



Aceleradores de partículas

Ingrid Mases Solé (BE-ABP-INC)

ingrid.mases.sole@cern.ch

27/06/2023 - Spanish Teacher Programme

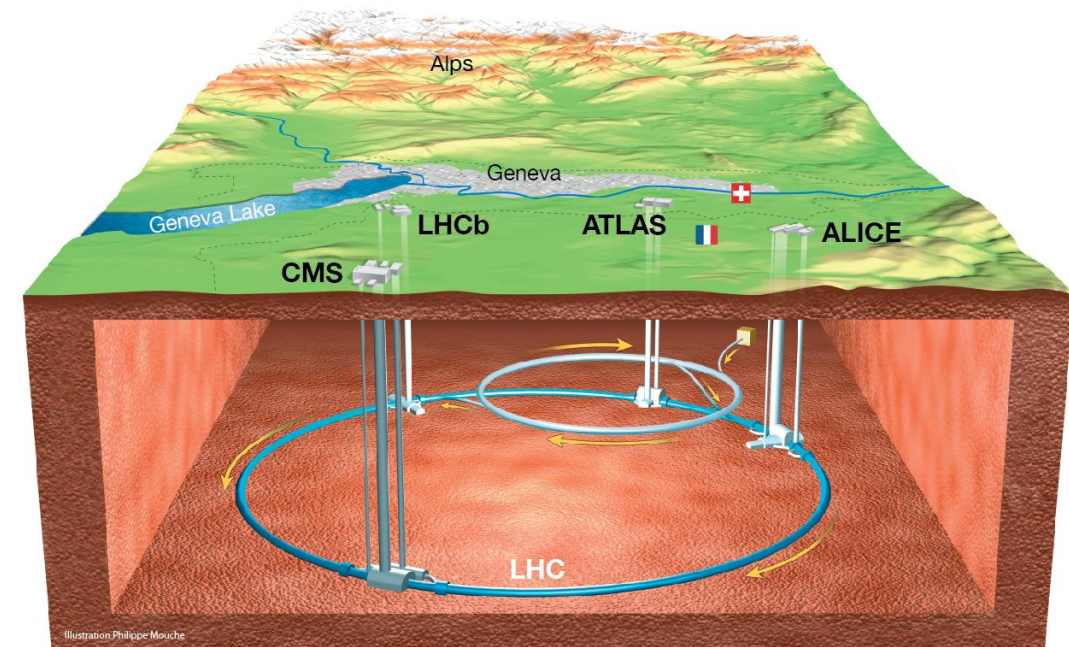
Aceleradores de Partículas

Máquinas que usando campos electro-magnéticos aceleran partículas cargadas y las guían manteniendo su trayectoria dentro del acelerador.

Large Hadron Collider (LHC)

- El más **potente** acelerador de partículas.
- **100 m bajo tierra** en el CERN.
- **27 km de circunferencia**
- Acelera **protones e iones pesados**, en direcciones opuestas para colisionar en 4 puntos del anillo.
- **Produciendo colisiones entre protones de casi 14 TeV**

**Estudiar las interacciones más básicas de la materia.
Explorar la frontera de la física de partículas**



$E_b = 7000 \text{ GeV}$ $E_b = 7000 \text{ GeV}$



$$E_{cme} = 2E_b$$
$$E_{cm} = 14000 \text{ GeV}$$

¿Por qué queremos tanta energía?

$$E = mc^2$$

RHIC - 2000
p, i 255+255 GeV
 $2.5 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
USA

LHC - 2009
p, i 6500 +6500 GeV
 $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Europe

DAFNE - 1997
e+ e- 0.51 GeV
 $4.5 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Europe

VEPP2000 - 2010
e+ e- 1+1 GeV
 $4 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Rusia

VEPP-4M- 1979
e+ e- 6 GeV
 $2 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Rusia

BEPC-I/II - 1989
e+ e- 2.3 GeV
 $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
China

SuperKEKB - 2018
e+ e- 7+4 GeV
 $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Japan

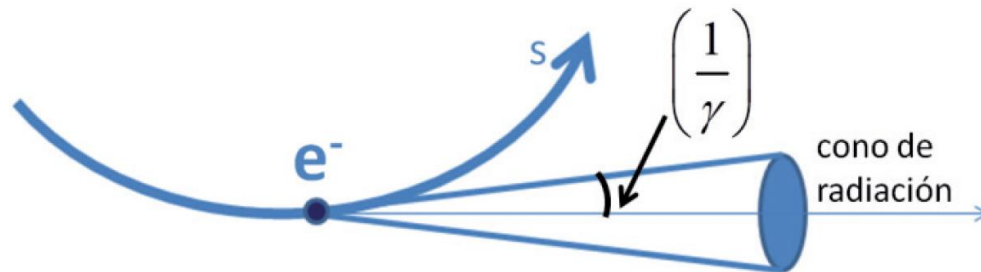


Otras aplicaciones de los aceleradores de partículas

Los aceleradores de partículas también se usan fuera de la física de partículas.

1. Fuentes de luz sincrotrón:

- Estudio de la física de materia condensada, espectroscopía, física de materiales, biomedicina, etc.



Soleil, Paris



ALBA, Barcelona

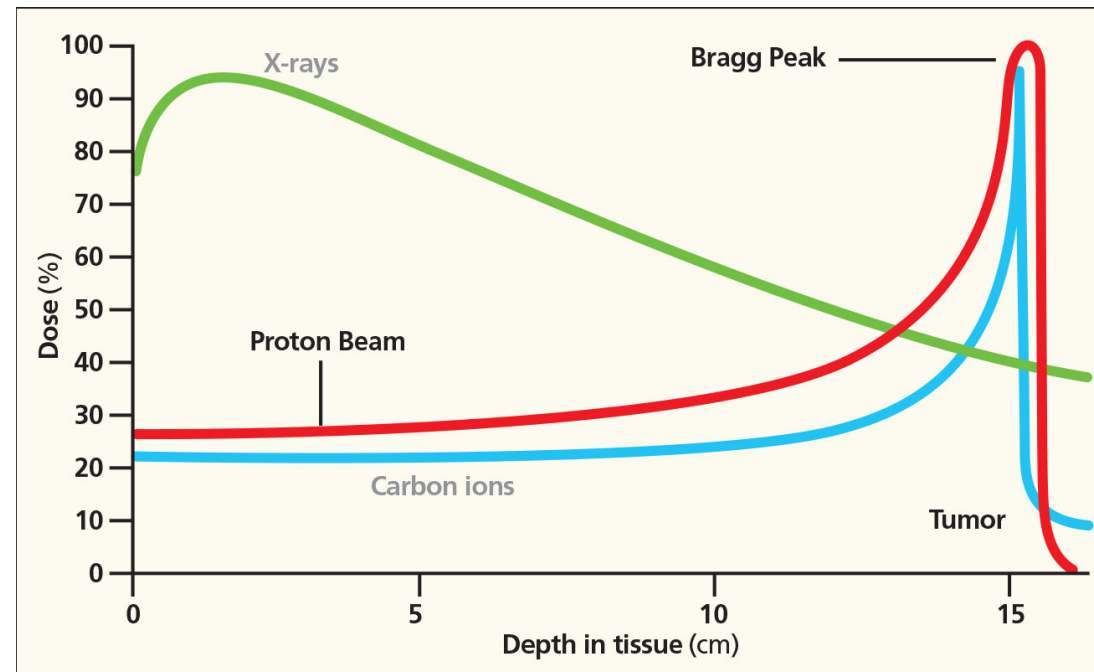
Otras aplicaciones de los aceleradores de partículas

