



Aceleradores de partículas

Spanish-language Teacher Programme, 23rd July 2024

Elena de la Fuente García (BE-ABP-CEI)

elena.de.la.fuente.garcia@cern.ch

¿Qué son?

¿Para qué?

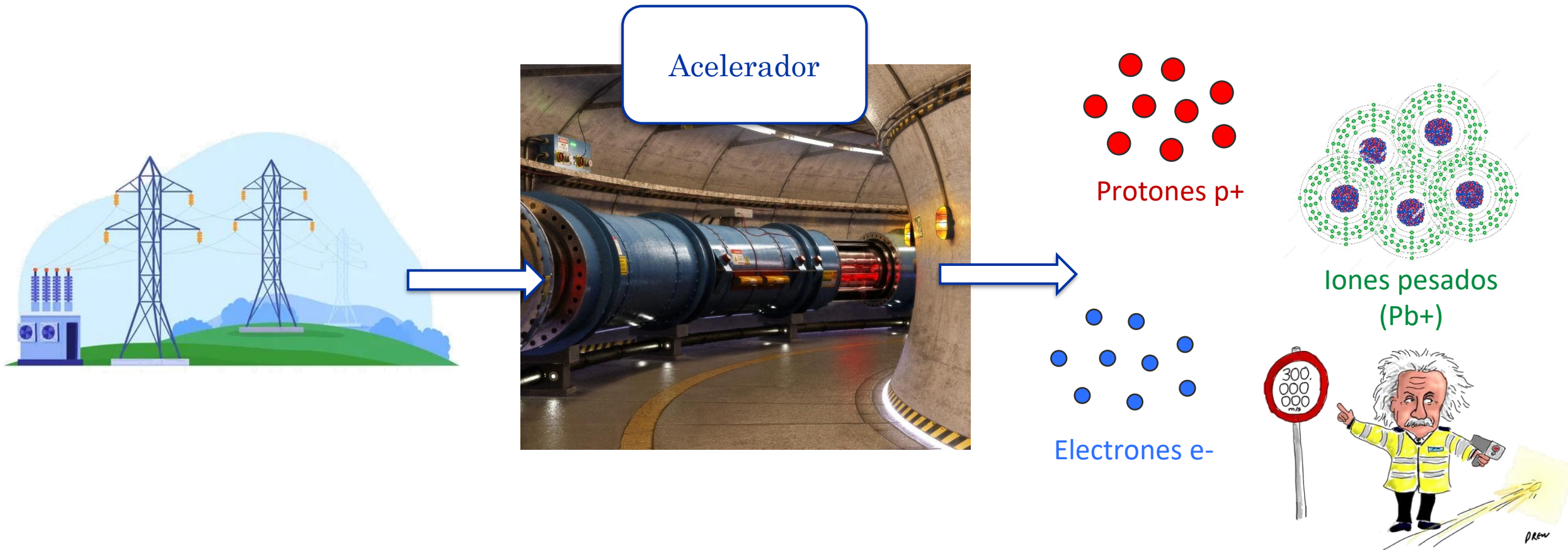


¿Cómo?

Paso a paso

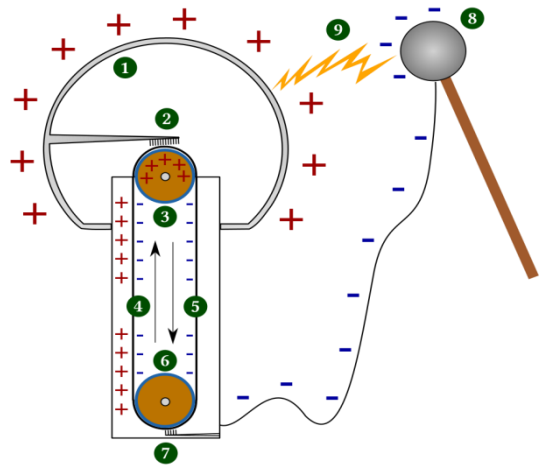
Aceleradores de partículas: ¿Qué son?

Máquinas que usando campos electro-magnéticos **aceleran partículas cargadas** (p^+ , e^- , iones) **a altas velocidades** y las **guían** manteniendo su trayectoria dentro del acelerador



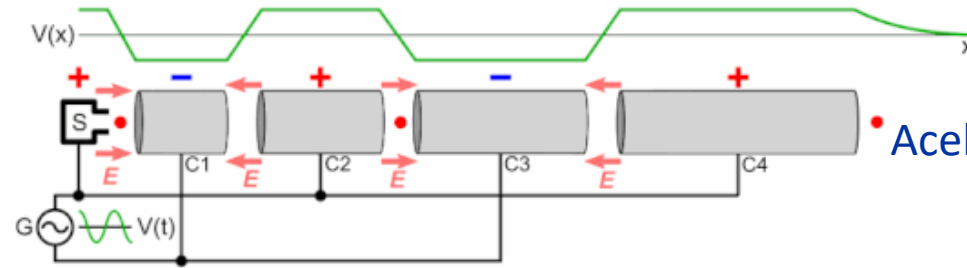
Aceleradores de partículas: ¿Qué son?

Van de Graaff Generator



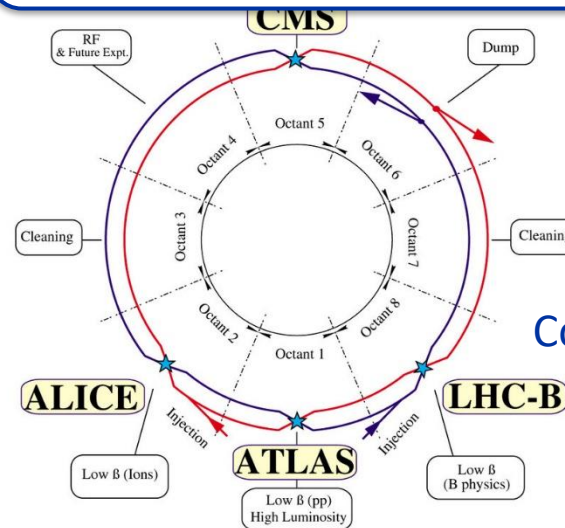
- 1. hollow metal sphere
- 2. upper electrode
- 3. upper roller (for example an acrylic glass)
- 4. side of the belt with positive charges
- 5. opposite side of belt, with negative charges
- 6. lower roller (metal)
- 7. lower electrode (ground)
- 8. spherical device with negative charges
- 9. spark produced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

Aceleradores electrostáticos
(1930s)



Aceleradores lineales
LINAC4, CERN

La tecnología usada depende de su aplicación y uso



Colisionadores
(LHC)

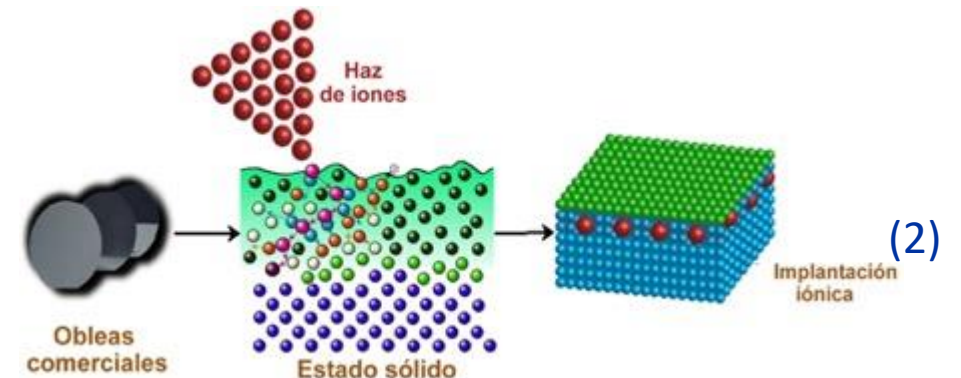
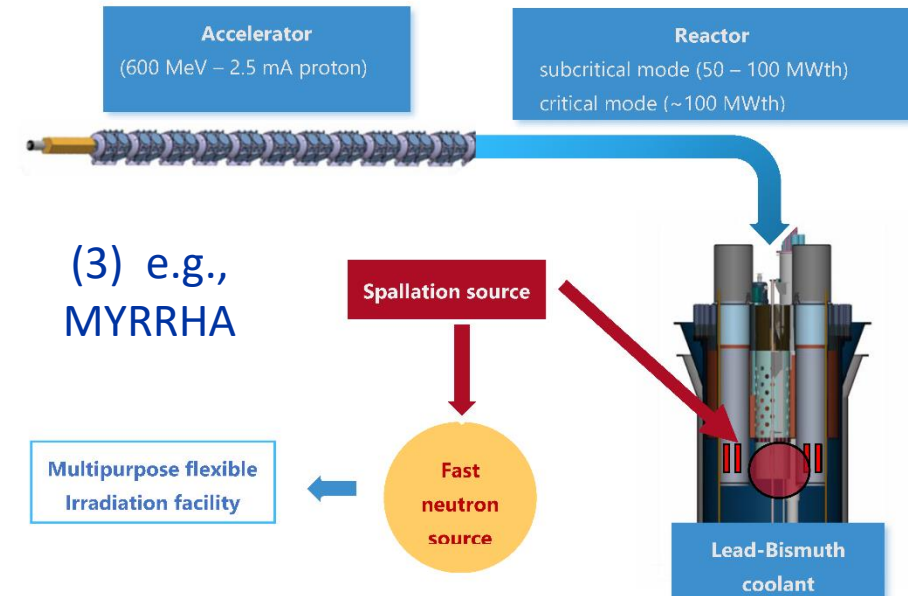
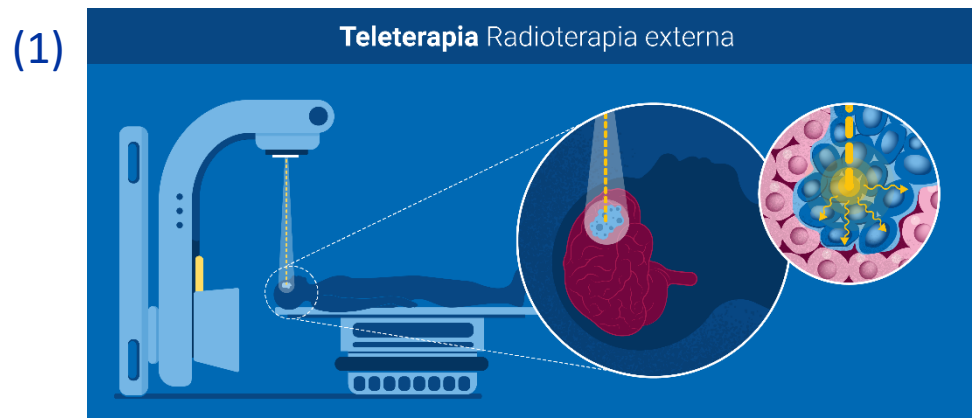


Sincrotrones
(Soleil, Paris)

Aceleradores de partículas: ¿Para qué?

Más de **30,000 aceleradores** en el mundo:

- 44% radioterapia (1)
- 41% implantación de iones (2)
- 9% aplicaciones industriales (3)
- 4% investigación de baja energía
- 1% producción de isótopos para medicina
- <1% investigación de la física fundamental



Aceleradores de partículas: ¿Para qué?

Protonterapia:

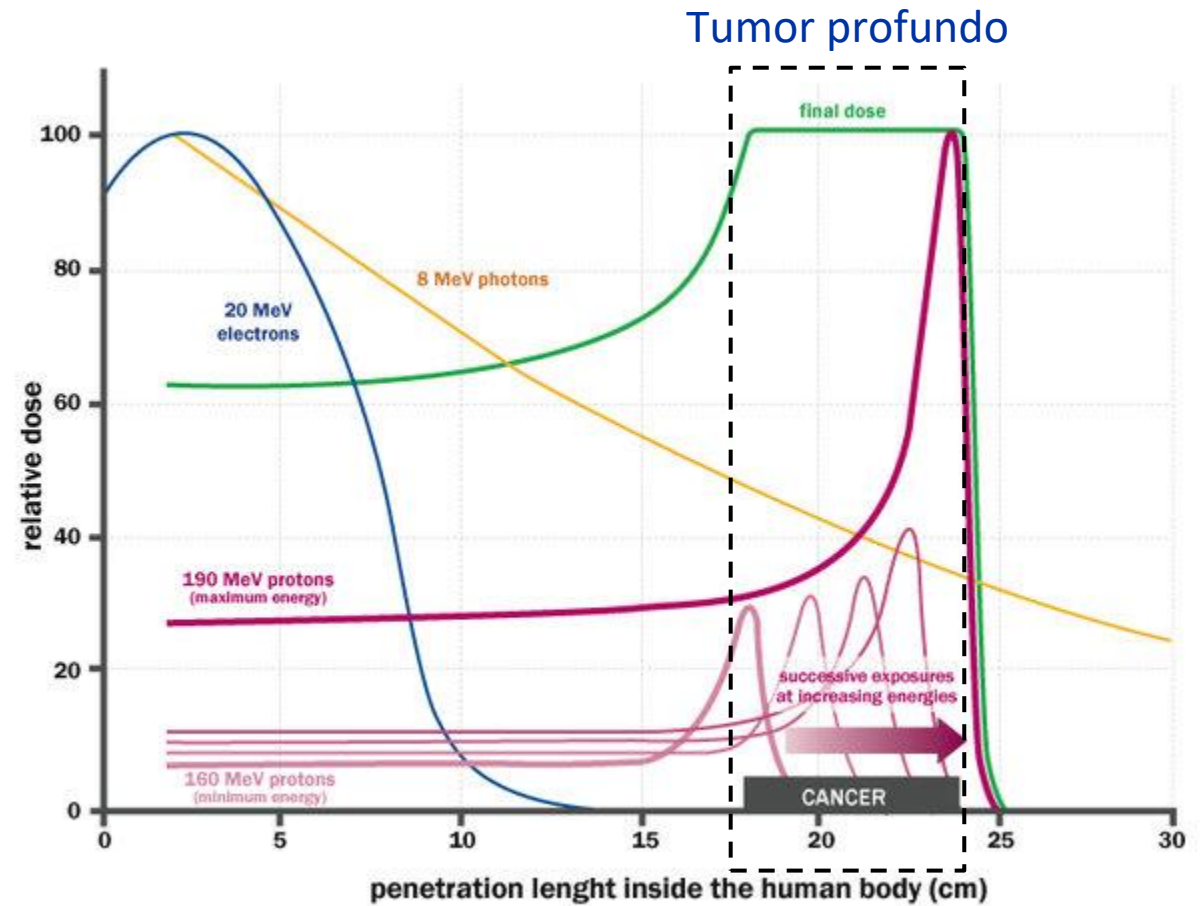
- El **cáncer** es la segunda causa de muerte más común.
- La **terapia con protones** permite aislar el daño celular en la zona del tumor, a diferencia de la radioterapia.
- **El CERN** colabora con centros (e.g. CNAO-MedAustron) y desarrolla nuevos diseños (NIMMS).

¿Cómo?

Cuando los protones penetran en un medio, **ionizan** los átomos y **pierden energía**: $\Delta E \propto \text{dose}$

El **pico de Bragg** ocurre justo antes de que los protones lleguen a $E \sim 0$, ya que $\Delta E \propto 1/\sqrt{v}$

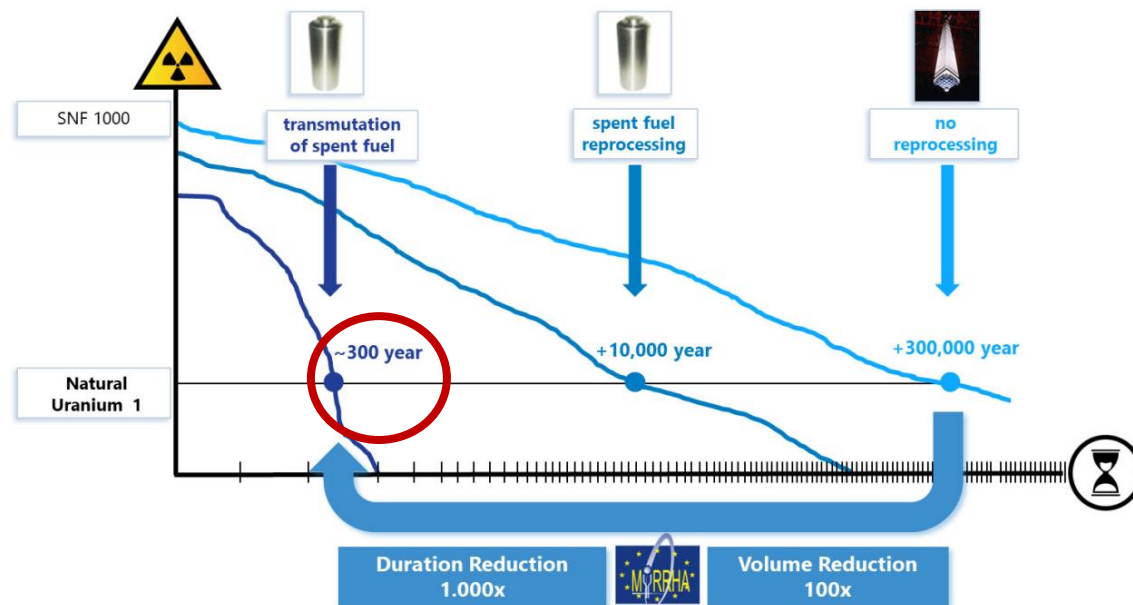
La **posición del pico** se puede controlar variando la energía inicial $E_{0,p+}$ (MeV) del haz



Aceleradores de partículas: ¿Para qué?

