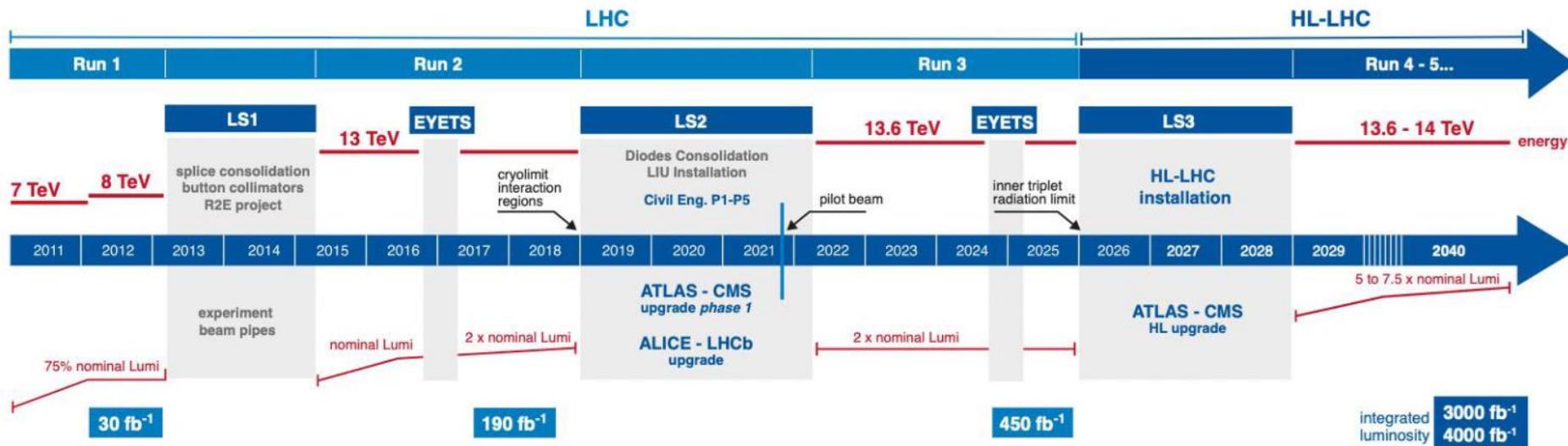
Cristalización de helados



Gracias :)



LHC / HL-LHC Plan

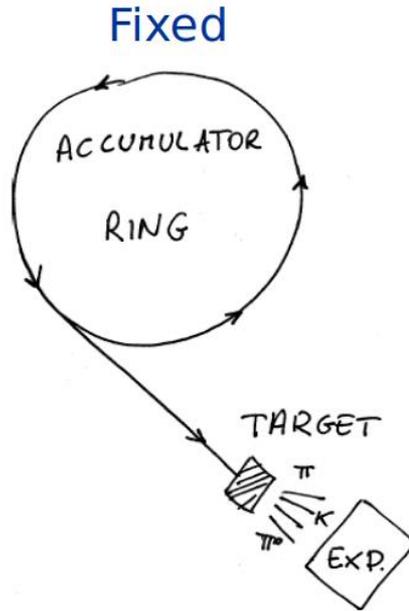


HL-LHC TECHNICAL EQUIPMENT:

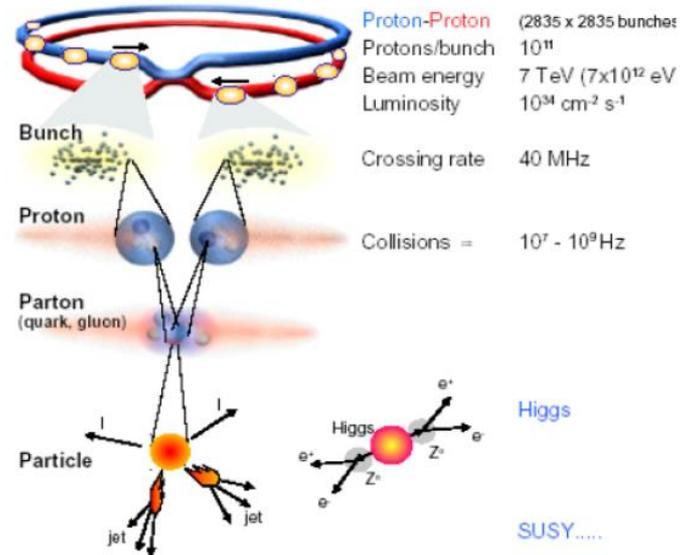


Coming back to the basic decision principles

Much of the energy is lost in the target and only part is used to produce secondary particles



Collider



All energy will be available for particle production

$$E_{CM} = \sqrt{2(E_{beam}mc^2 + m^2c^4)} \ll E_{CM} = 2(E_{beam} + mc^2) \quad \text{Isabel Bejar Alonso}$$