2. Industria

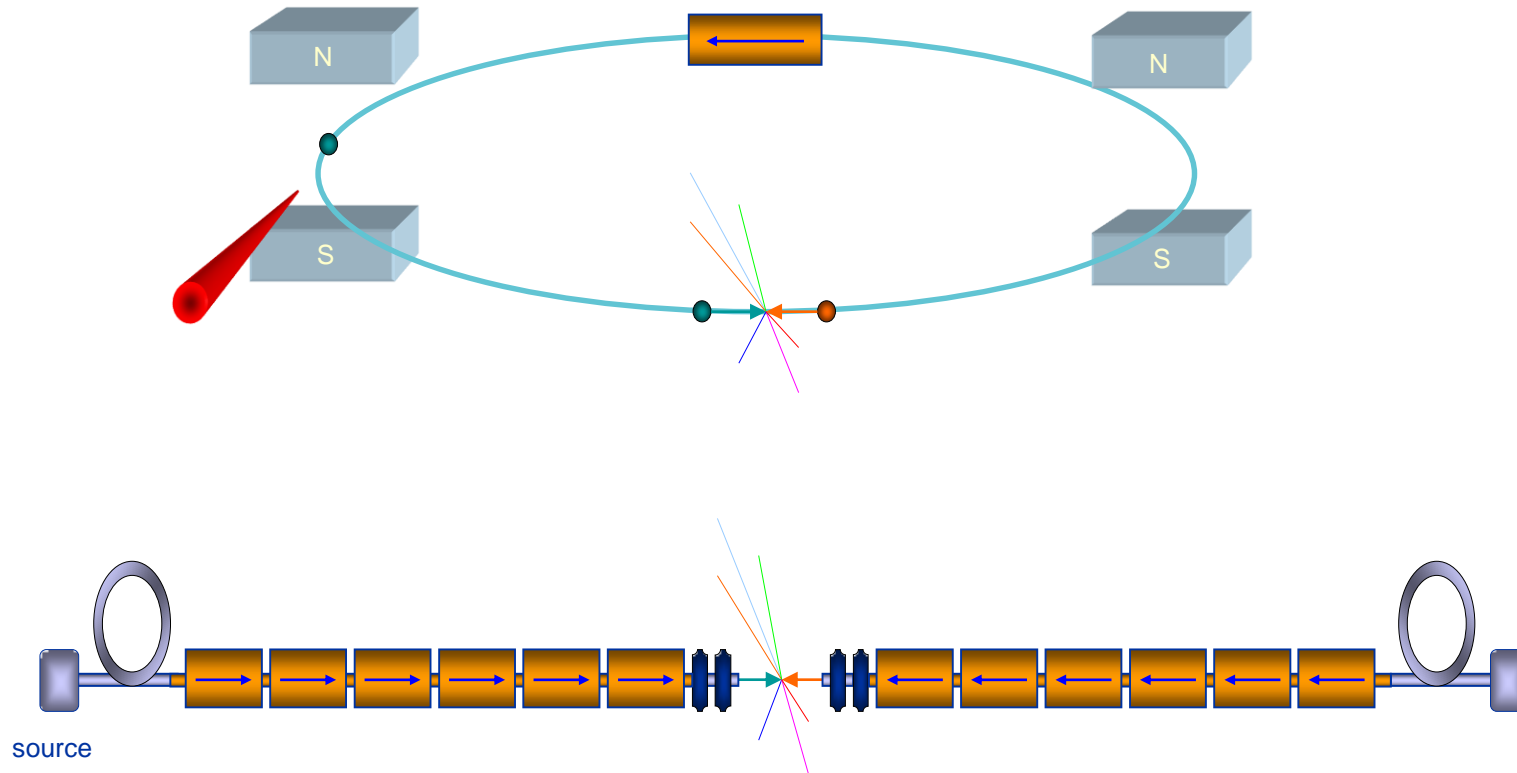
Tratamiento de superficies, implantación de iones en electrónica, etc.

3. Aplicaciones médicas.

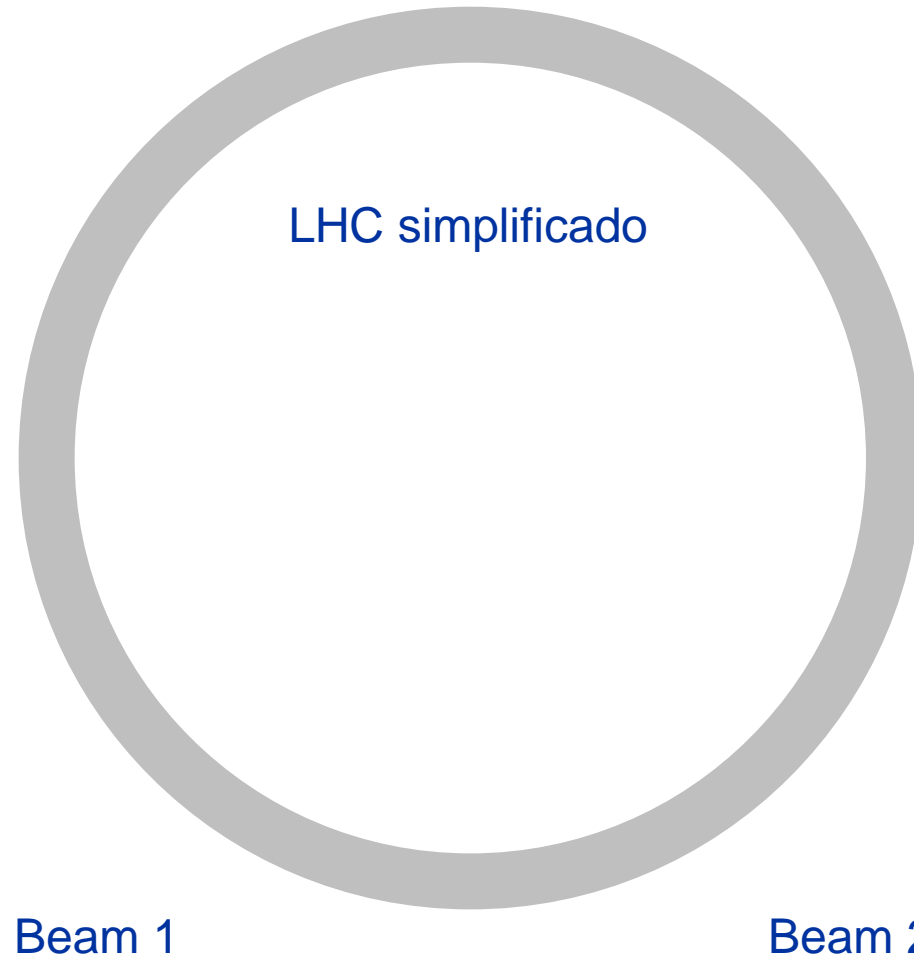
Diagnóstico, terapia con hadrones (tratamientos oncológicos)



Aceleradores lineales y circulares dependiendo de las necesidades



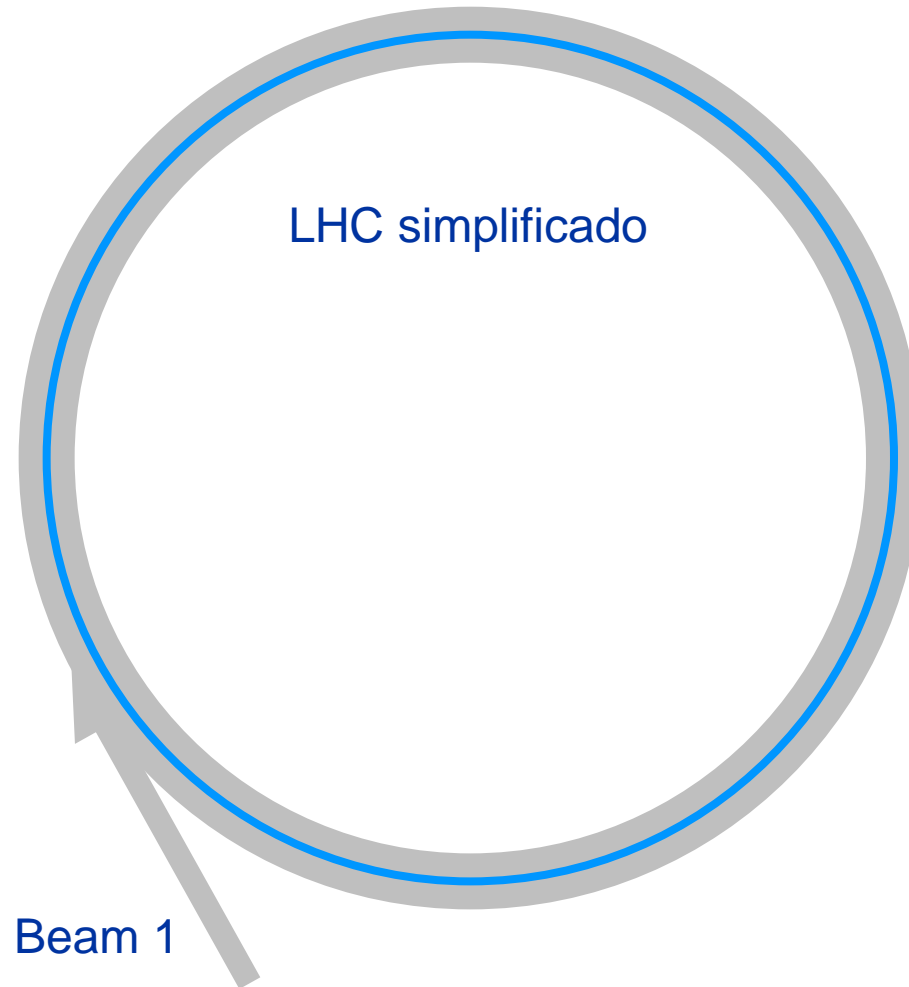
¿Cómo funciona un acelerador de partículas como el LHC?