Tratamiento de residuos radiactivos:

- 422 reactores nucleares en operación en 33 países. 11% de la energía mundial
- Energía limpia de CO2 para luchar contra cambio climático (acuerdo COP28 3x energía nuclear 2050)
- **Generan residuos radiactivos** de larga vida (10,000 años)



*SNF = Spent Nuclear Fuel

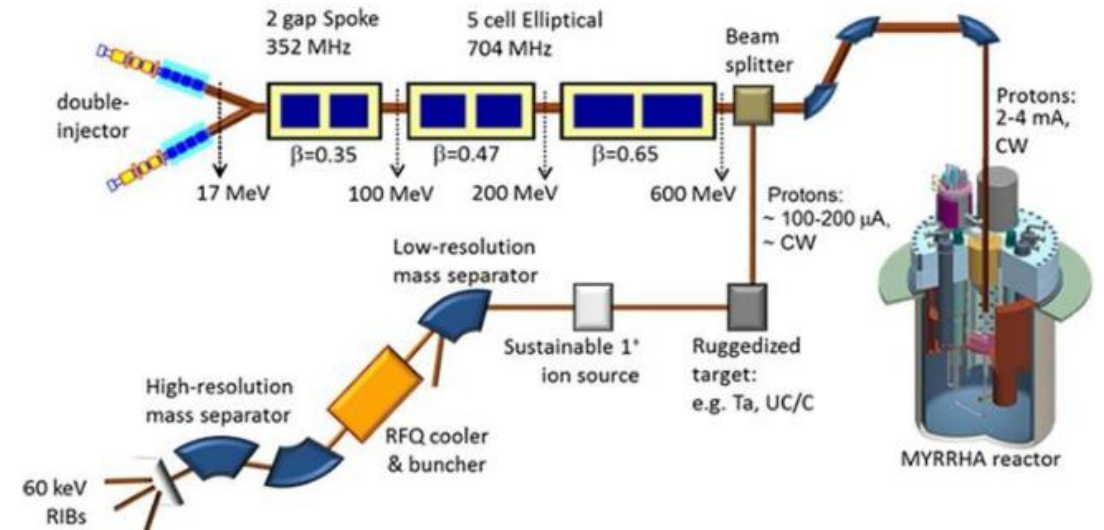


Figure 1: Layout of the MYRRHA proton driver.

¿Cómo?

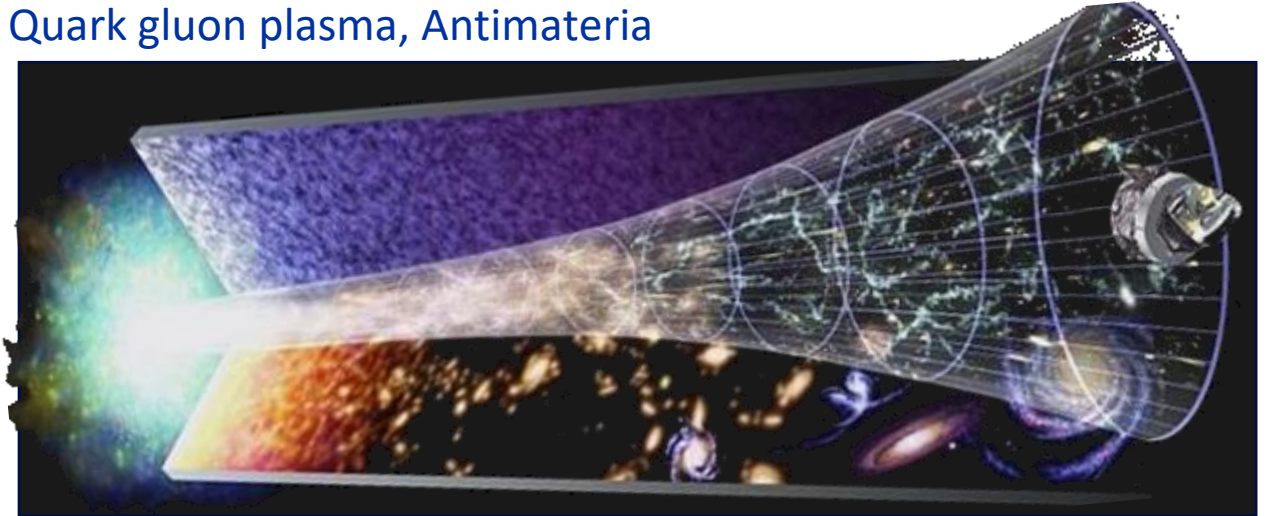
Con la **tecnología ADS** (Accelerator Driven System) como en MYRRHA se pueden **transmutar los residuos radiactivos** (transformarlos en otro elemento) reduciendo su **vida media a ~300 años**

Aceleradores de partículas: ¿Para qué?

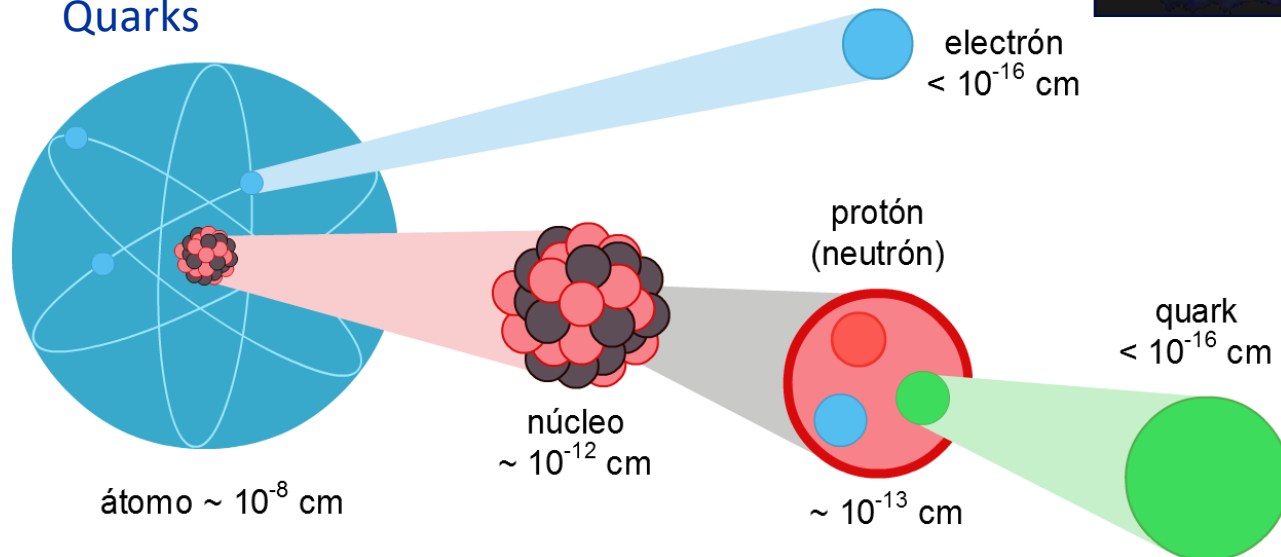
En el CERN... física fundamental

- Estudiar lo más grande: **el universo**
- A través de lo más pequeño: **las partículas fundamentales** y sus interacciones

Quark gluon plasma, Antimateria



Quarks

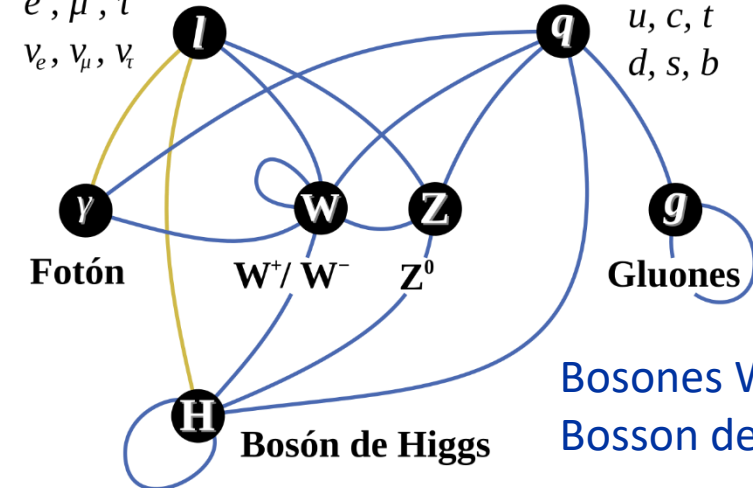


Leptones

e, μ, τ
 ν_e, ν_μ, ν_τ

Quarks

u, c, t
 d, s, b



Aceleradores de partículas: ¿Para qué?

En el CERN... física fundamental

- Empujar las fronteras de la física de altas energías da pie a nueva tecnología



Colaboración internacional



Creación de la World Wide Web (WWW)

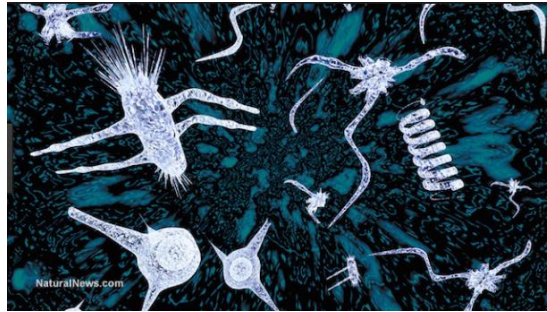


Estudiar lo más pequeño: ¿Cómo?

Queremos estudiar lo extraordinariamente pequeño... Necesitamos **extraordinaria resolución**

Ejemplo:

Colonia de bacterias/células
Tamaño (λ)
 $10^{-5} - 10^{-7} \text{ m}$



mm = 10^{-3} m

$\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$

nm = 10^{-9} m

pm = 10^{-12} m

fm = 10^{-15} m

am = 10^{-18} m

Visible a nuestros

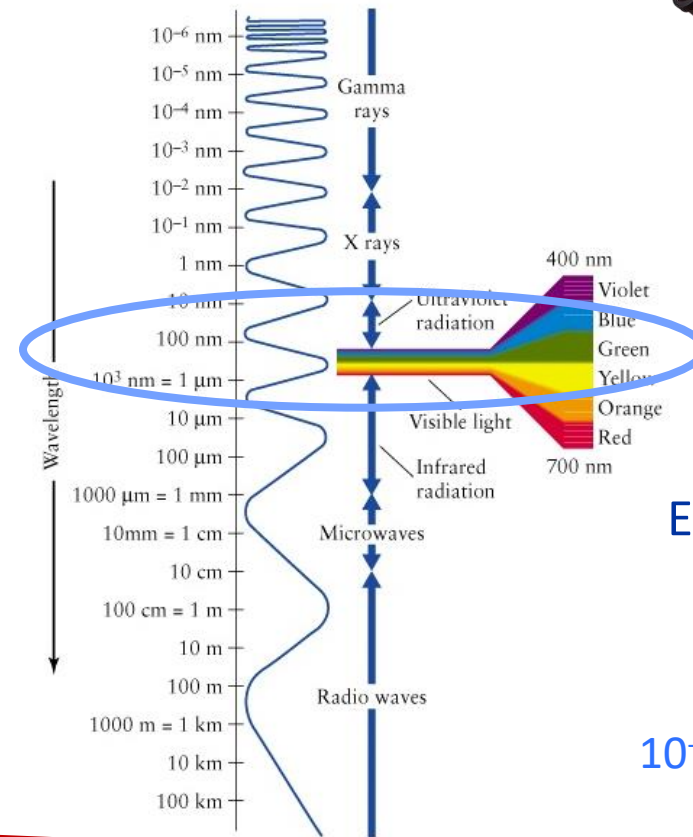


Longitud de onda de la luz

→ $R_{\text{atoms}} \sim 30 - 300 \text{ pm} (0.03 - 3 \text{ \AA})$

→ $R_{\text{nucleus}} \sim 1 - 10 \text{ fm}$

→ Quarks - leptons



Equivalencia en energía:

$$E = \frac{hc}{\lambda\beta}$$

$10^{-5} - 10^{-7} \text{ m} \rightarrow 0.1 \text{ eV} - 10 \text{ eV}$

$<10^{-18} \text{ m} \rightarrow 10^{12} \text{ eV} \rightarrow \text{TeV}$

(Wavelength image from Universe by Freedman and Kaufmann.)

β = ratio velocidad v / velocidad luz c

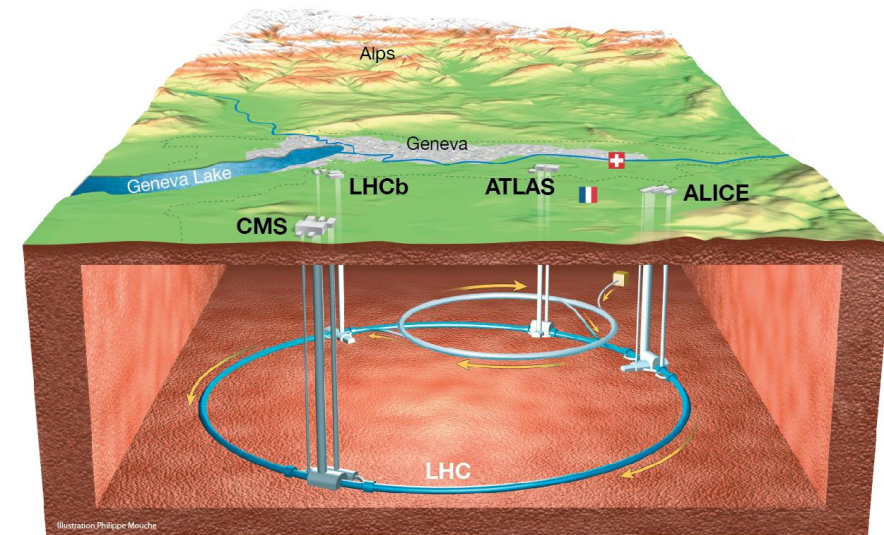
h = cte. Planck $6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Estudiar lo más pequeño: ¿Cómo?

	Size (m)	Size	Beam energy	Instrument
Aggregate of molecules: cell/bacteria	10^{-5}	10 micro meter	0.1 eV	Optical microscope
	10^{-7}	100 nano meter	10 eV	
Aggregate of atoms: molecules	10^{-9}	1 nano meter	1 keV	Electron microscope
Atoms: nucleus+electrons	10^{-10}	0.1 nano meter	10 keV	Synchrotron radiation
Nucleus (Oxygen: 8p+8n)	10^{-14}	0.01 pico meter	>100 MeV	Low energy e- or p+ accelerator
Aggregate of quarks: hadrons	10^{-15}	1 femto meter	> 1 GeV	High energy p+ accelerator
Quarks+leptons	10^{-18}	1 atto meter	> 1 TeV	High energy e- or p+ collider

Resolución récord mundial:

Large Hadron Collider (LHC)



27 km de circunferencia

6.8 TeV energía

Colisiones a 13.6 TeV p+p+

Aceleración: ¿Cómo?

Campo electrico E:

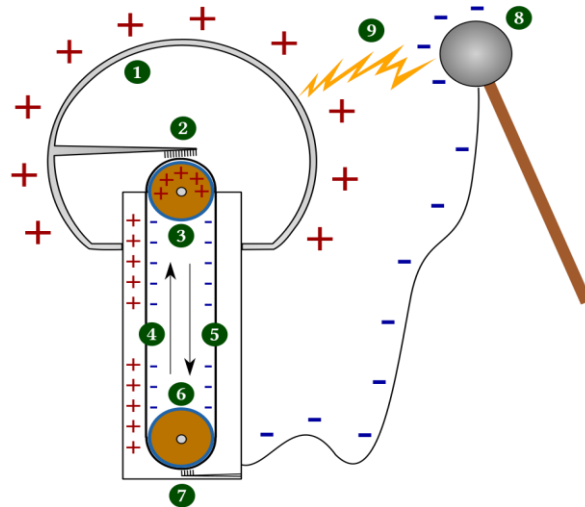
$$\Delta Energy = \int_{s1}^{s2} F ds = \int_{s1}^{s2} qE_{electric} ds$$

Aceleradores electrostáticos

(max. 10 MV)

$$\Delta E = qV$$

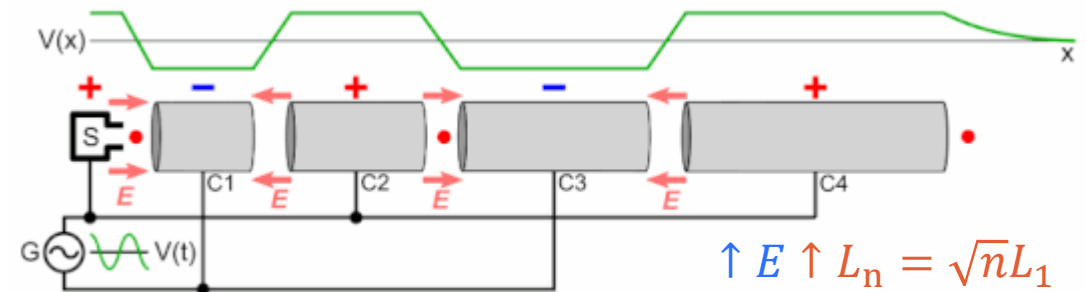
Van de Graaff Generator



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

Aceleradores lineares:

- Usan drift tubes y un campo E alterno
- Usados en el CERN para las primeras etapas de aceleración