Cómo funciona un acelerador

Inyección y llenado
del acelerador

Beam 1

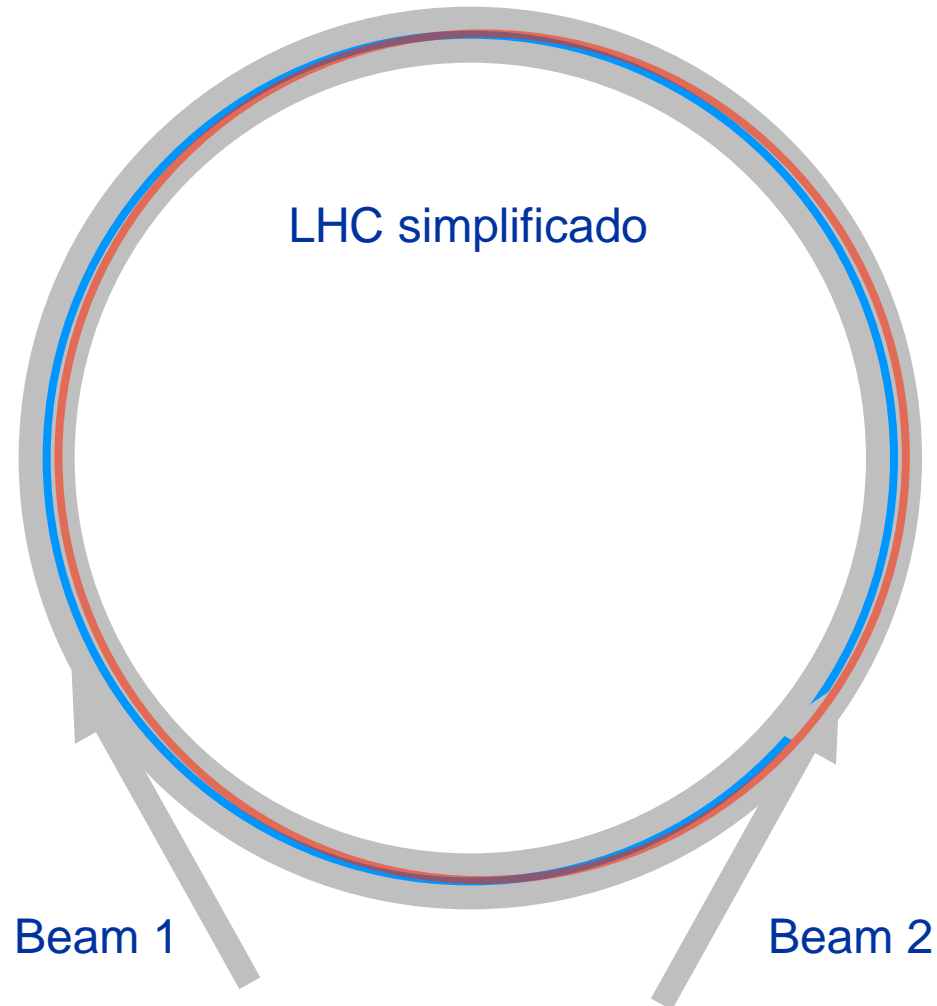


Cómo funciona un acelerador

Inyección y llenado
del acelerador

Beam 1

Beam 2

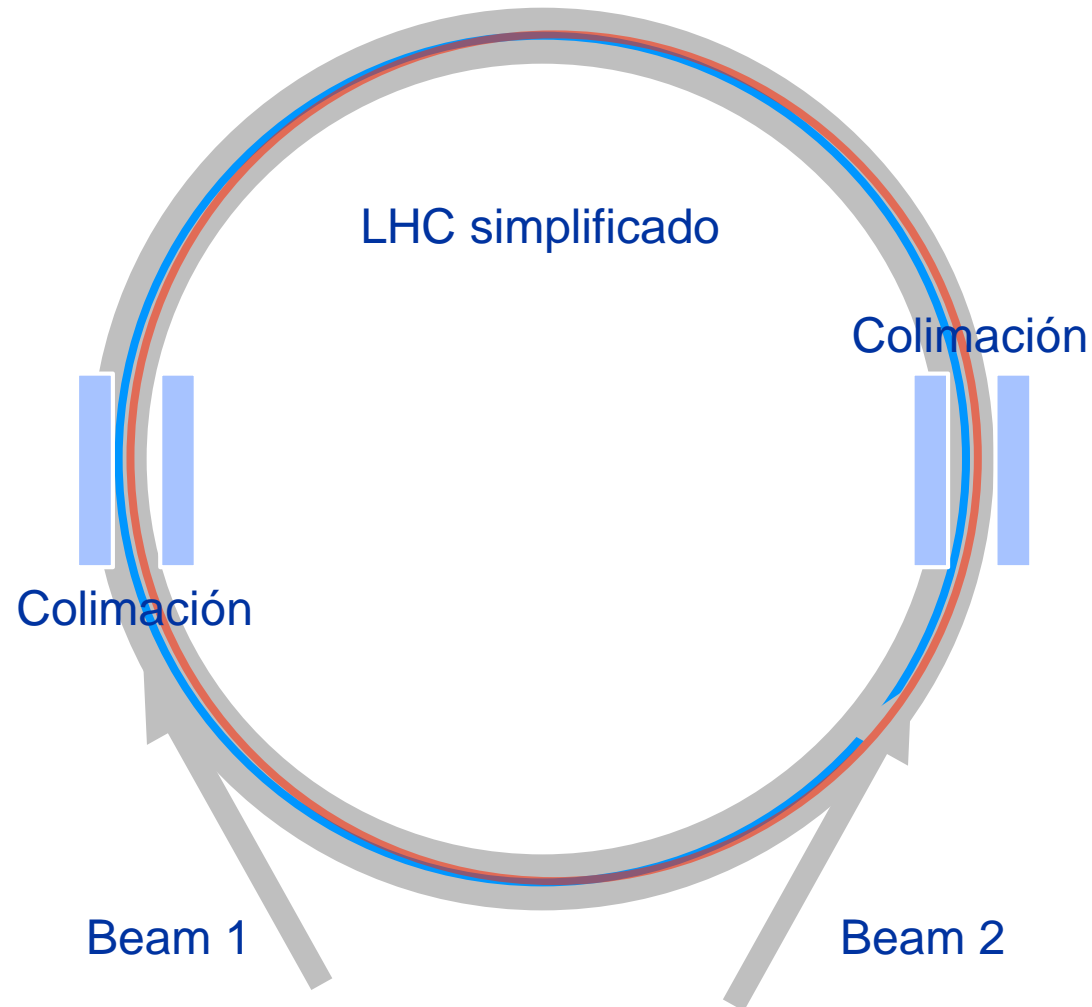


Cómo funciona un acelerador

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

Cómo funciona un acelerador

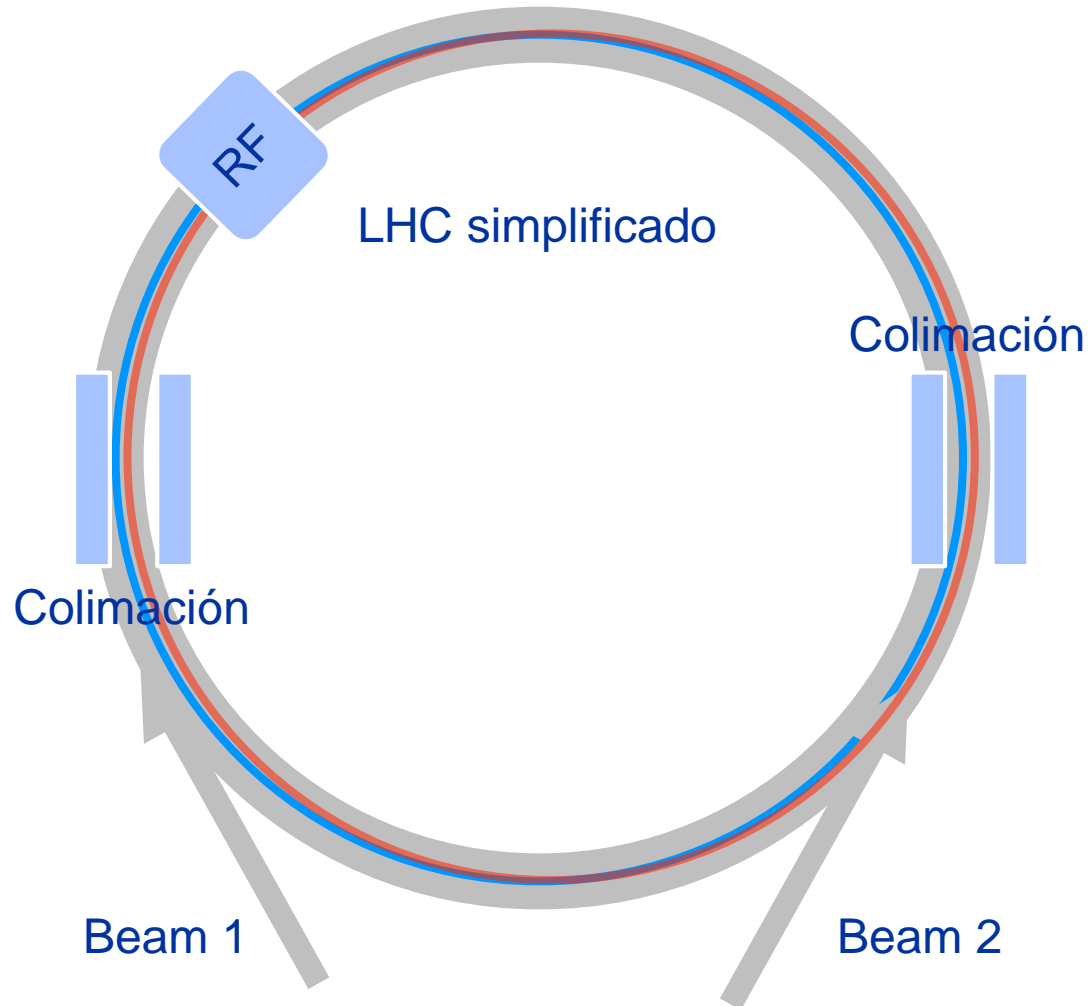
Inyección y llenado del acelerador

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

Cómo funciona un acelerador

Inyección y llenado del acelerador

Beam 1

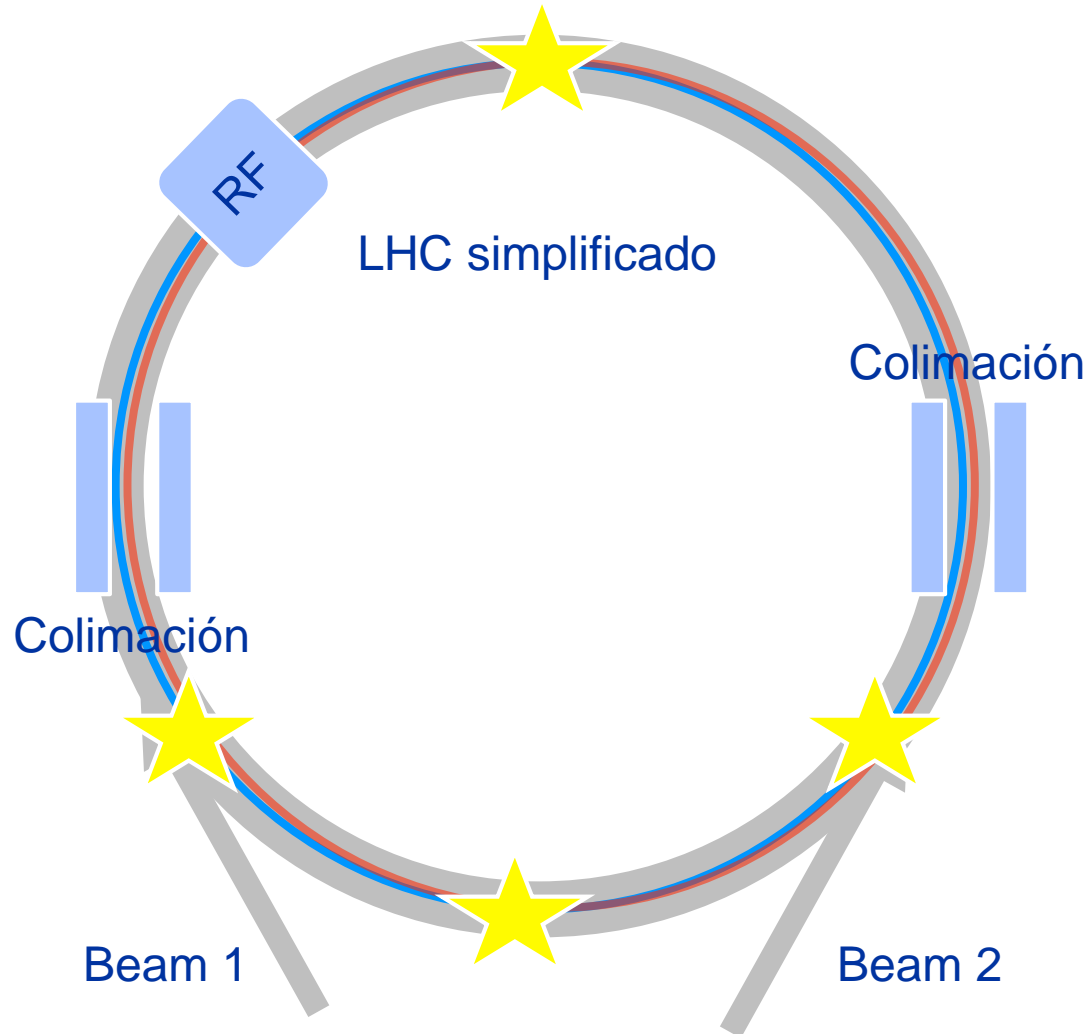
Beam 2

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

Inyección y llenado del acelerador

Beam 1

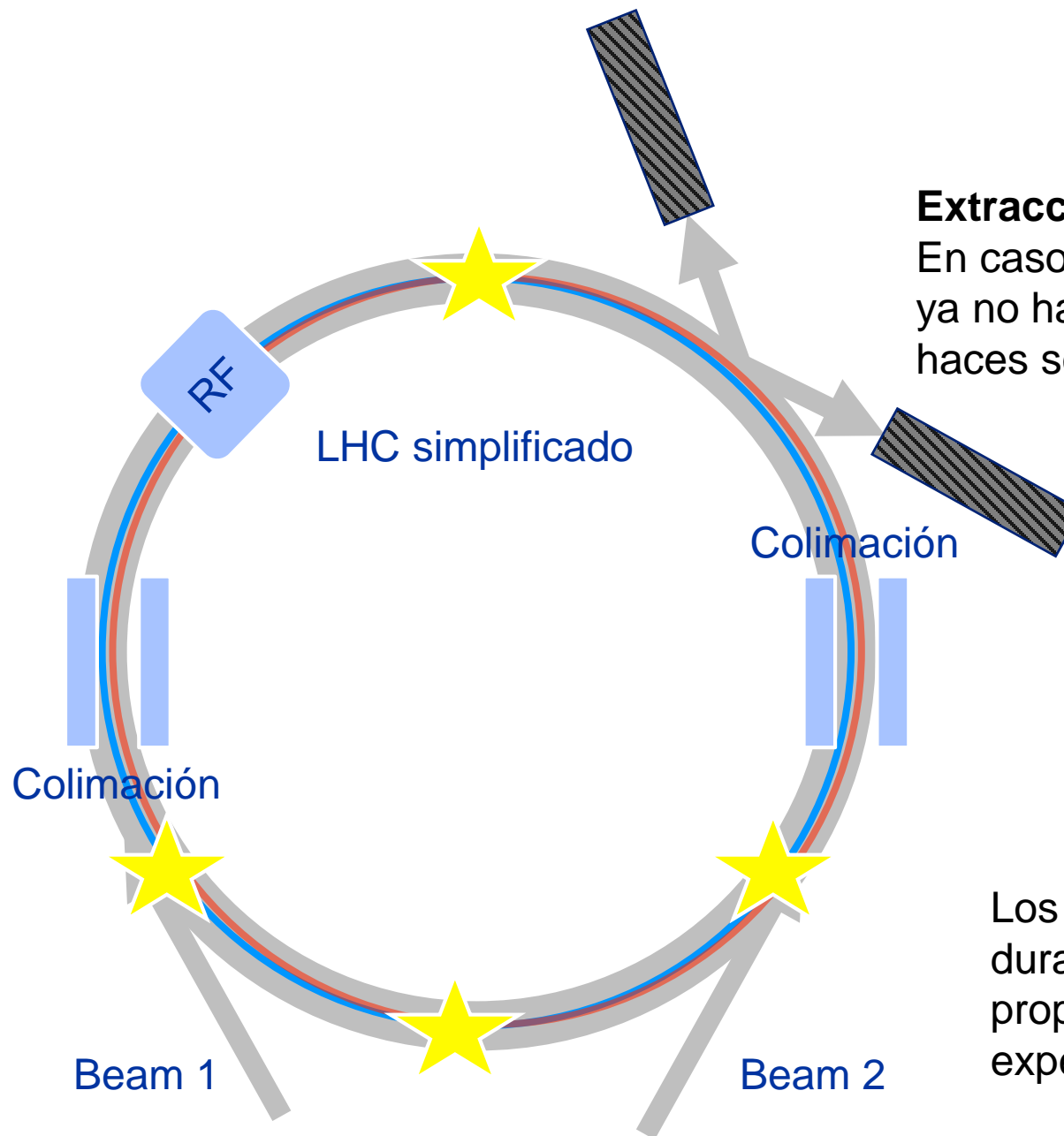
Beam 2

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.

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

Inyección y llenado del acelerador

Beam 1

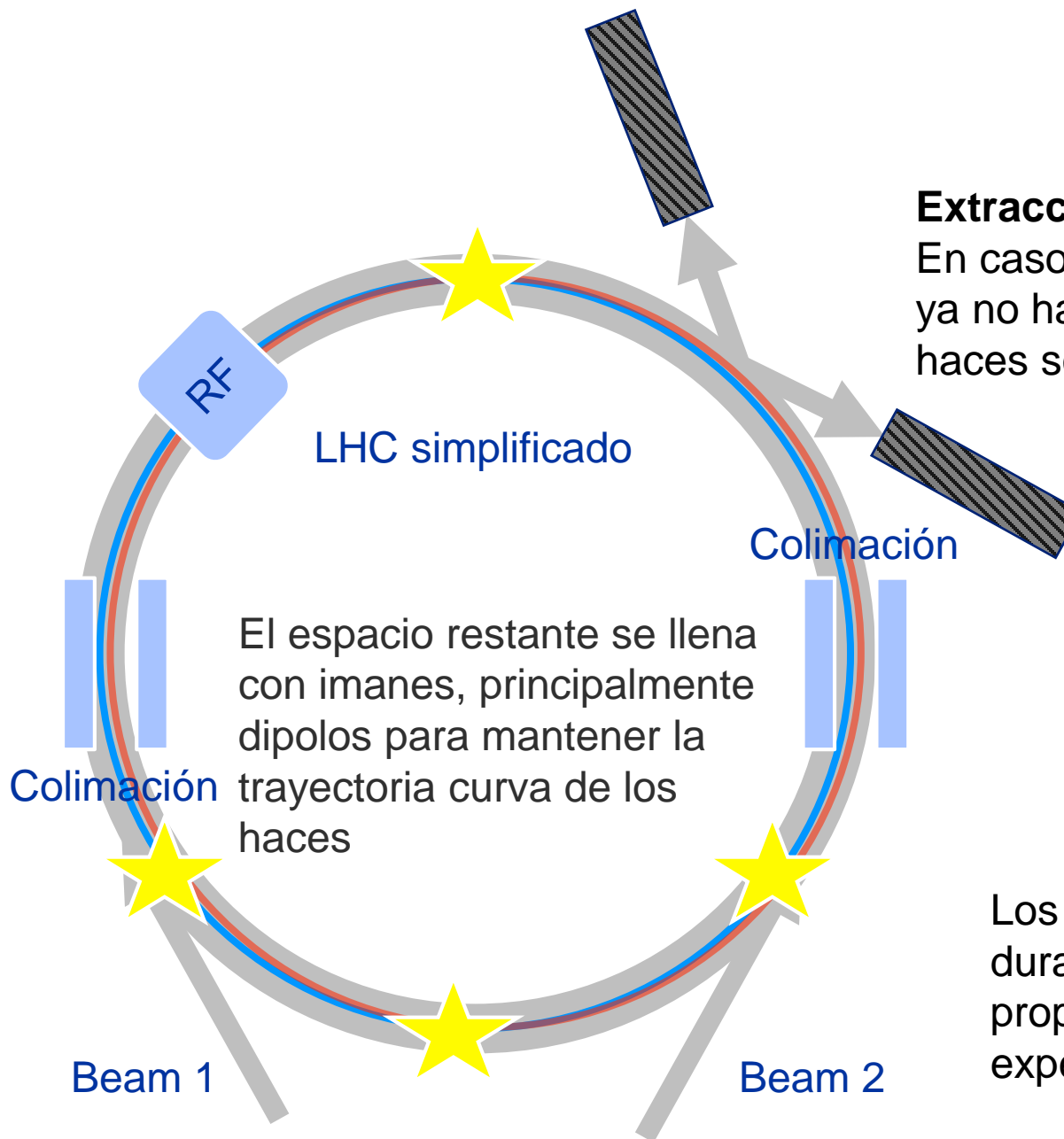
Beam 2