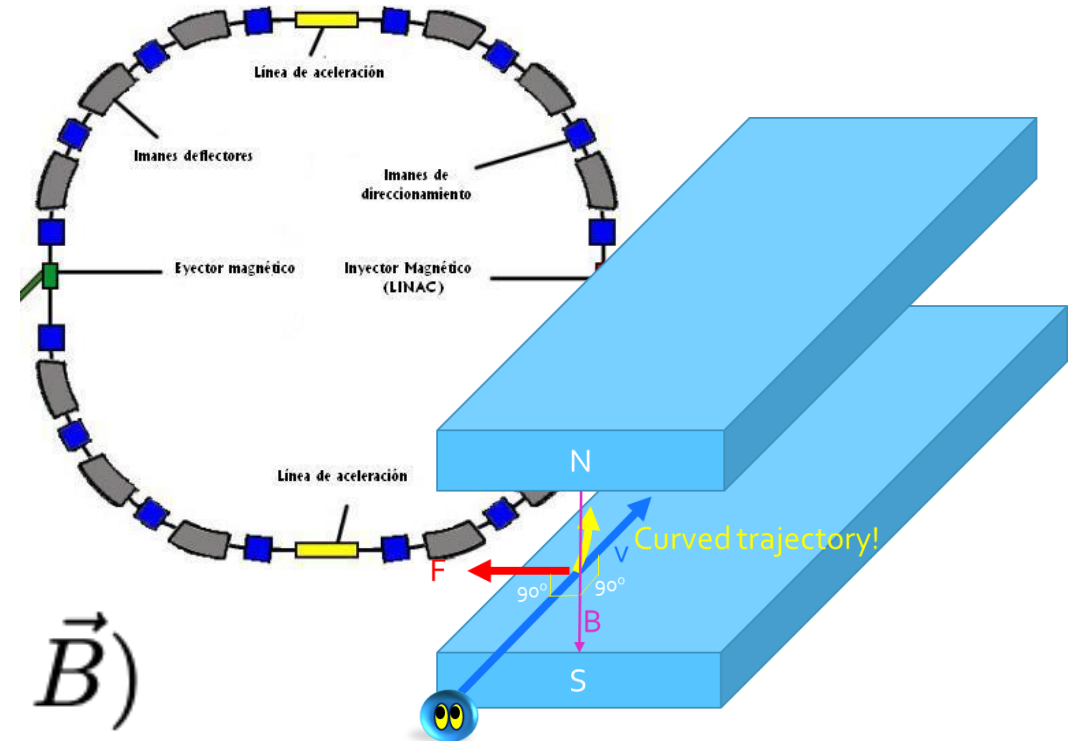
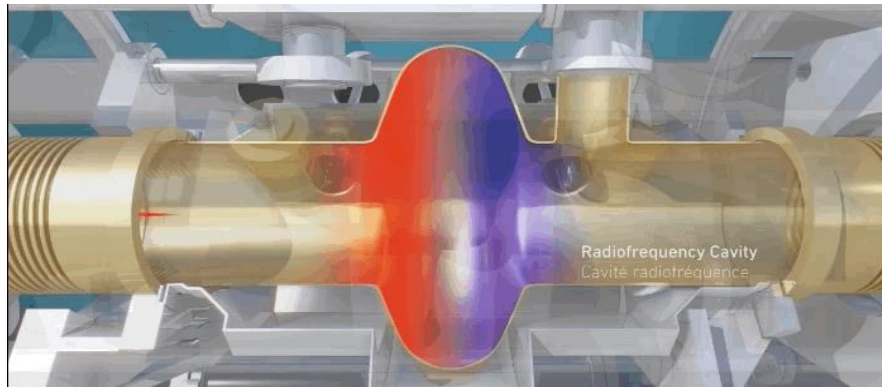
$$\Delta Energy = qV = qV_{max} \sin \varphi_0$$

Aceleradores circulares:

¡pasan multiples veces por la aceleración!

Aceleradores circulares: ¿Cómo?

La fuerza de Lorentz al rescate:



$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

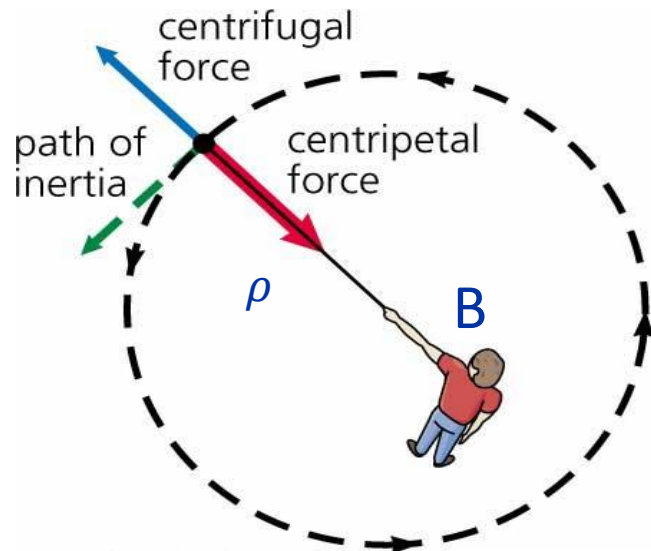
Movimiento Longitudinal

Fuerza actúa en la dirección del movimiento.
Efectivo para ACELERAR partículas cargadas.

Movimiento Transversal

Fuerza actúa en la dirección perpendicular al movimiento.
Efectivo para controlar la órbita y guiar.

Imanes para curvar: Dipolos



Campo magnetico B:

$$F_{Lorentz} = q \cdot v \cdot B = F_{centrifuga} = \frac{m \cdot v^2}{\rho}$$

ρ: radio de curvatura [m]
 m: masa de la particular [kg]
 v: velocidad de la particular [m/s]
 p: momento [eV/c]

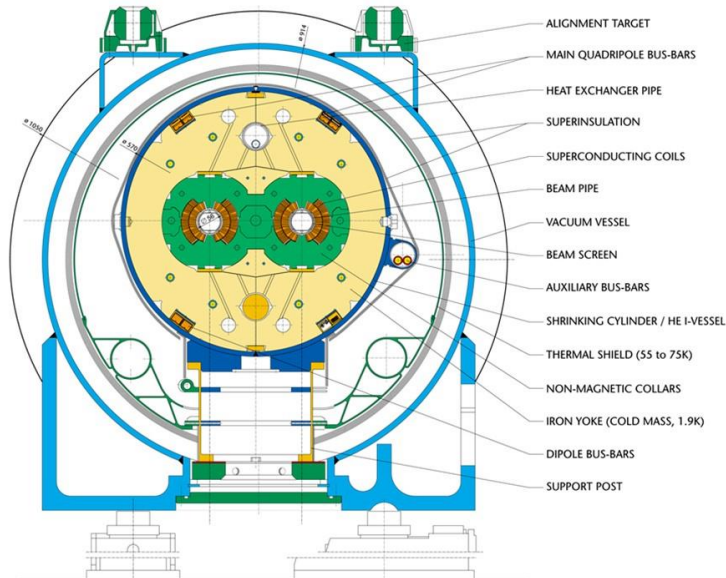
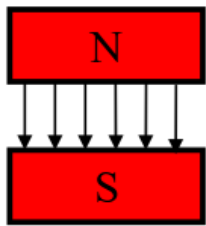
$$B\rho = \frac{p}{q}$$

Beam rigidity:

Para mantener la circunferencia ρ cte el campo magnetico debe aumentar con la velocidad de las particulas

Mechanical equivalent

dipole

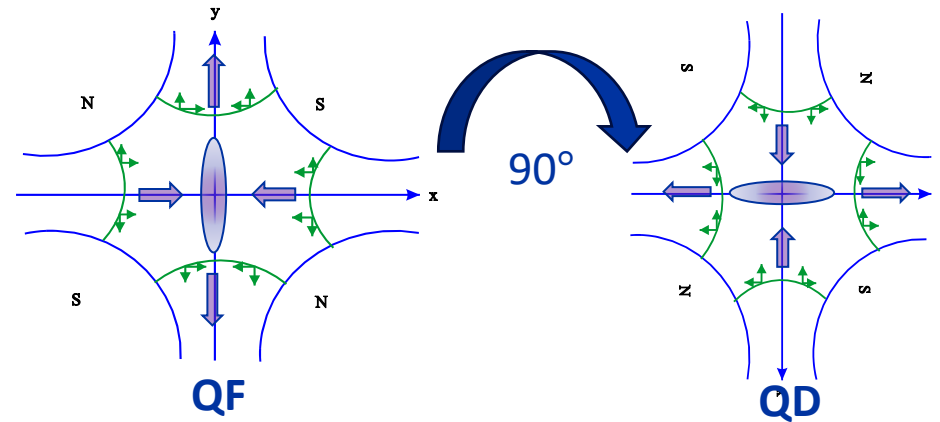
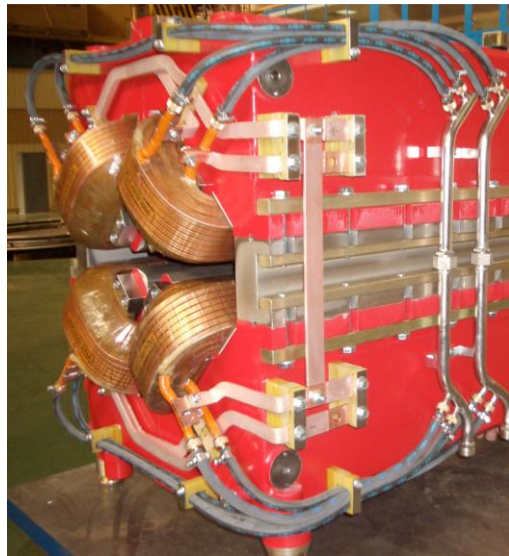


En el LHC...

- 11800 Amperios circulan por los cables para generar un campo magnético de 8.33 T (estado del arte)
- Los cables estan formados de hilos superconductores de Niobio-Titanio, enfriados a 1.9 K.
- 1232 dipolos de 15 m cubren el 66% del anillo

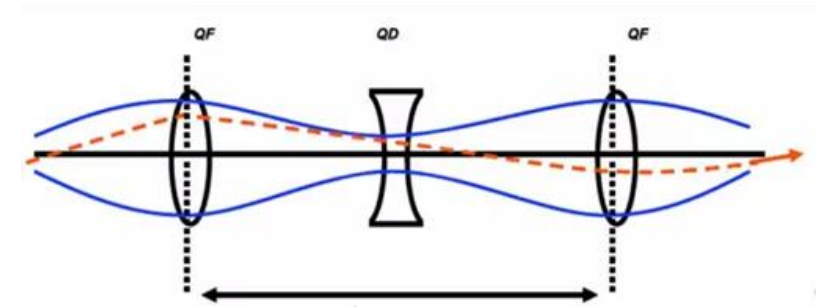
Imanes para enfocar: Quadrupolos

- Un haz de partículas tiende a **defocalizarse transversalmente**. Este efecto **se corrige con cuadrupolos**
- El campo que focaliza en dirección vertical, defocaliza con la misma fuerza en dirección horizontal (y viceversa)

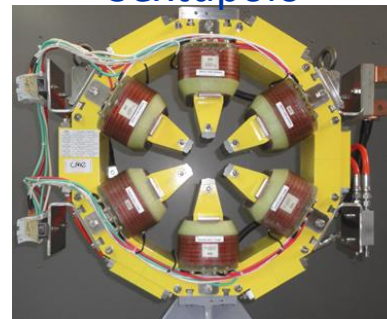


El tamaño transversal del haz se mantiene alternando cuadrupolos:
QF -> dipolo -> QD -> dipolo

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



Sextupolo



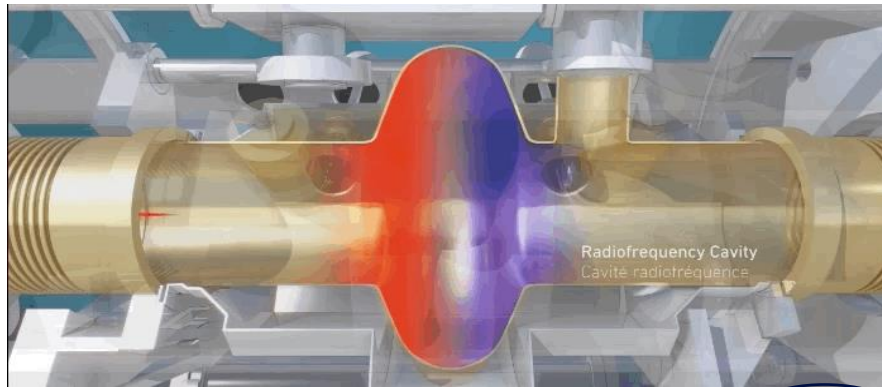
También hay imanes de mayor orden:

Sextupolos, Octupolos...

Para corregir efectos no lineales indeseados

Aceleradores circulares: ¿Cómo?

La fuerza de Lorentz al rescate:



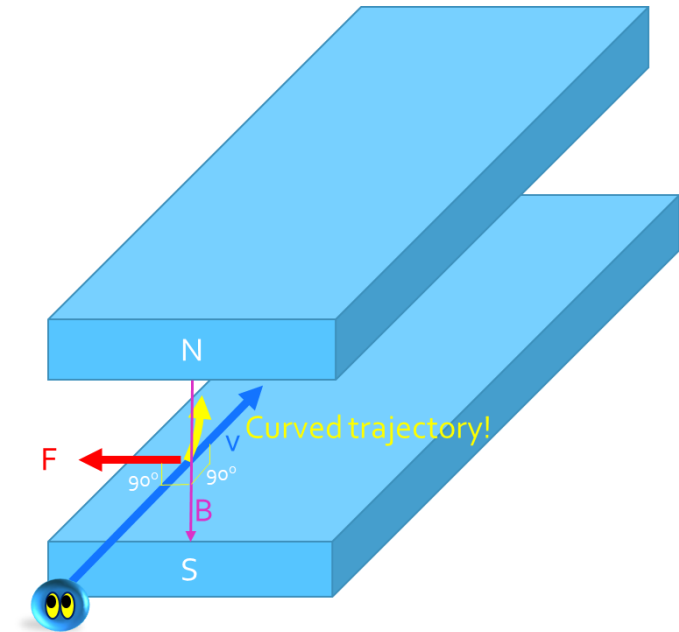
$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \underline{e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})}$$

Movimiento Longitudinal

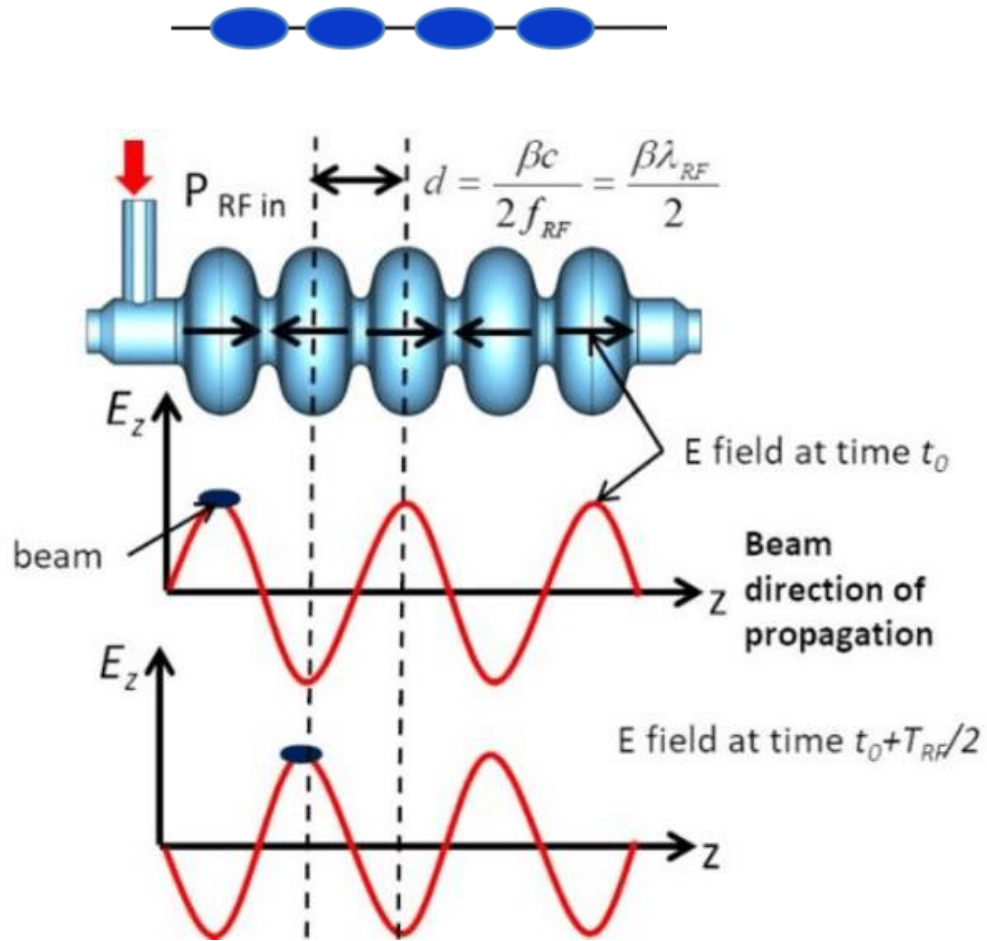
Fuerza actúa en la dirección del movimiento.
Efectivo para ACELERAR partículas cargadas.

Movimiento Transversal

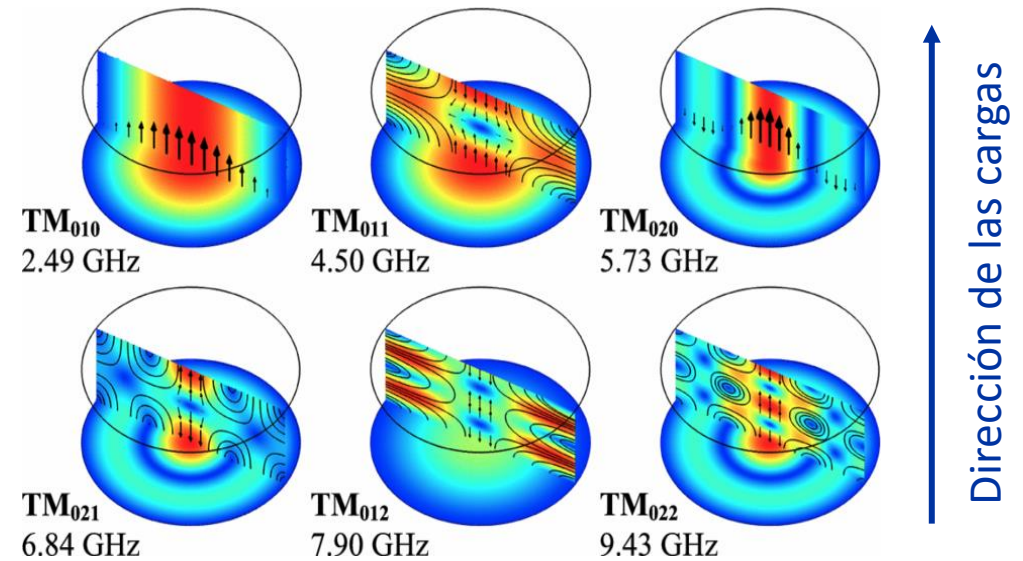
Fuerza actúa en la dirección perpendicular al movimiento.
Efectivo para controlar la órbita y guiar.