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.

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

Newton-Lorentz para guiar y acelerar las partículas cargadas

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = e(\underbrace{\vec{E}}_{\text{red}} + \underbrace{\vec{v} \times \vec{B}}_{\text{blue}})$$

Movimiento Longitudinal

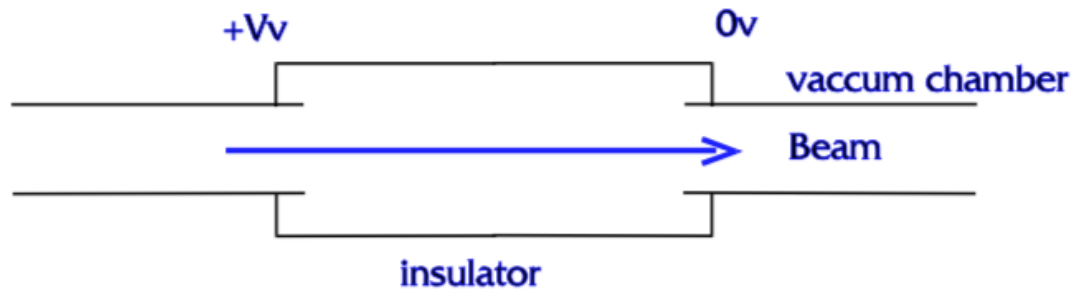
Fuerza actúa en la dirección del movimiento.
Efectivo para ACELERAR partículas cargadas.

Movimiento Transversal

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

Aceleración electrostática

El método más simple de generar un campo eléctrico en la dirección del movimiento es: diferencia de voltaje

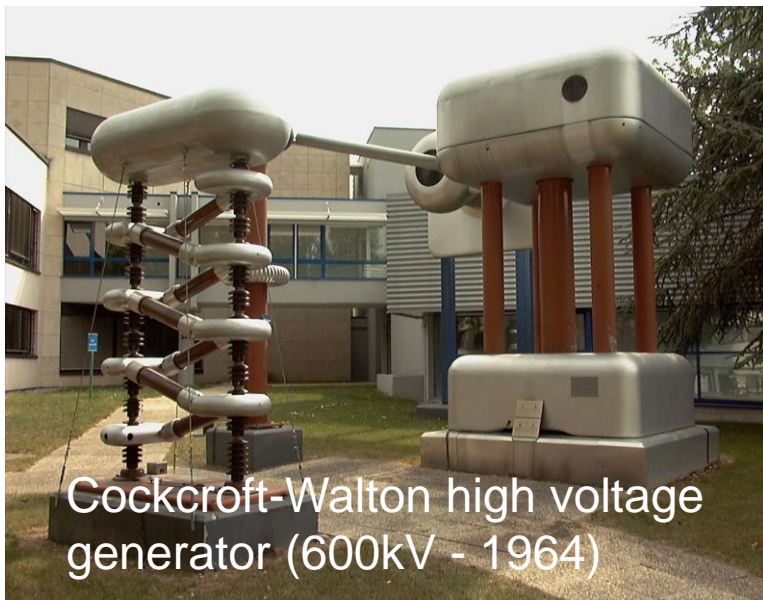


Ganancia en energía cinética es proporcional a V (el potencial)

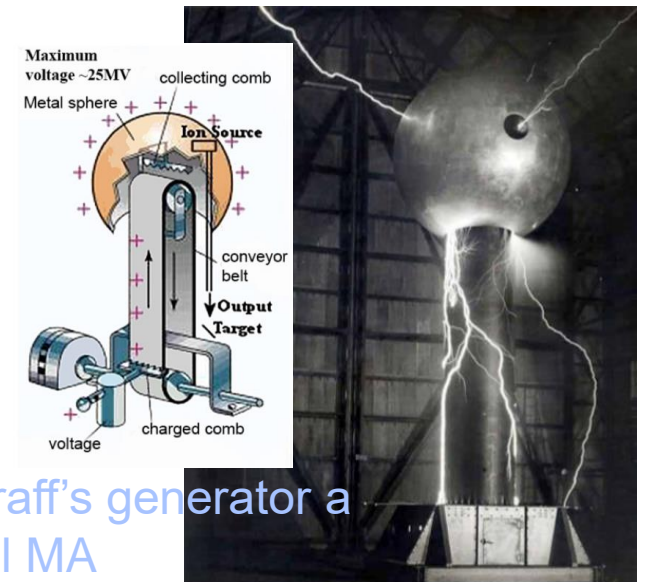
Limite:

Max. Voltaje $\sim 10\text{MV}$ debido a problemas de aislamiento \rightarrow Descarga eléctrica

Aceleradores electrostáticos aun se usan para bajas energías como primera aceleración. Radioterapia por ejemplo.

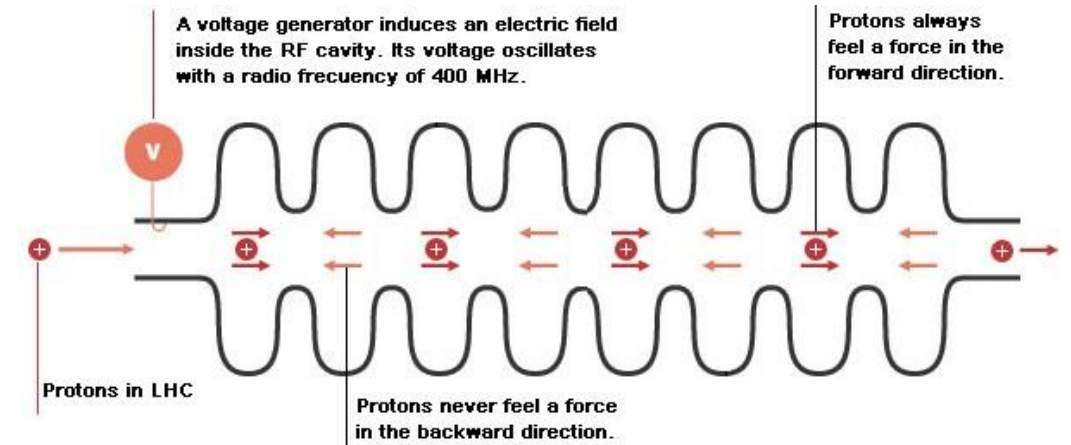
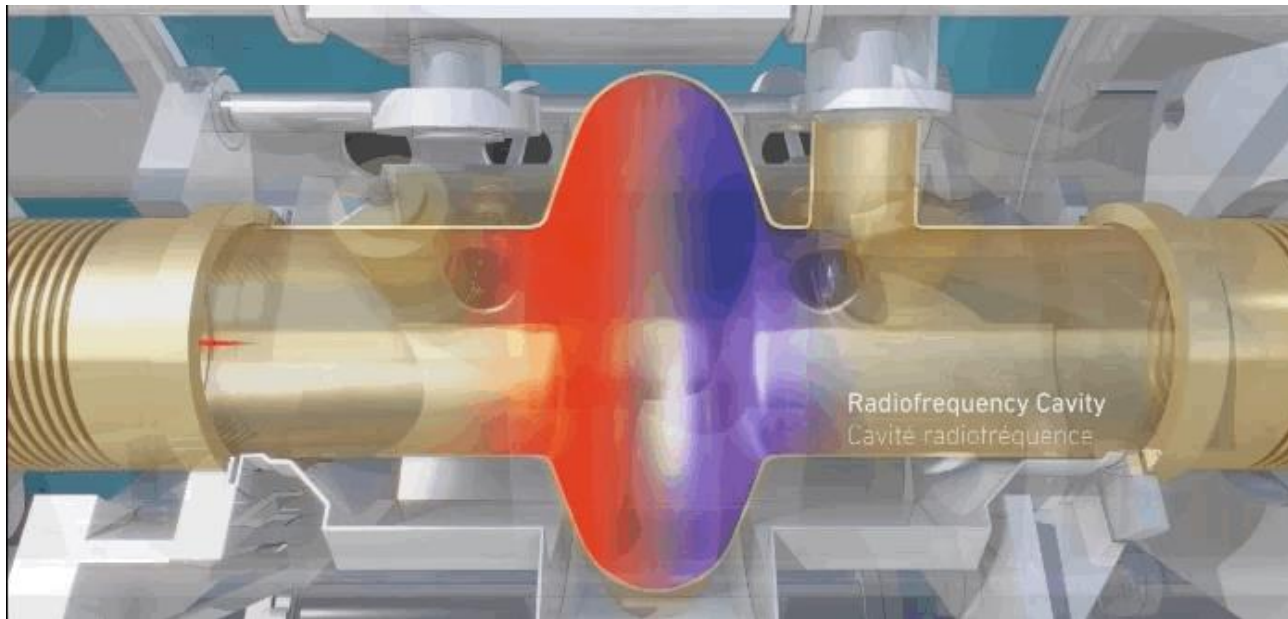