Cavidades de radiofrecuencia



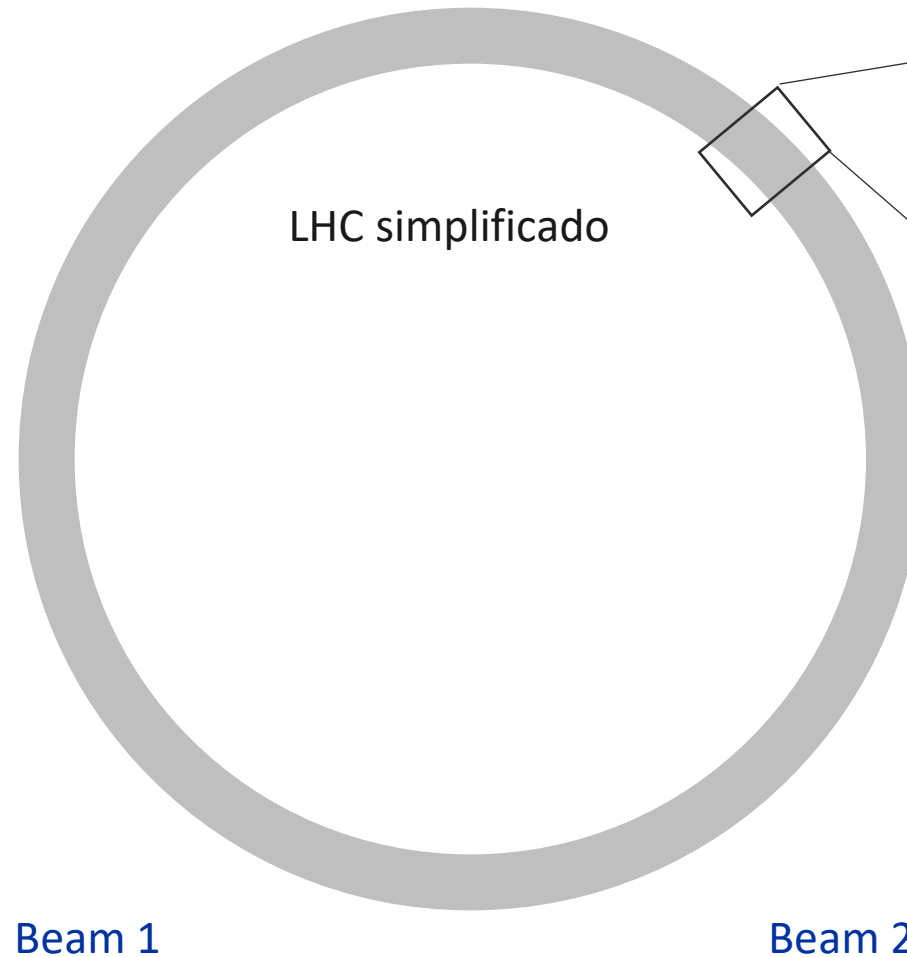
- Los **protones se agrupan en paquetes o bunches**
- El **campo eléctrico E** se invierte mientras pasan las partículas, siempre ven una **aceleración positiva +**
- **Para ello, la frecuencia se adapta a la energía**
- La geometría de las cavidades solo permiten ciertas ondas electromagnéticas que coinciden con la frecuencia de paso de las cargas



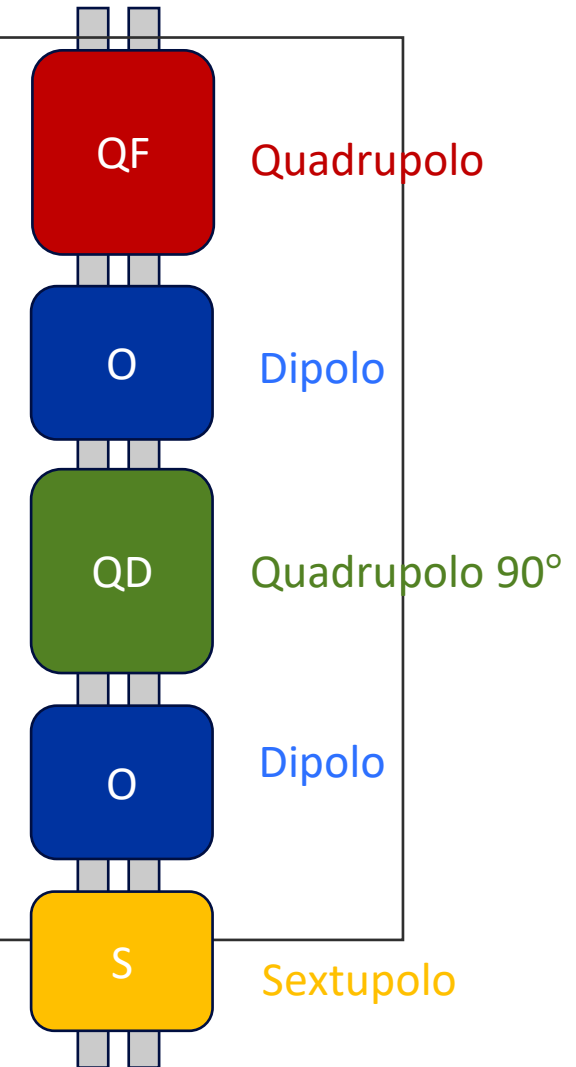
El colisionador LHC: Paso a paso

Acelerador circular

Necesitamos **imanes** para mantener la **trayectoria curva**

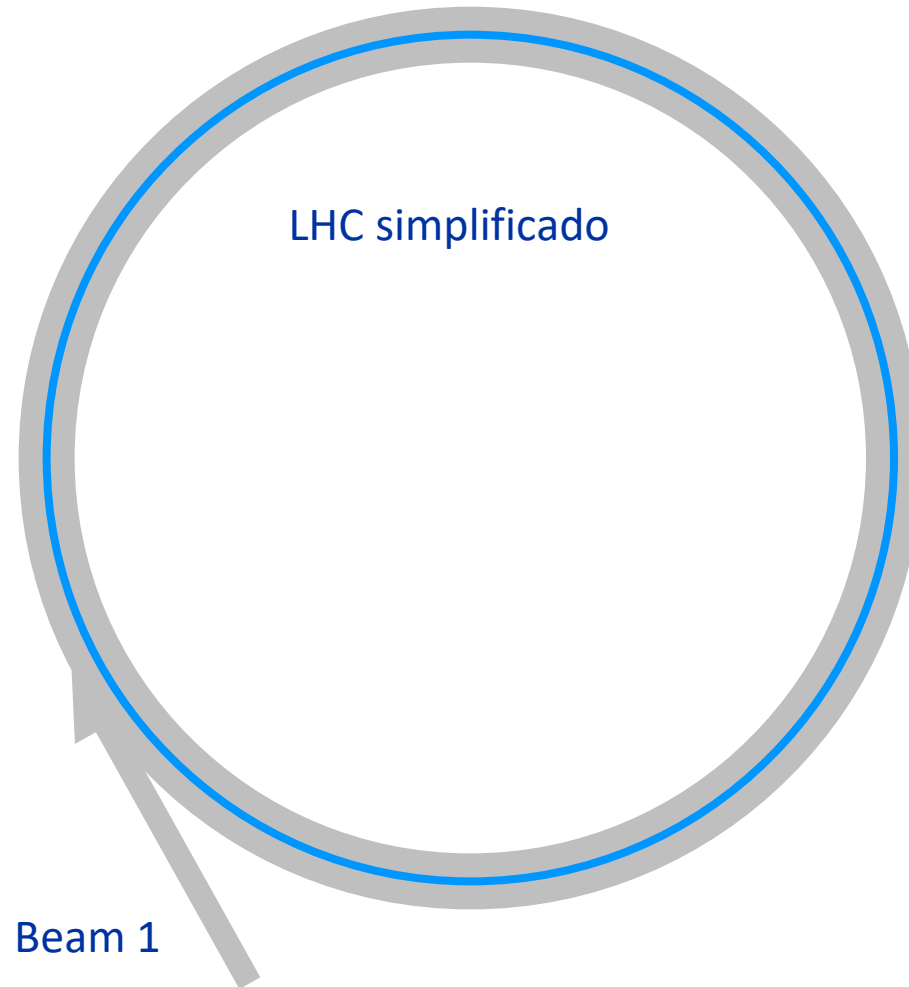


E.g.,



El colisionador LHC: Paso a paso

Inyección y llenado del
acelerador
Beam 1

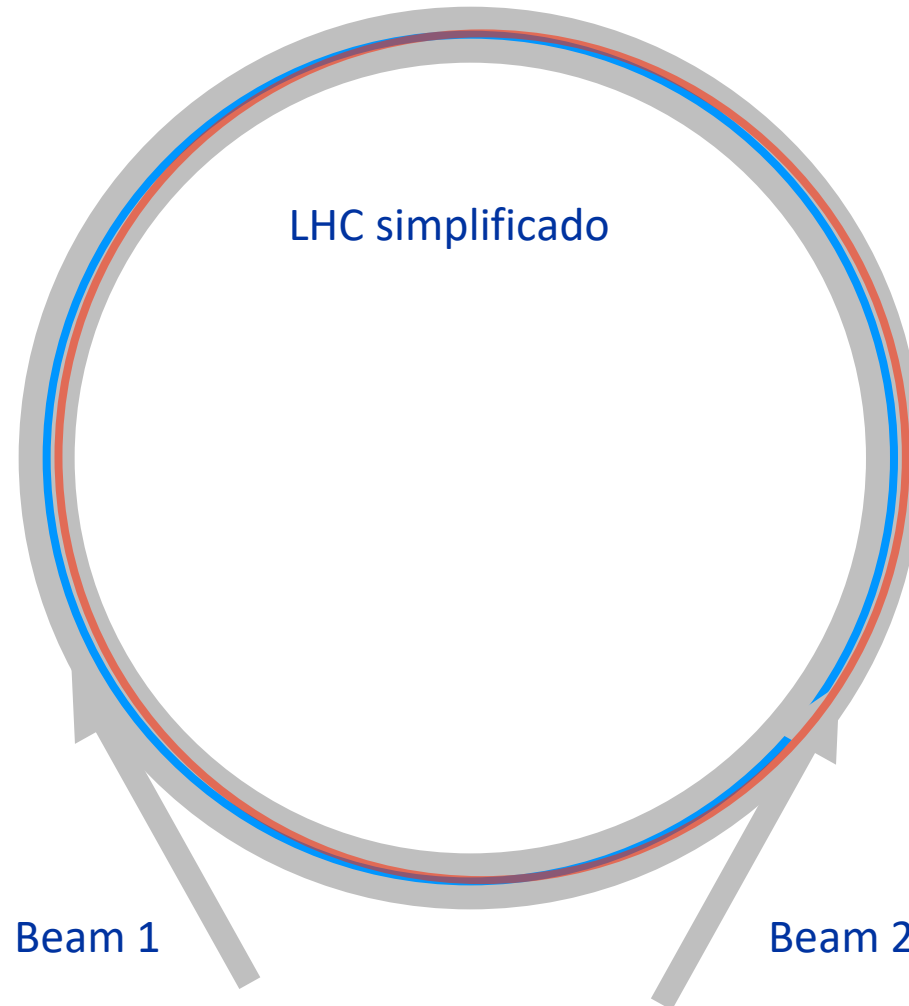


El colisionador LHC: Paso a paso

Inyección y llenado del
acelerador

Beam 1

Beam 2

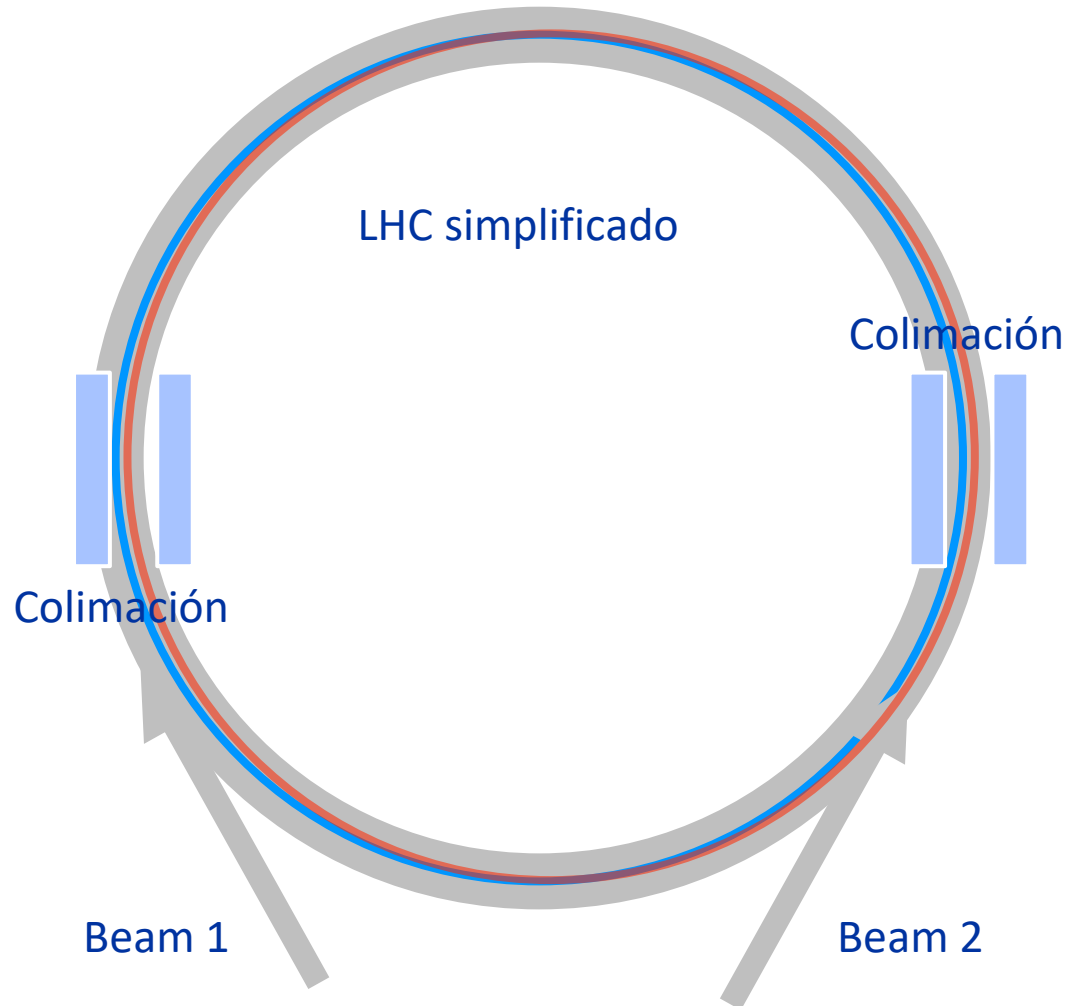


El colisionador LHC: Paso a paso

Inyección y llenado del
acelerador

Beam 1

Beam 2



Colimación:

Como el diafragma de una cámara fotográfica varios colimadores se encadenan para limitar el tamaño del haz

El colisionador LHC: Paso a paso

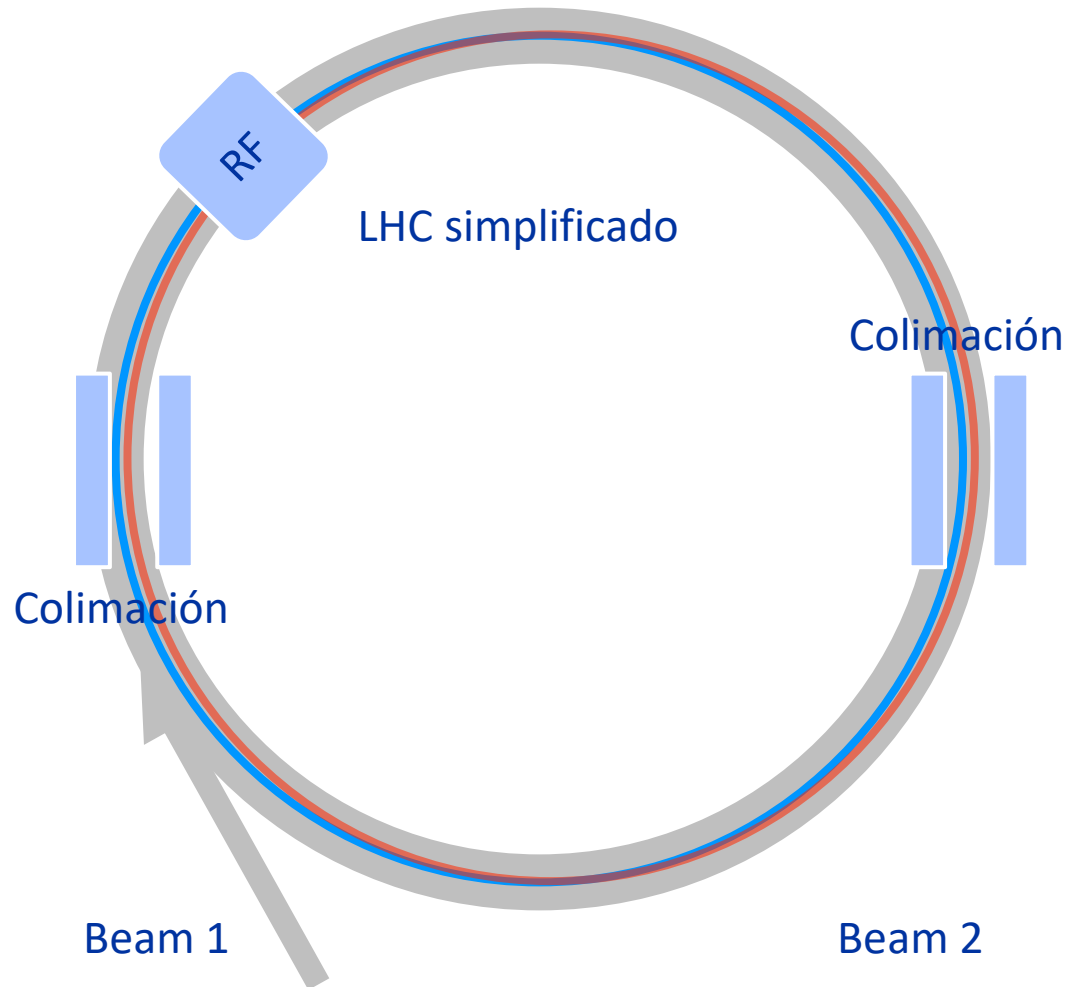
Inyección y llenado del acelerador

Beam 1

Beam 2

Radio Frecuencia:

Aceleración, los haces ganan energía cada vez que pasan por la cavidades.