Cockcroft-Walton high voltage generator (600kV - 1964)



Van de Graaff's generator a Round Hill MA

Aceleración con cavidades de radio-frecuencia

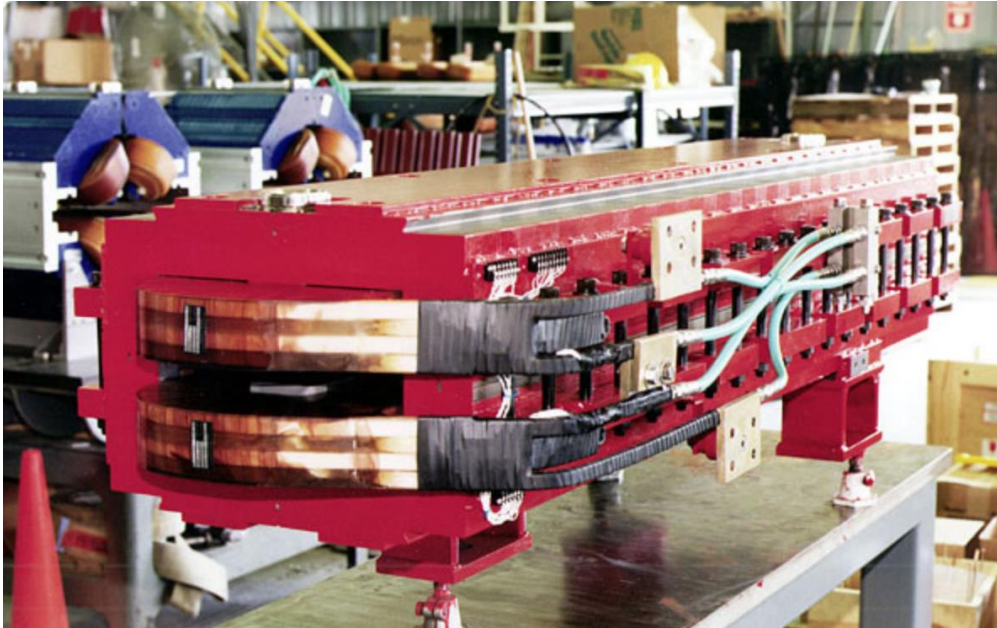


Paquetes de protones: BUNCHES

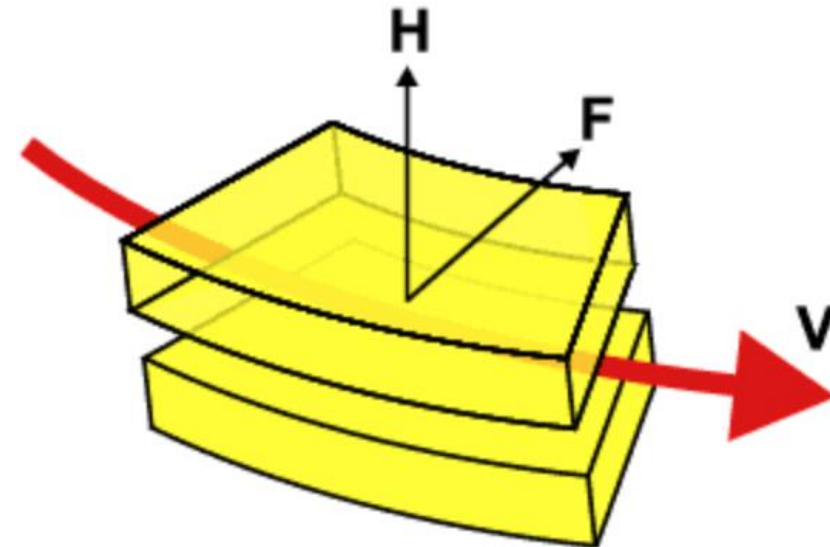
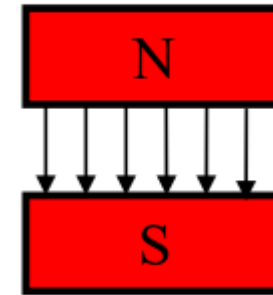


- *La cavidad de RF tiene una forma concreta para que las ondas electromagnéticas entren en resonancia y se acumulen dentro de la cavidad.*
- *El campo eléctrico se invierte mientras pasan las partículas, de ese modo se acelera a cada paso.*
- Se construyen cavidades de aceleración en serie intercalados con 'drift tubes'.
- Pueden acelerar en lineal y en máquinas circulares.

Imanes dipolares

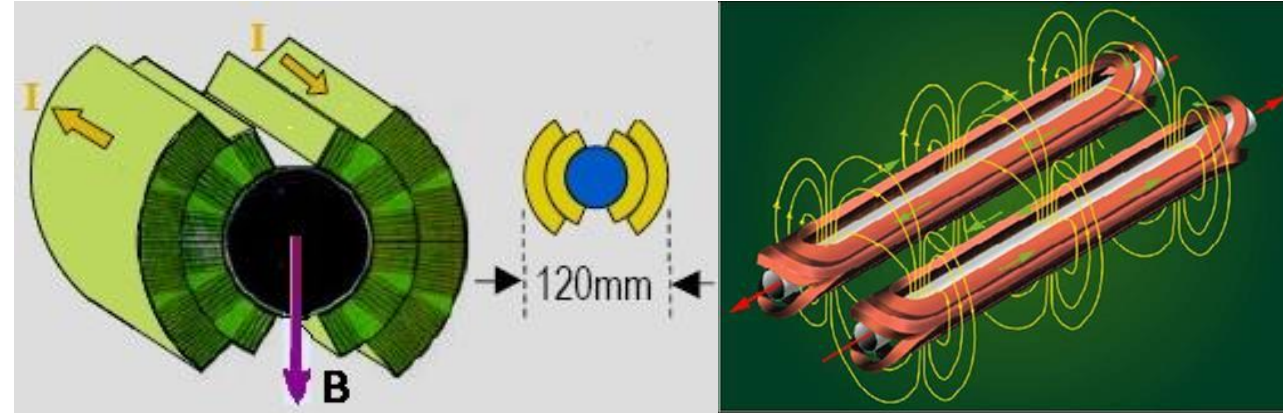
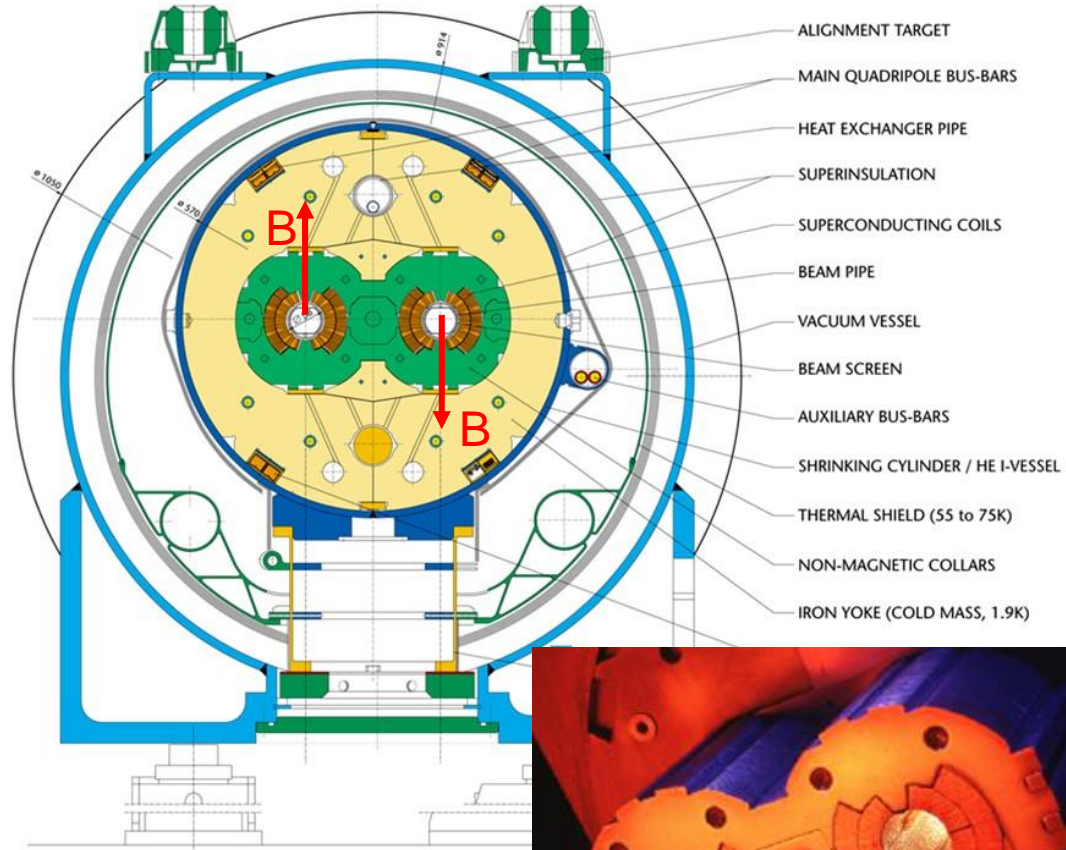