Colimación:

Como el diafragma de una cámara fotográfica varios colimadores se encadenan para limitar el tamaño del haz

El colisionador LHC: Paso a paso

Inyección y llenado del acelerador

Beam 1

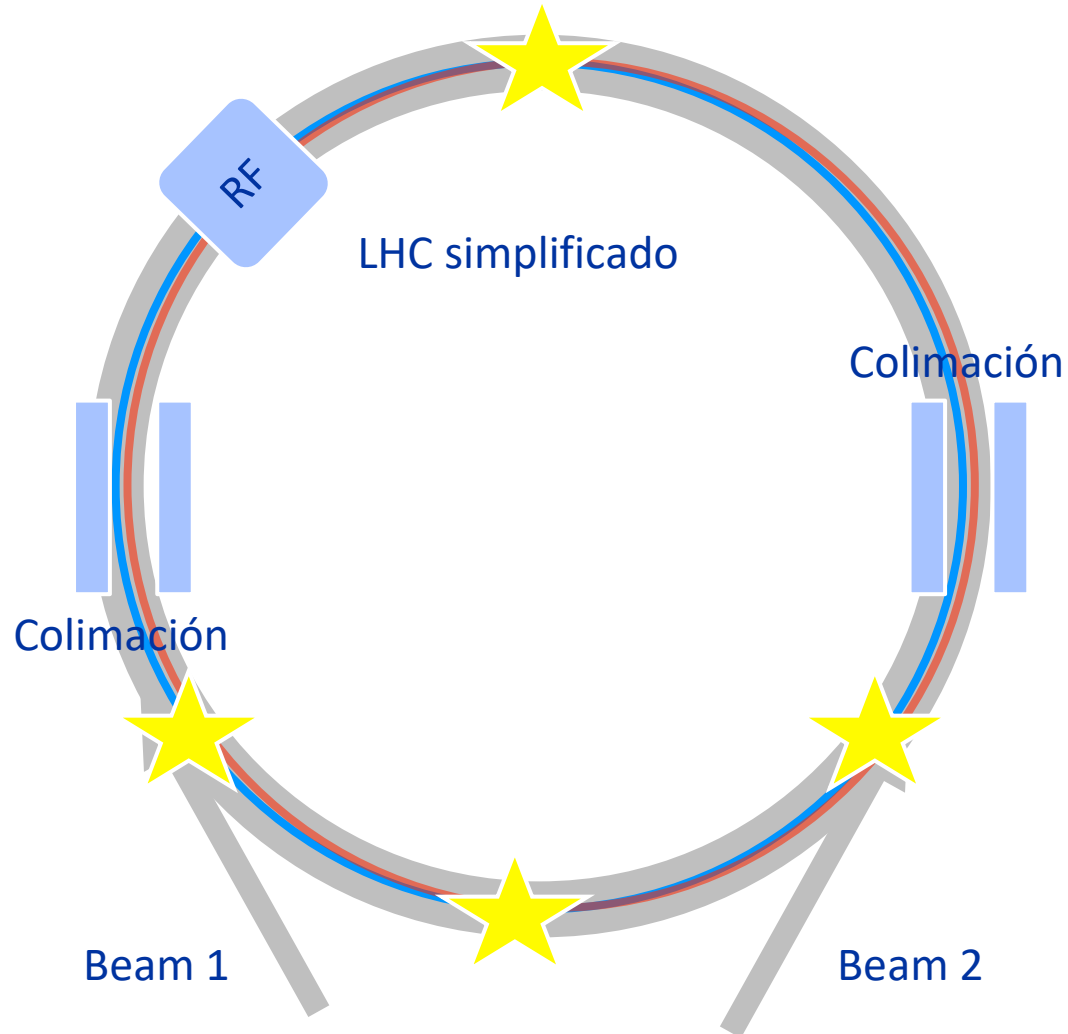
Beam 2

Radio Frecuencia:

Aceleración, los haces ganan energía cada vez que pasan por la cavidades.

Colisiones:

La orbita de los haces es guiada en los puntos de interacción para producir colisiones



Colimación:

Como el diafragma de una cámara fotográfica varios colimadores se encadenan para limitar el tamaño del haz

Los haces pueden circular durante horas o días, proporcionando datos a los experimentos

El colisionador LHC: Paso a paso

Inyección y llenado del acelerador

Beam 1

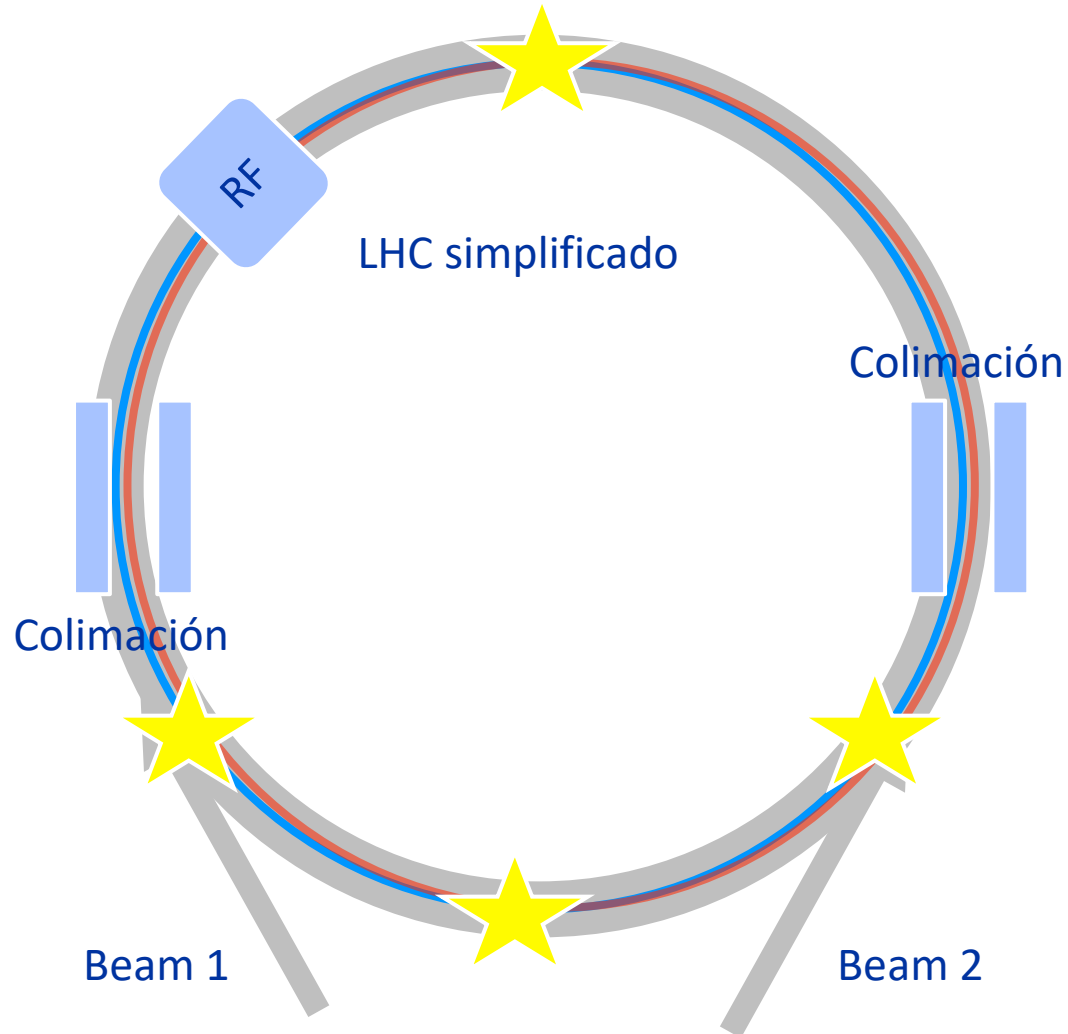
Beam 2

Radio Frecuencia:

Aceleración, los haces ganan energía cada vez que pasan por la cavidades.

Colisiones:

La orbita de los haces es guiada en los puntos de interacción para producir colisiones



Colimación:

Como el diafragma de una cámara fotográfica varios colimadores se encadenan para limitar el tamaño del haz

Los haces pueden circular durante horas o días, proporcionando datos a los experimentos

El colisionador LHC: Paso a paso

Inyección y llenado del acelerador

Beam 1

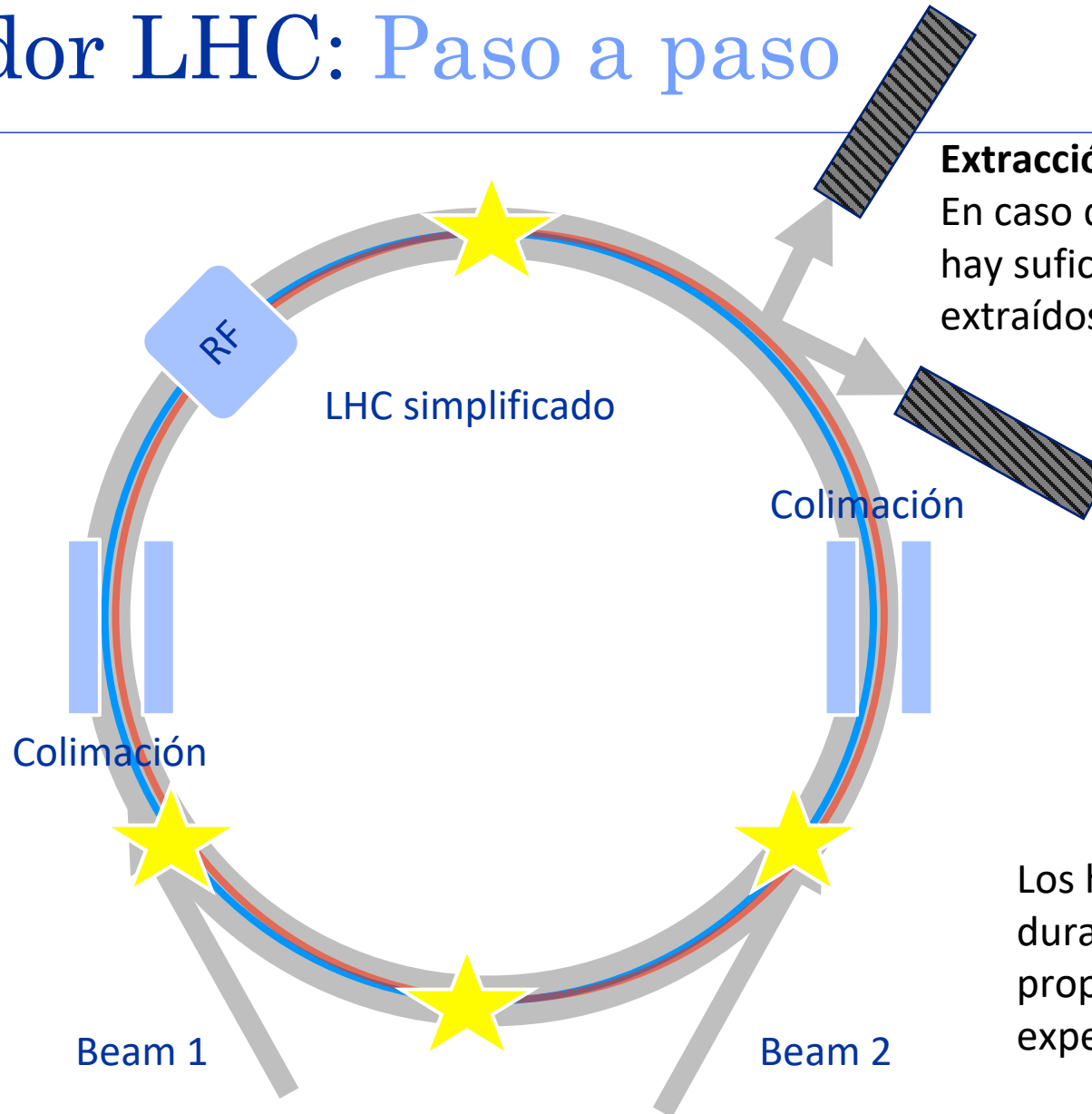
Beam 2

Radio Frecuencia:

Aceleración, los haces ganan energía cada vez que pasan por la cavidades.

Colisiones:

La orbita de los haces es guiada en los puntos de interacción para producir colisiones



Extracción:

En caso de emergencia o cuando ya no hay suficientes colisiones los haces son extraídos por medio de Kicker magnets

Colimación:

Como el diafragma de una cámara fotográfica varios colimadores se encadenan para limitar el tamaño del haz

Los haces pueden circular durante horas o días, proporcionando datos a los experimentos

El colisionador LHC: Paso a paso

Inyección y llenado del acelerador

Beam 1

Beam 2

Radio Frecuencia:

Aceleración, los haces ganan energía cada vez que pasan por la cavidades.

Colisiones:

La orbita de los haces es guiada en los puntos de interacción para producir colisiones



Extracción:

En caso de emergencia o cuando ya no hay suficientes colisiones los haces son extraídos por medio de Kicker magnets

Colimación:

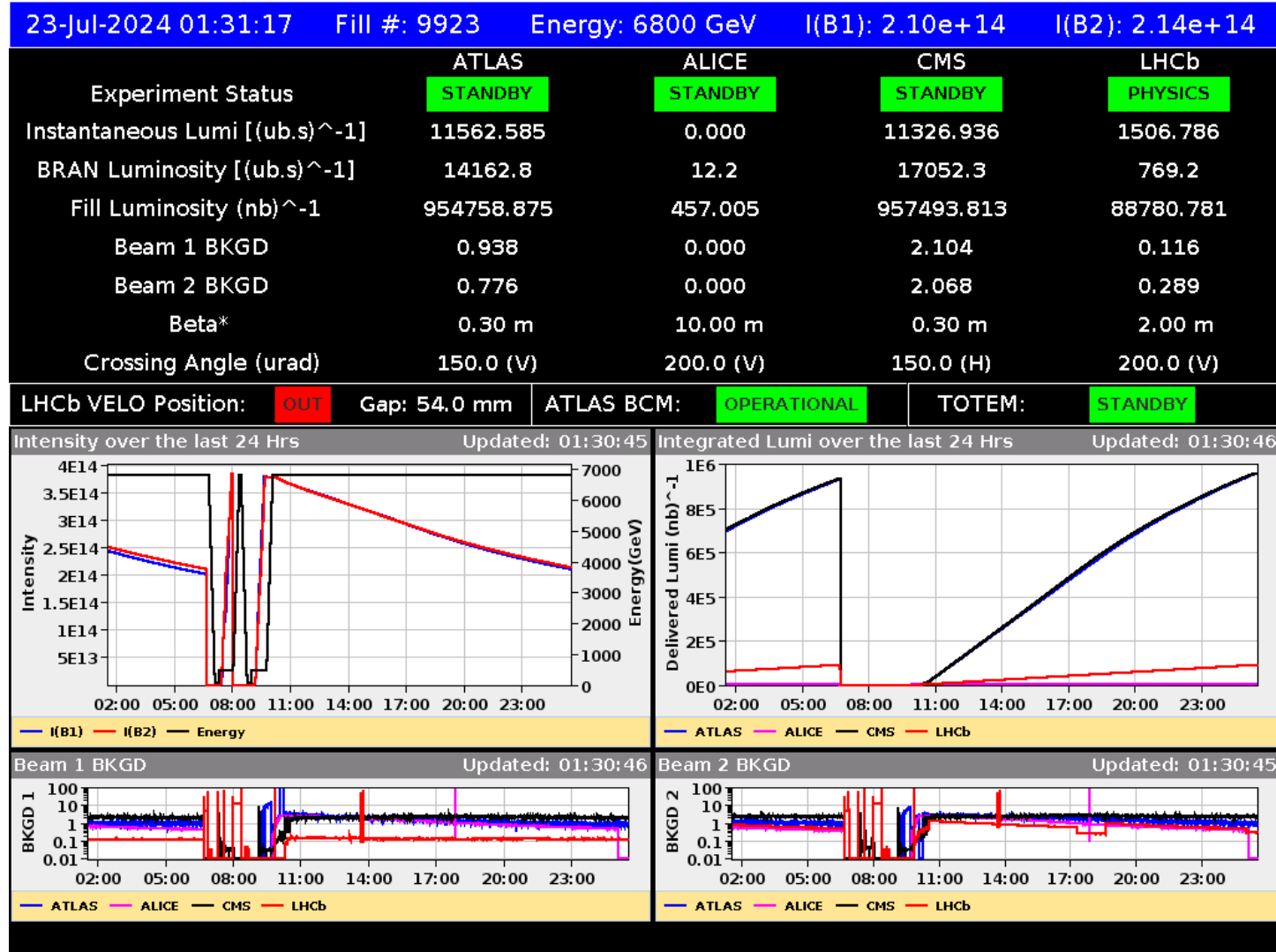
Como el diafragma de una cámara fotográfica varios colimadores se encadenan para limitar el tamaño del haz

Los haces pueden circular durante horas o días, proporcionando datos a los experimentos

LHC On Air



Vistar



Colisiones: 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:

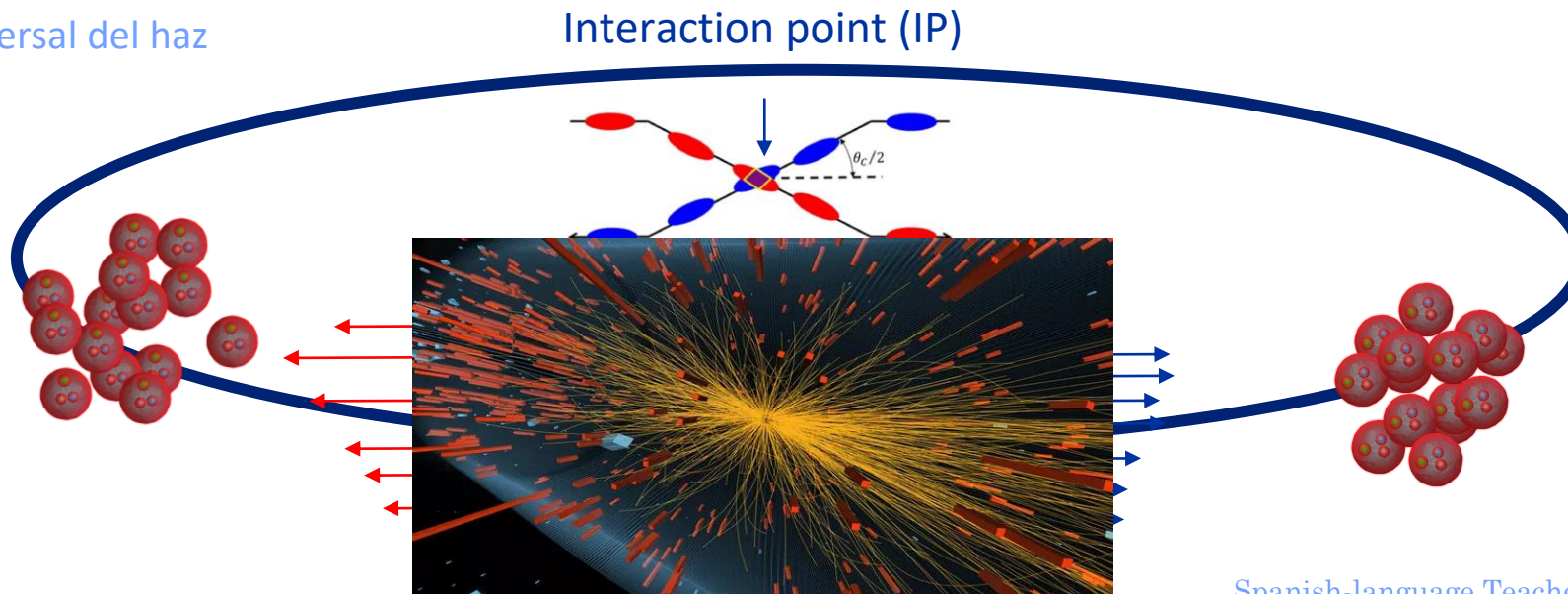
$$L = \frac{N^2 n_b f_{rep}}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

N : intensidad [partículas/paquete]
 n_b : no. paquetes
 f_{rep} : frecuencia de colisión
 σ_x, σ_y : tamaño transversal del haz

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

Acelerador
Luminosidad

Natura
Sección Eficaz:
Probabilidad de que
un evento ocurra



Aceleradores: Limitaciones

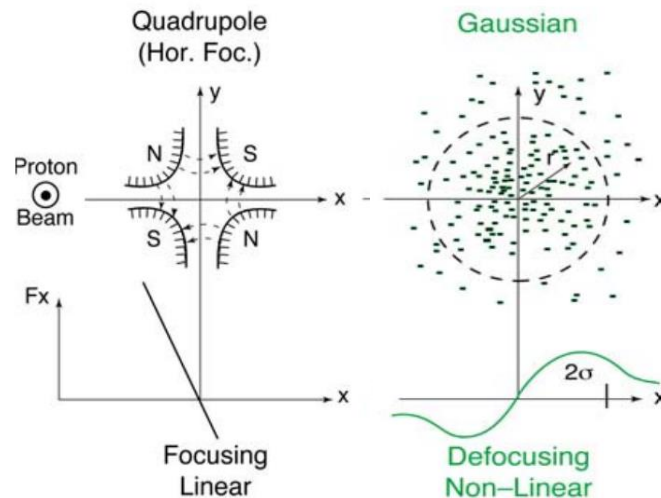


Durante la operación de los aceleradores, los físicos encontramos limitaciones a resolver y optimizar

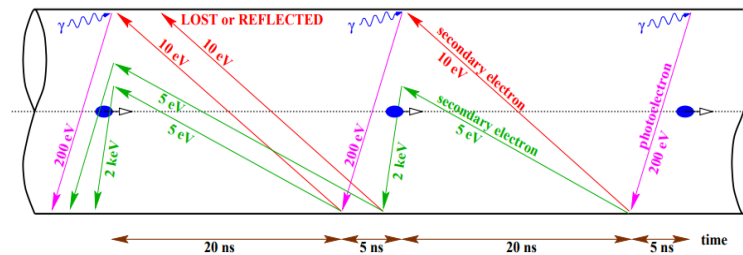
Algunos ejemplos

- **Space charge:** las partículas cargadas del paquete se repelen entre sí -> fuerza de-focalizante
- **Electron cloud:** el vacío dentro del acelerador no es perfecto, y se generan nubes de electrones ionizados
- **Beam-coupling impedance:** el haz de partículas excita campos electromagnéticos no deseados en el acelerador

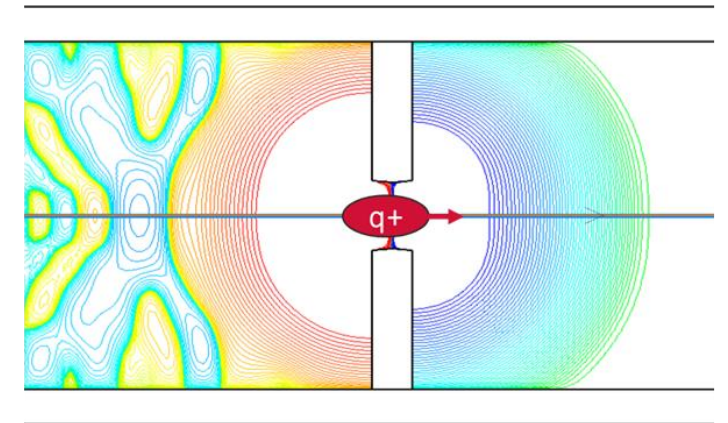
Space charge force



Cascade effect



Wakefields generados por un cambio en la geometría



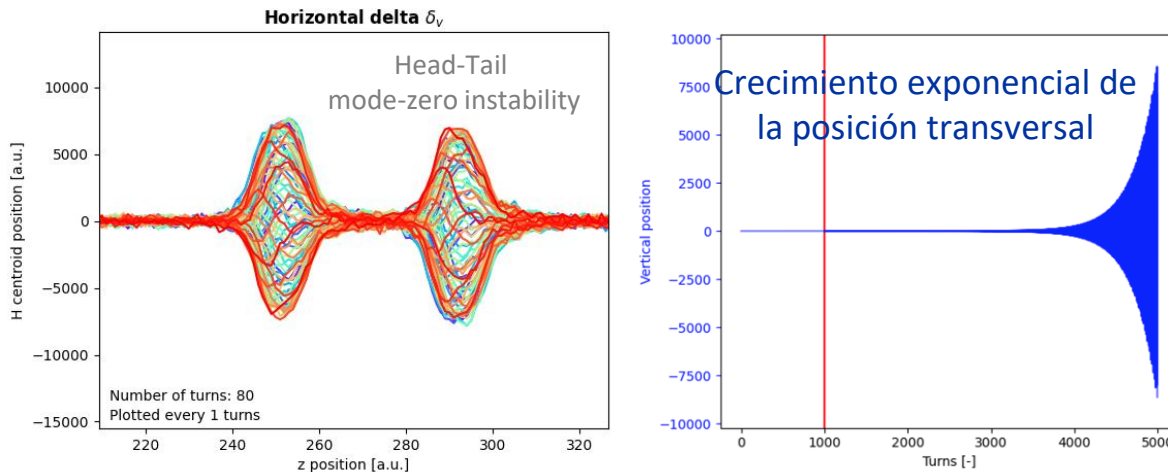
Aceleradores: Limitaciones



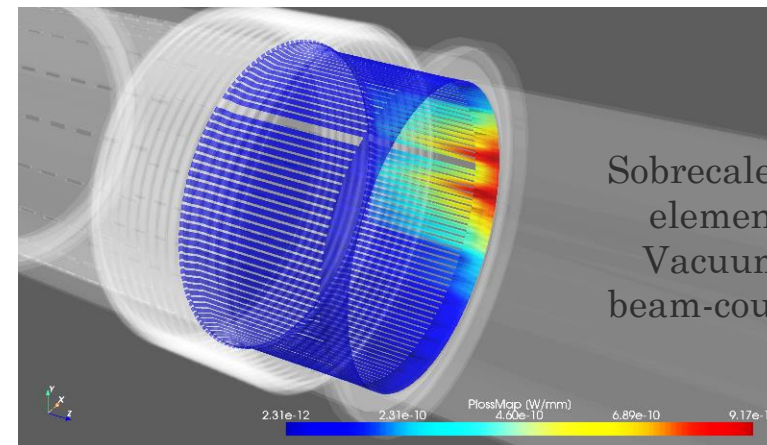
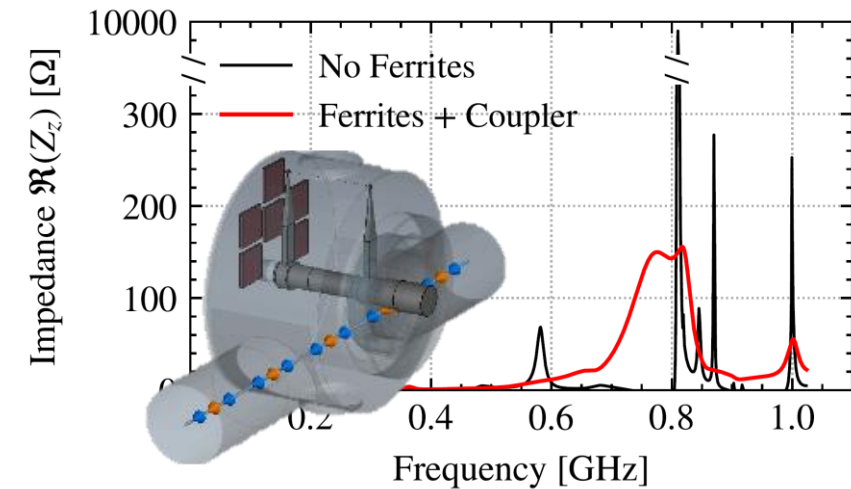
Ejemplos reales

Estas limitaciones causan **inestabilidades** en el haz que pueden derivar en calentamiento o rotura de los elementos del acelerador

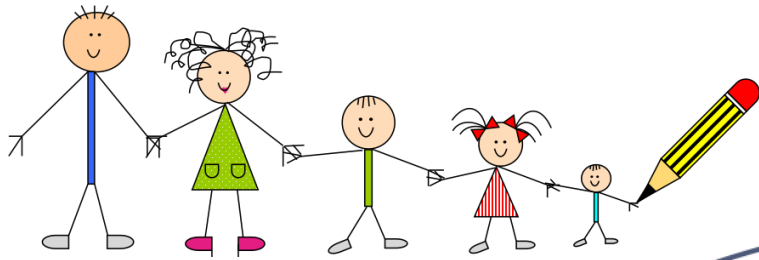
Inestabilidad observada en el SPS



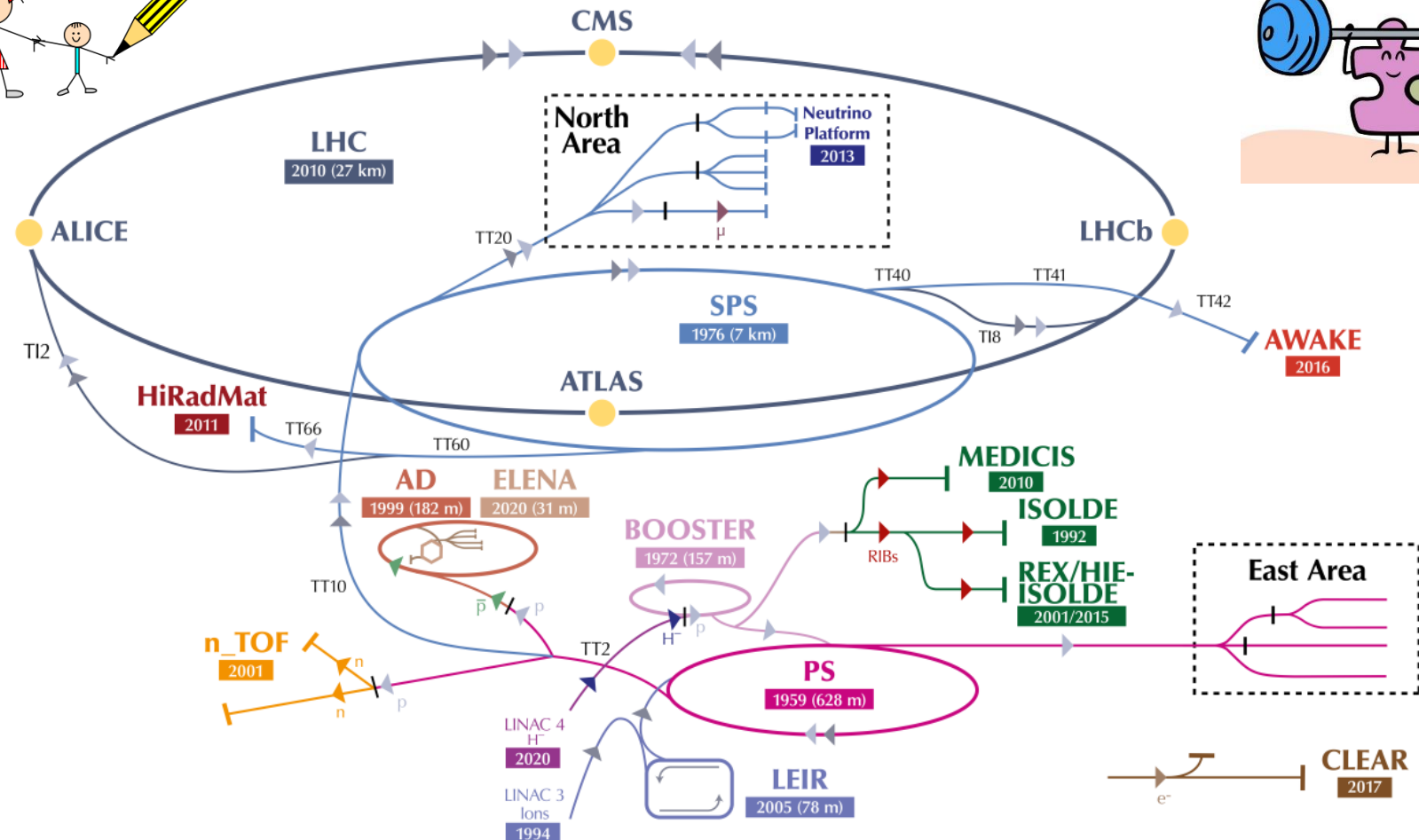
Fallos en instrumentos de medida (SPS BWS, 2023)



Los aceleradores del CERN



The CERN accelerator complex Complexe des accélérateurs du CERN



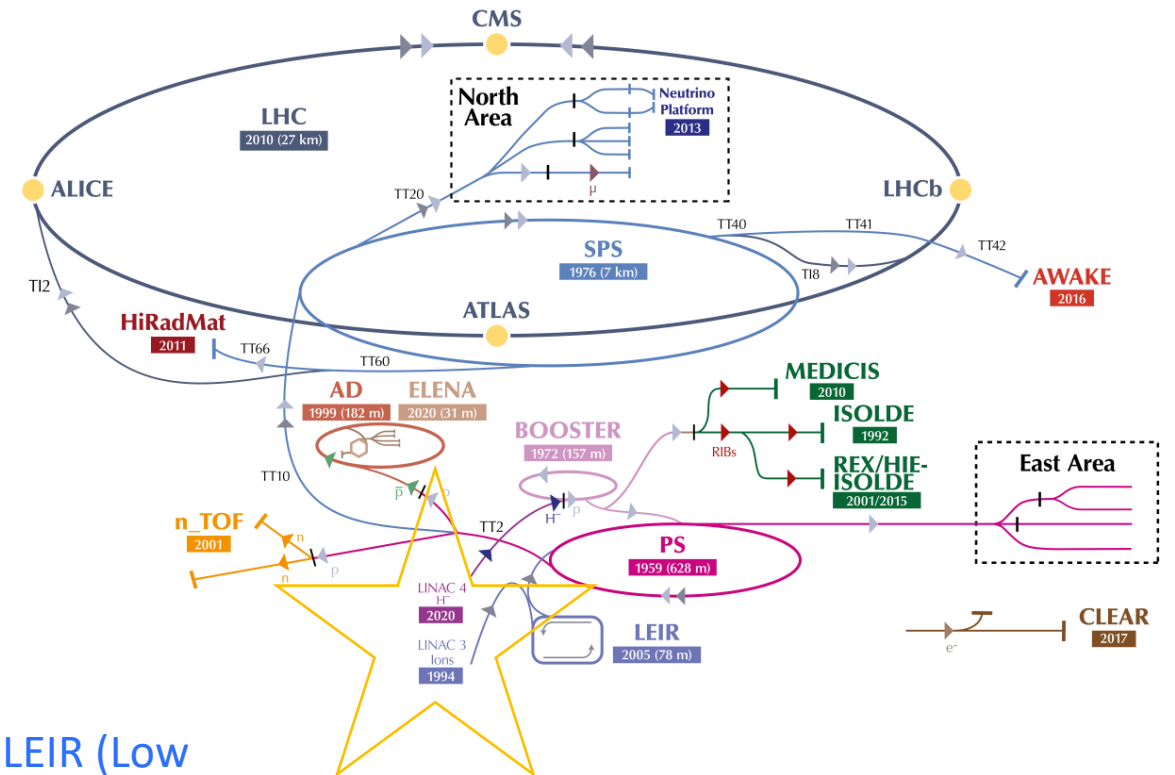
LINAC 3 y 4



LINAC4 (86 m) acelera iones negativos de Hidrogeno hasta 160 MeV para inyectarlos en el Proton Synchrotron Booster.

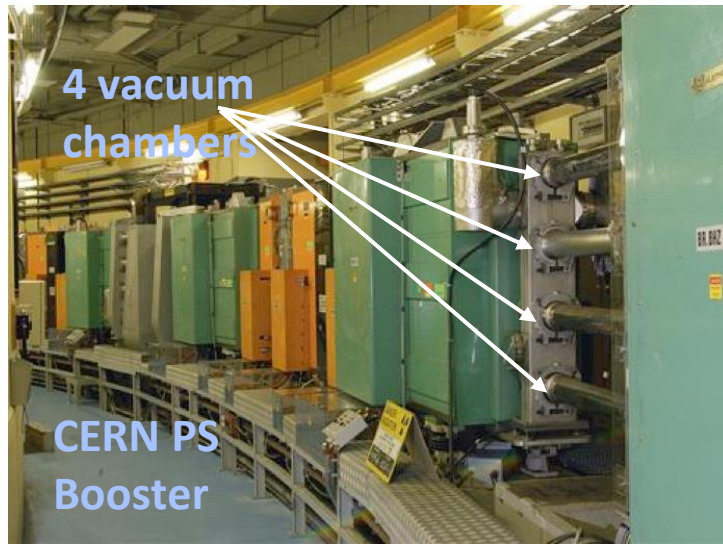
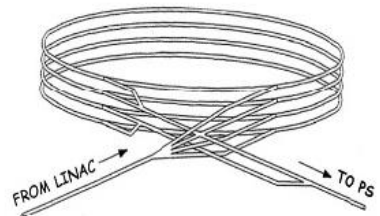
LINAC3 acelera iones pesados (plomo) para inyectarlos en el LEIR (Low Energy Ion Ring).

The CERN accelerator complex Complexe des accélérateurs du CERN



PS Booster

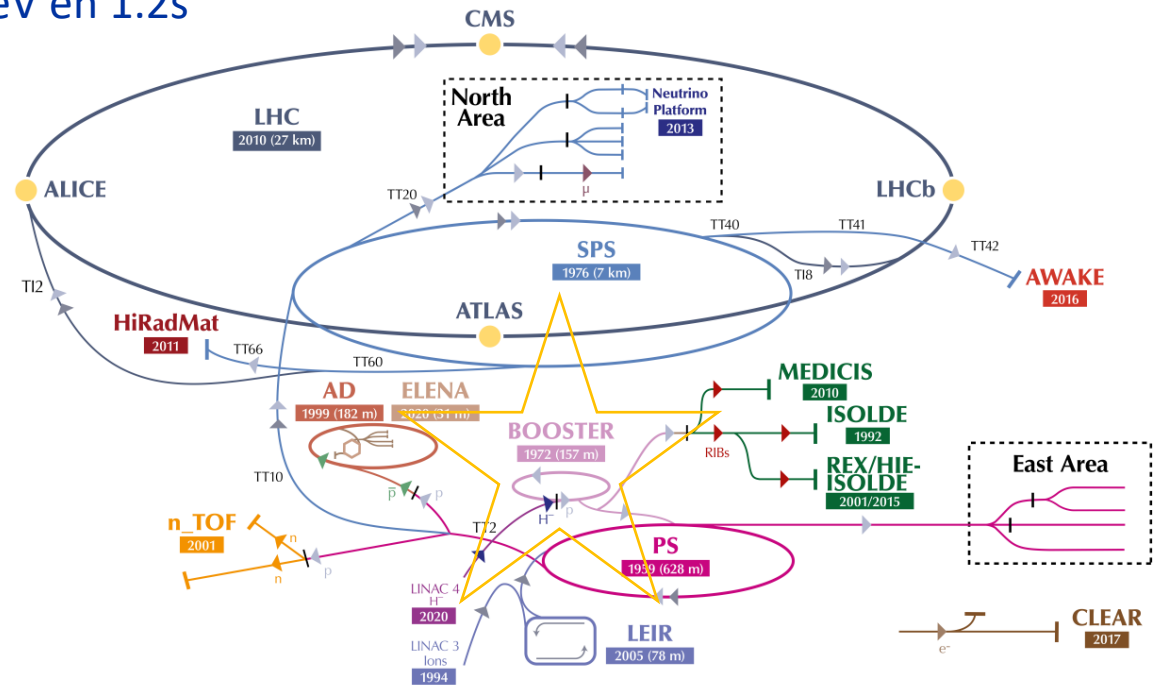
- 1^{er} Sincrotrón en la cadena de inyectores, compuesto por 4 anillos superpuestos. Circunferencia de 157m.
- Incrementa la energía de protones de 160 MeV hasta 1.4GeV en 1.2s



Pulsos del LINAC 4 se distribuyen verticalmente en los 4 anillos.

- Después de la aceleración se transfieren al **Proton Synchrotron (PS)**, **Medicis** (aplicaciones médicas) e **Isolde** (estudio de núcleos exóticos radiactivos).

The CERN accelerator complex
Complexe des accélérateurs du CERN



PS: Proton Synchrotron

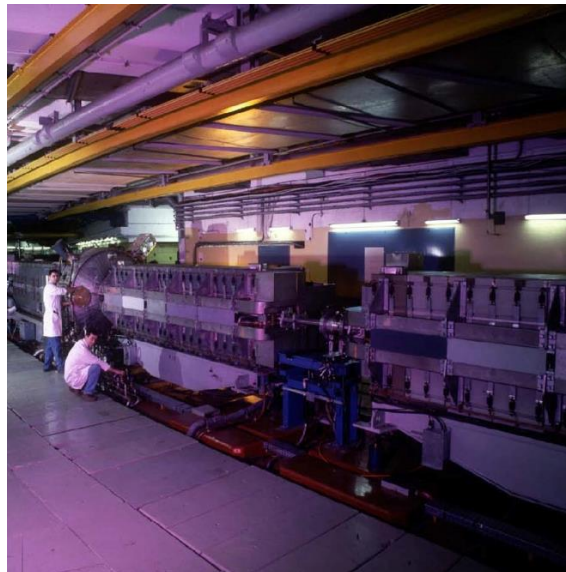
El más antiguo en el CERN desde 1959

Circunferencia de 628 m

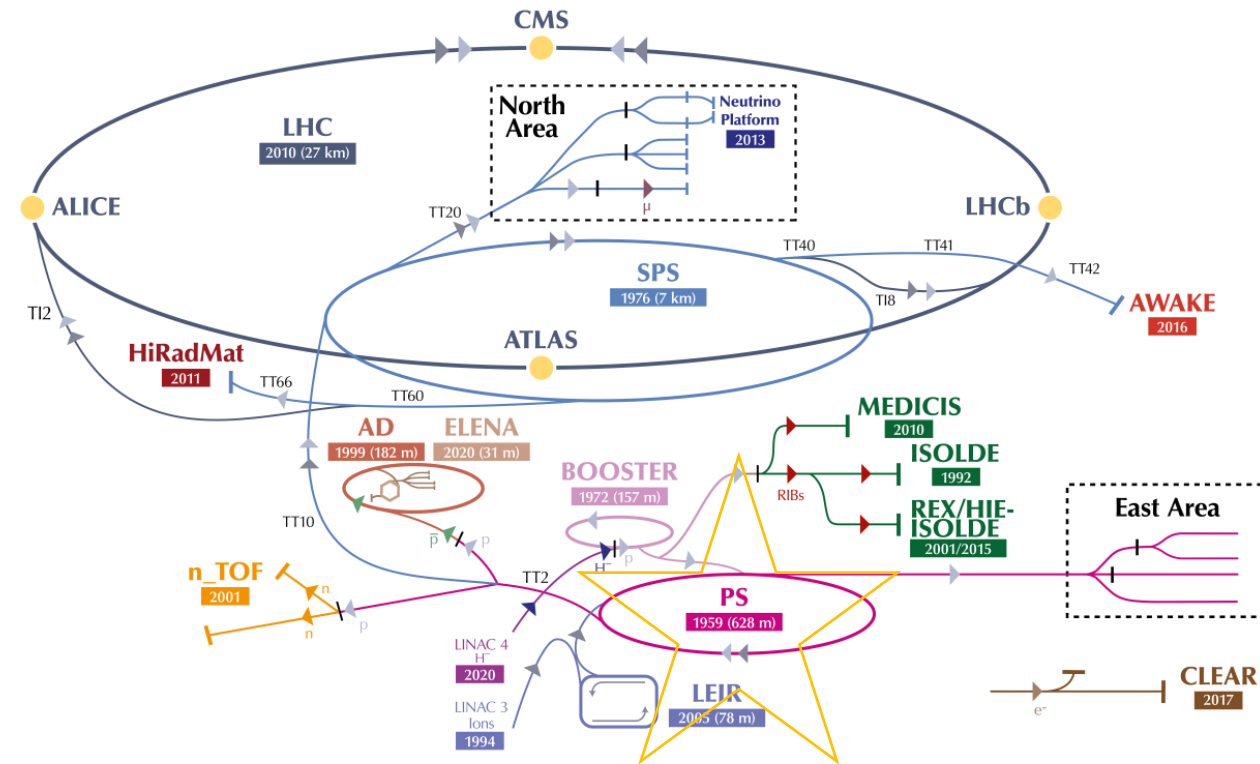
Acelera desde 1.4 GeV a un rango variado de energías hasta 26 GeV dependiendo del usuario

- East area: to 24GeV (CLOUD, IRRAD, ...)
- SPS: to 14GeV or 26GeV
- AD: to 26 GeV
- n-TOF: to 20 GeV (neutron Time-of-Flight)

Tunel del PS



The CERN accelerator complex
Complexe des accélérateurs du CERN



SPS: Super Proton Synchrotron

El último inyector, enterrado a **30m bajo tierra**.

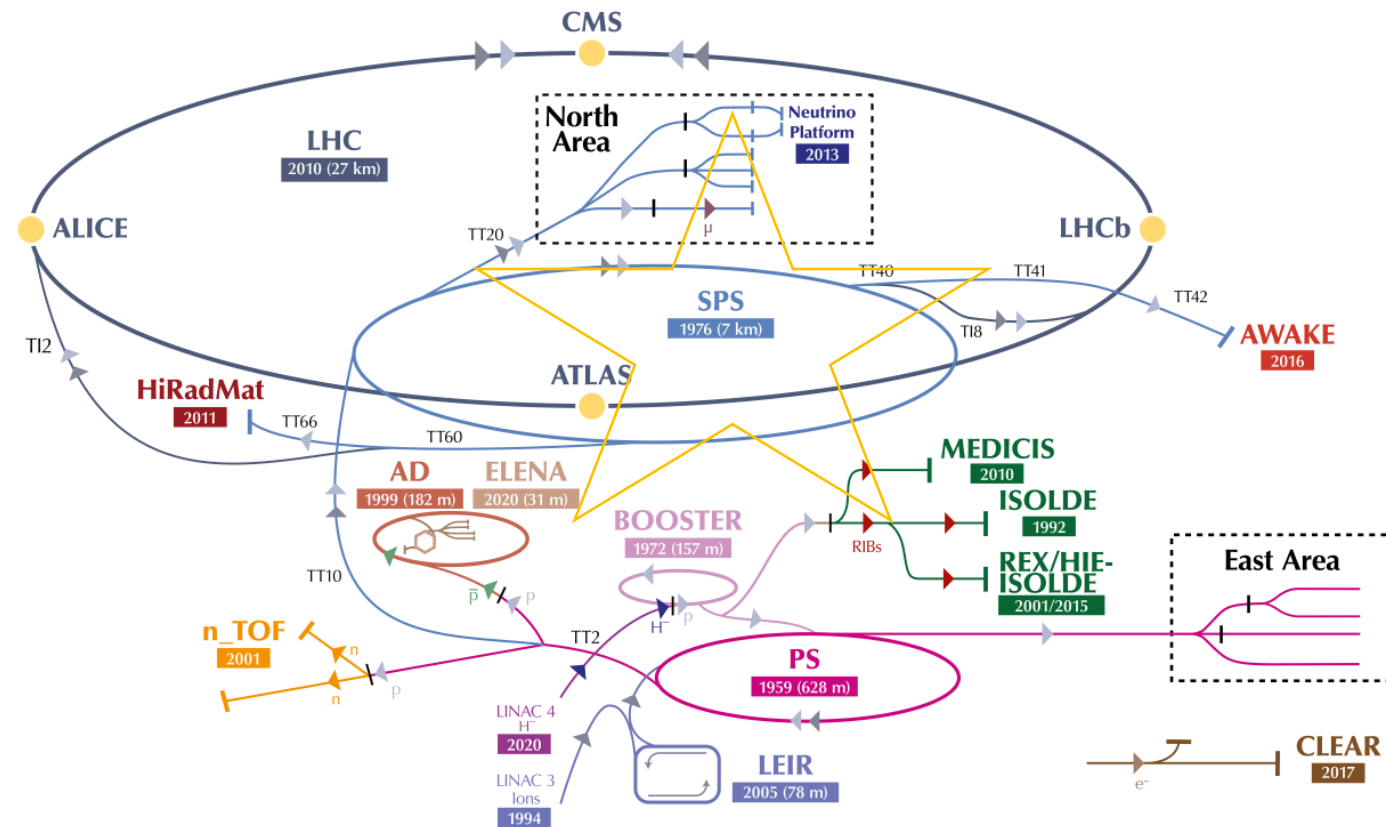
Circunferencia de 6.9km

Acelera de 26GeV hasta 450GeV

- Extracción hacia:
El Area Norte, LHC, AWAKE and HiRadMat



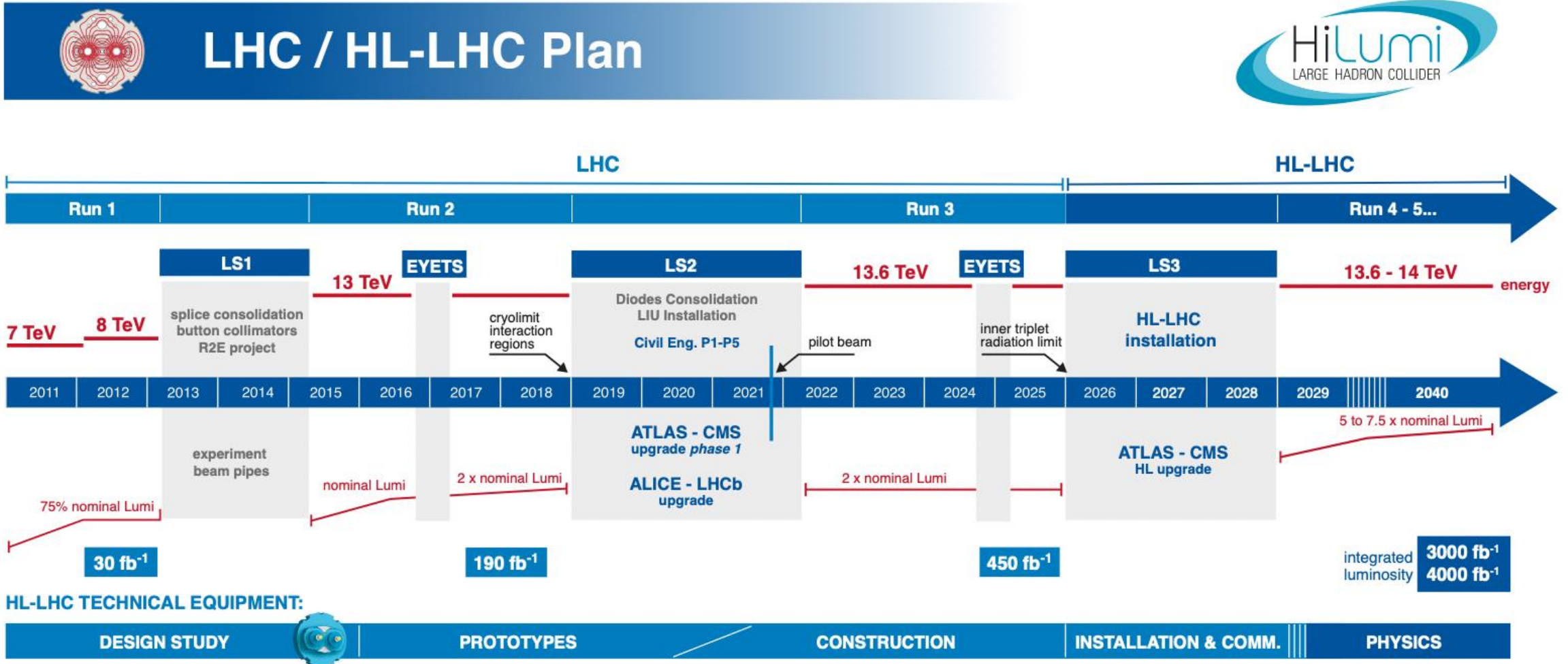
The CERN accelerator complex
Complexe des accélérateurs du CERN



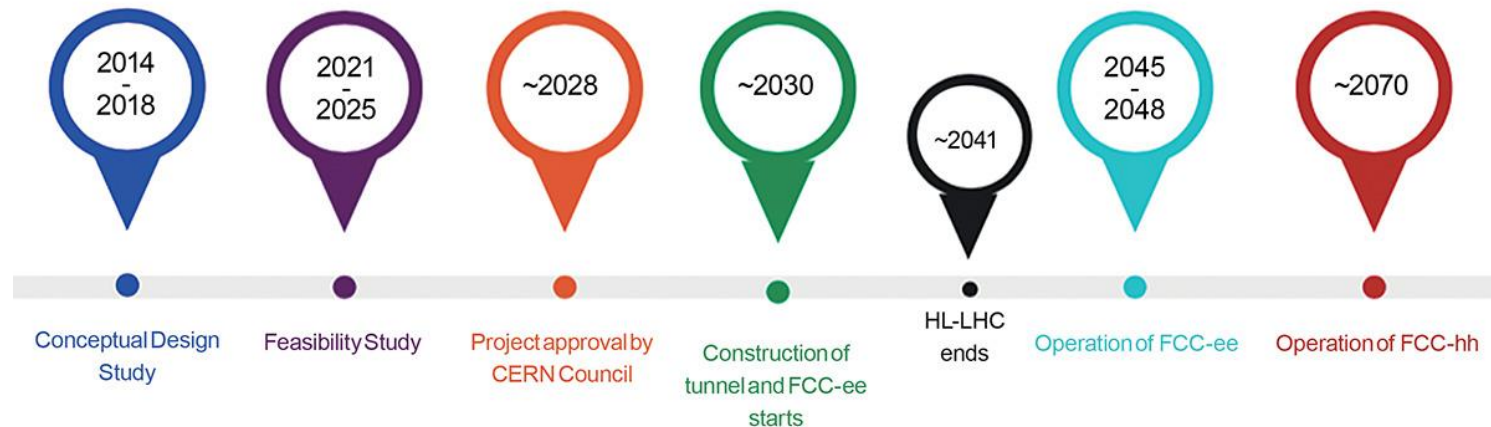
¿Futuro en el CERN ?



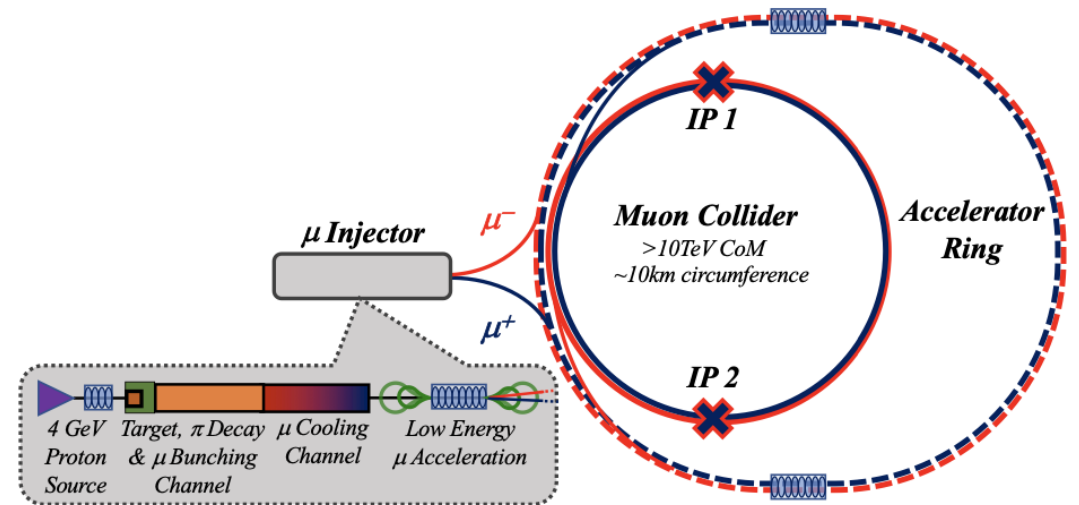
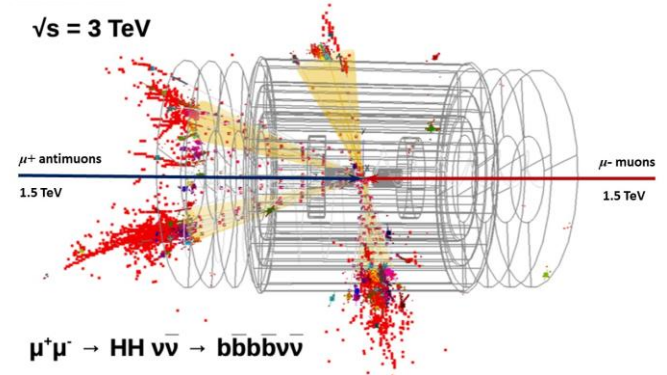
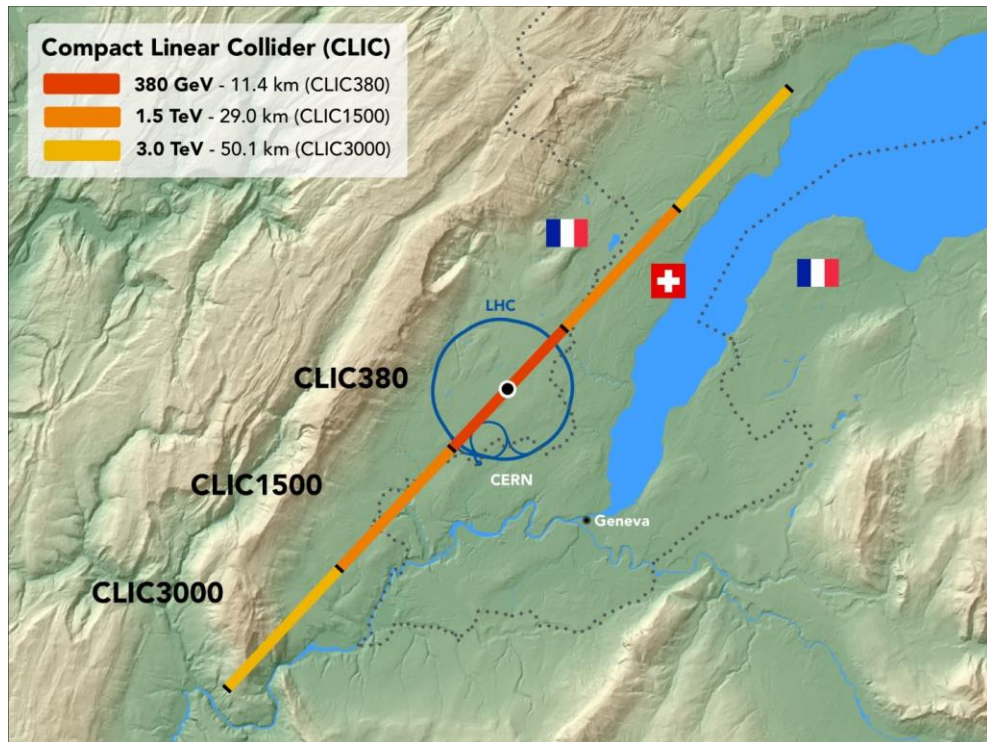
HL – LHC : Alta luminosidad



FCC: Future Circular Collider

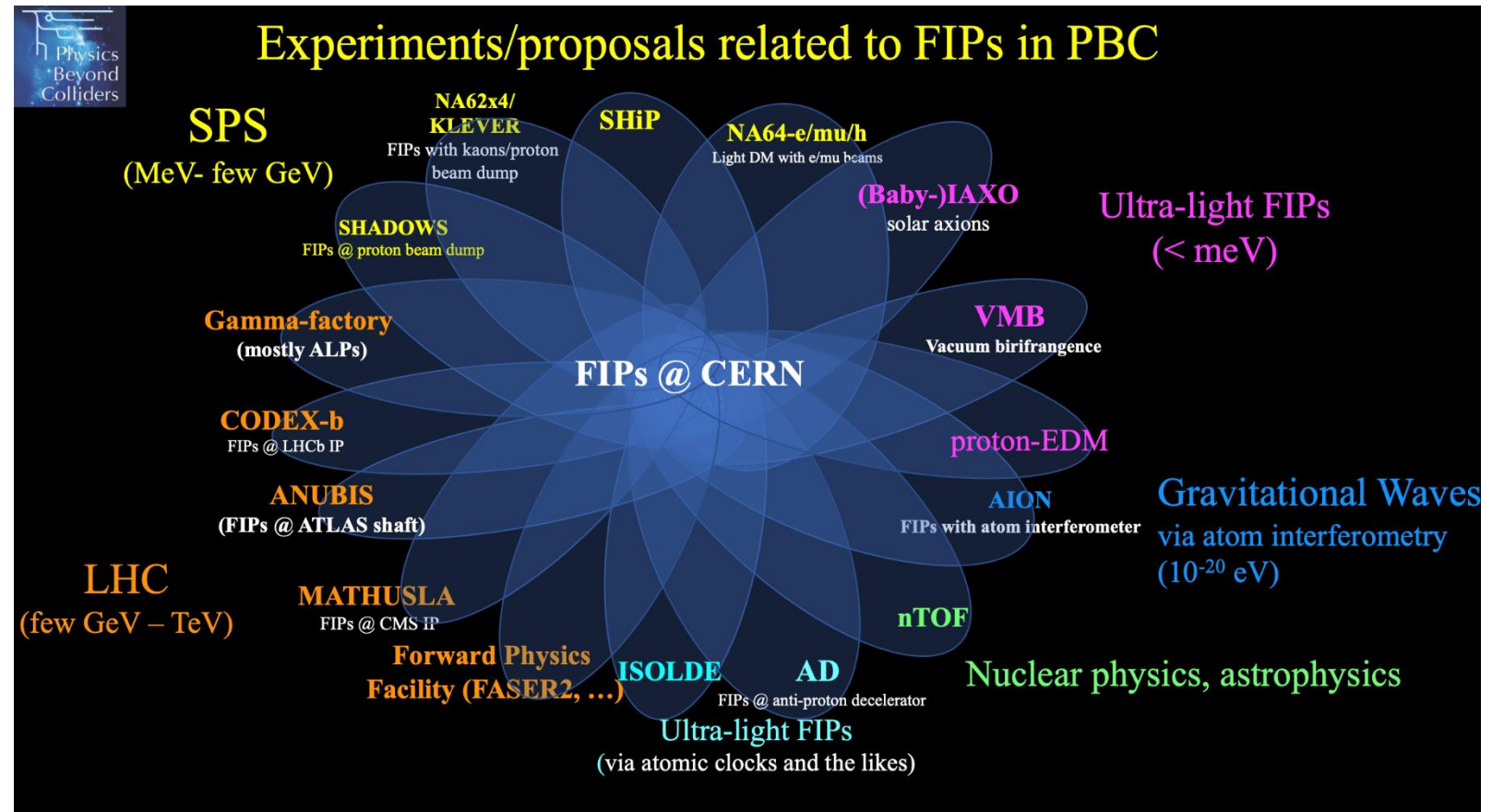
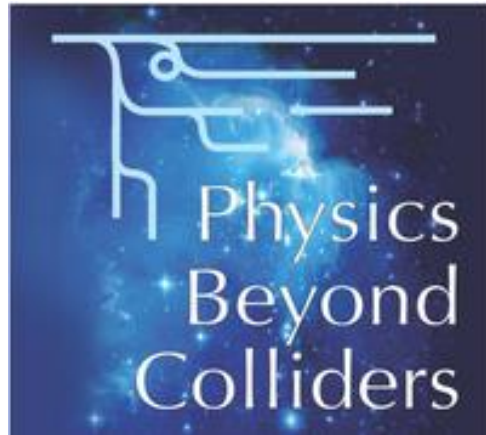


CLiC, Muon collider



Physics beyond colliders

Experimentos que usan los haces de partículas producidos por los aceleradores del CERN



Gracias 😊

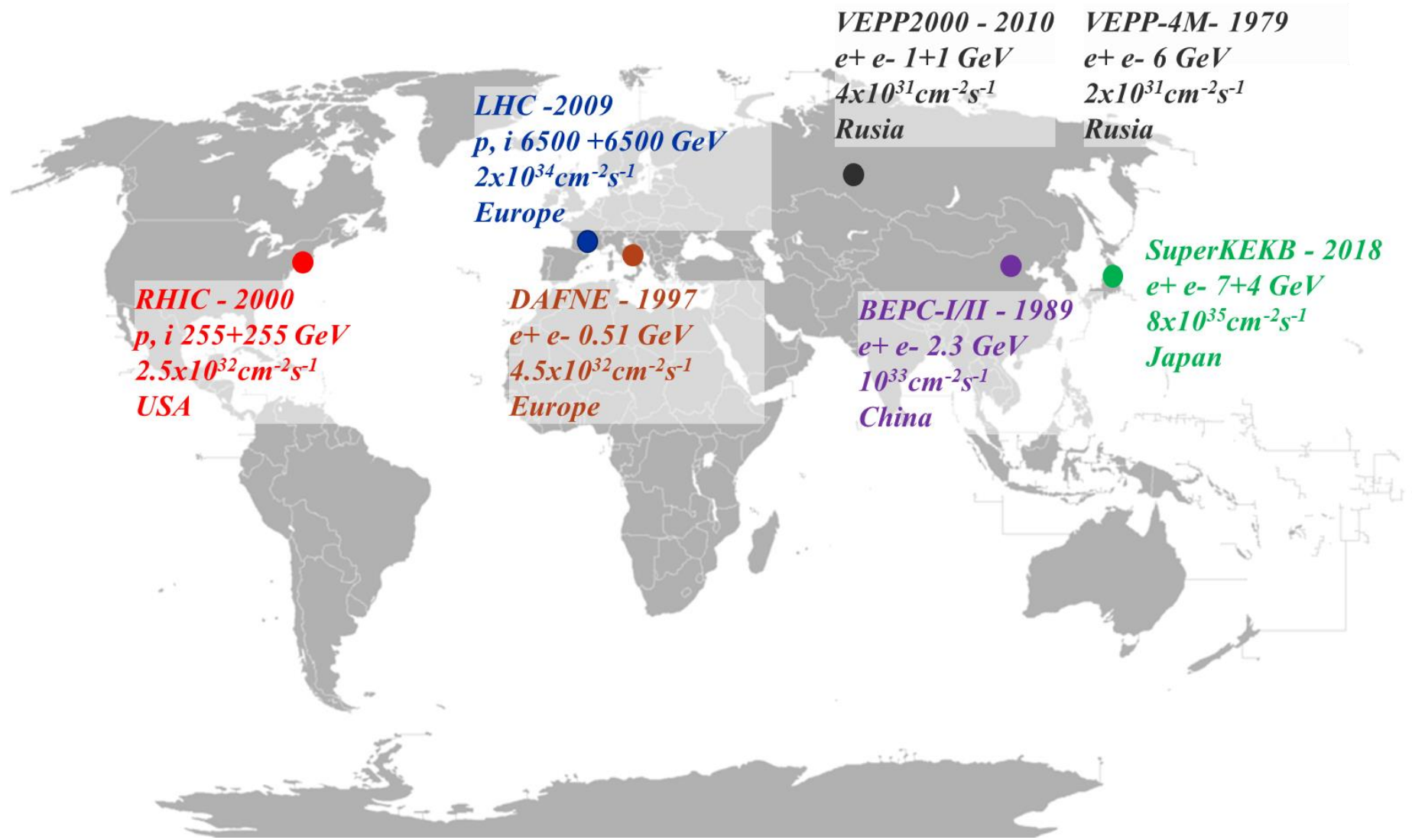


Aceleradores de partículas

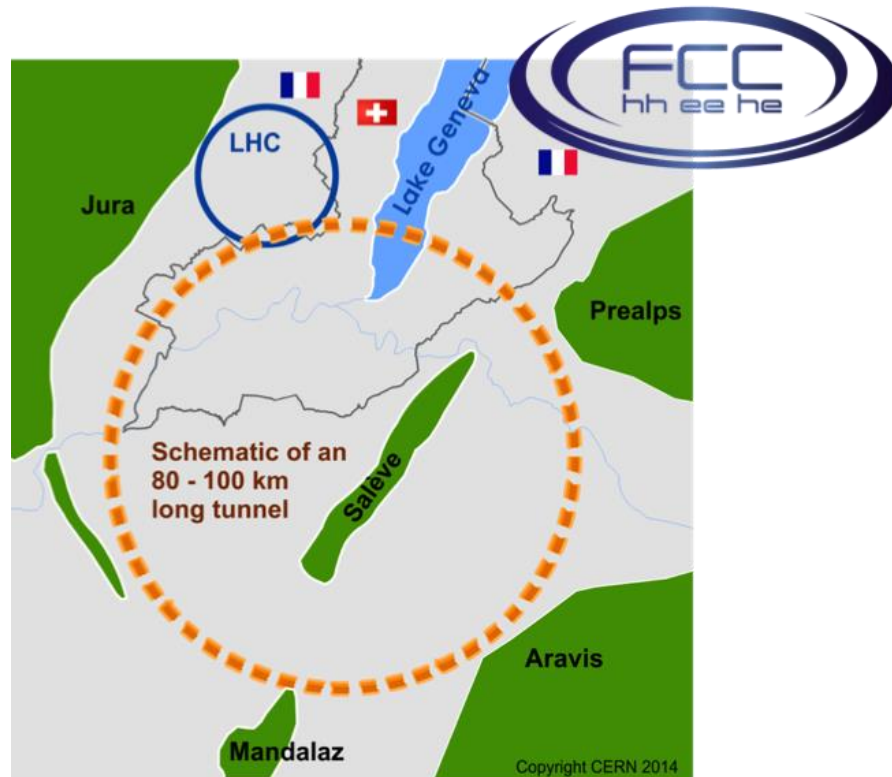
Elena de la Fuente García (BE-ABP-CEI)

Gracias a Reyes Alemany, Pablo Arrutia e Ingrid Mases por el material

Aceleradores de partículas por el mundo



Presupuestos: orden de magnitud



20.000 millones de €
30+ years of physics



8.800 millones de €
19 days

Premios en 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/ψ 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