dipole



dipole

Dipolos del LHC



11800 Amperios circulan por los cables para generar un campo magnético de 8.33 T

Los cables están formados de hilos superconductores de Niobio-Titanio, enfriados a 1.9 K.

1232 dipolos de 15 m cubren el 66% del anillo

Movimiento transversal: trayectoria

Para mantener una trayectoria circular, la fuerza de Lorentz debe compensar la fuerza centrífuga.

$$F_L = evB \quad F_c = \frac{mv^2}{\rho} \text{ Radio}$$

$$\frac{mv^2}{\rho} = evB \rightarrow \frac{p}{e} = \rho B \rightarrow 0.3B[\text{T}] \approx \frac{p[\text{GeV}/c]}{\rho[\text{m}]}$$

$$p = mv$$

Rigidez Magnética

DIPOLOS LHC

El campo necesario para mantener partículas a 7000 GeV en un radio de 4.3 km es 5.4 T (pero no podemos llenar el acelerador solo de dipolos)

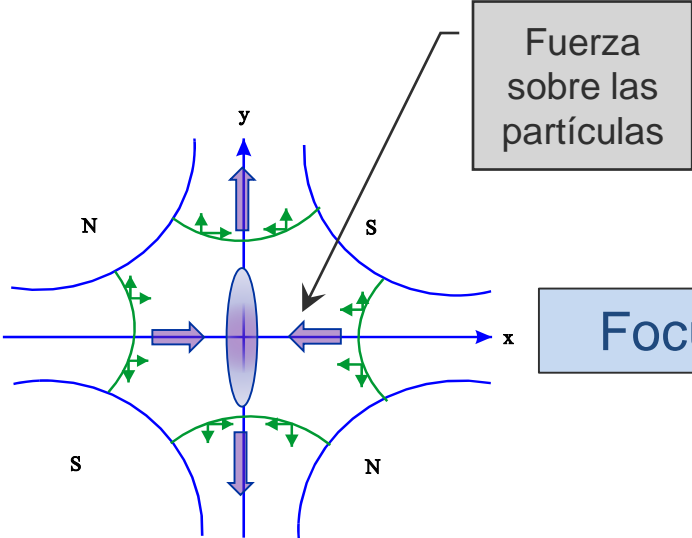
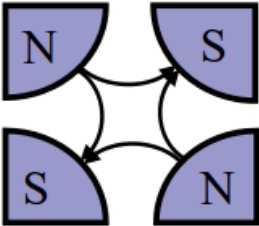
Si llenamos solo 2/3 de dipolos es 8.3 T

*Para que las partículas sigan una trayectoria circular **el campo magnético debe incrementar proporcionalmente al momento de las partículas.***

*Para un radio fijo, **el campo B dipolar esta definido por la Rigidez Magnética.***

Cuadrupolos

Los imanes cuadrupolares se usan para mantener el tamaño del haz.



Focusing Quadrupole

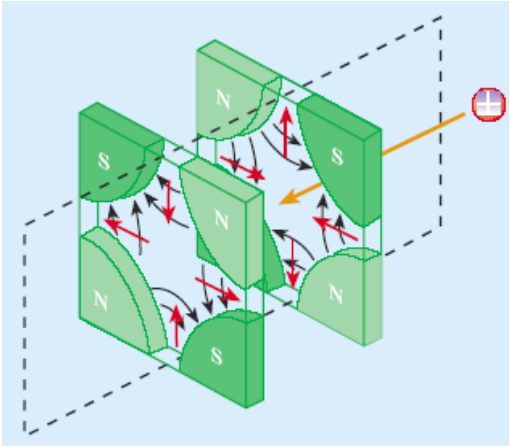


Rotado 90°

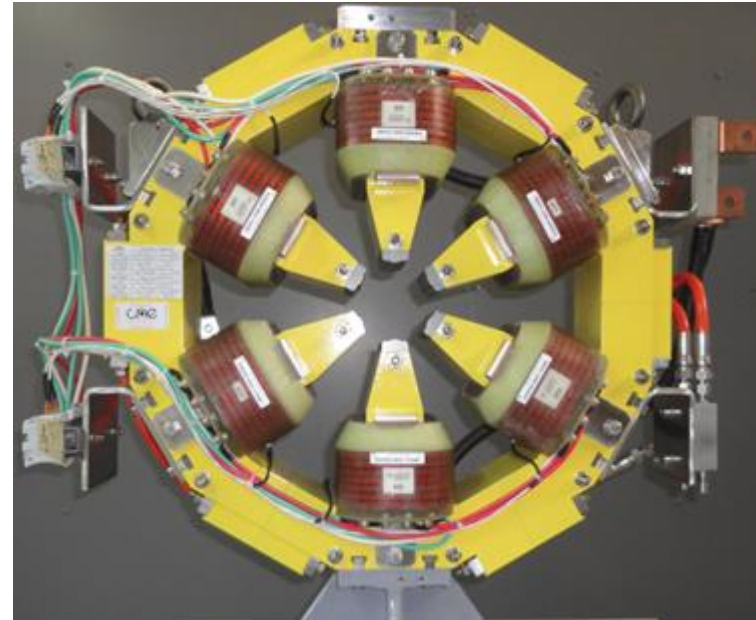
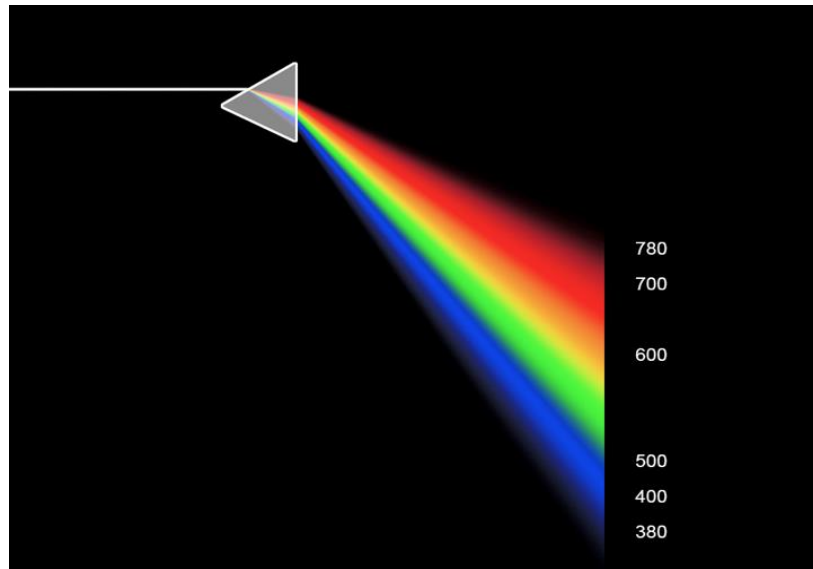


De-focusing Quadrupole

Un cuadrupolo focalizando en el plano horizontal des-focaliza en el plano vertical y viceversa.



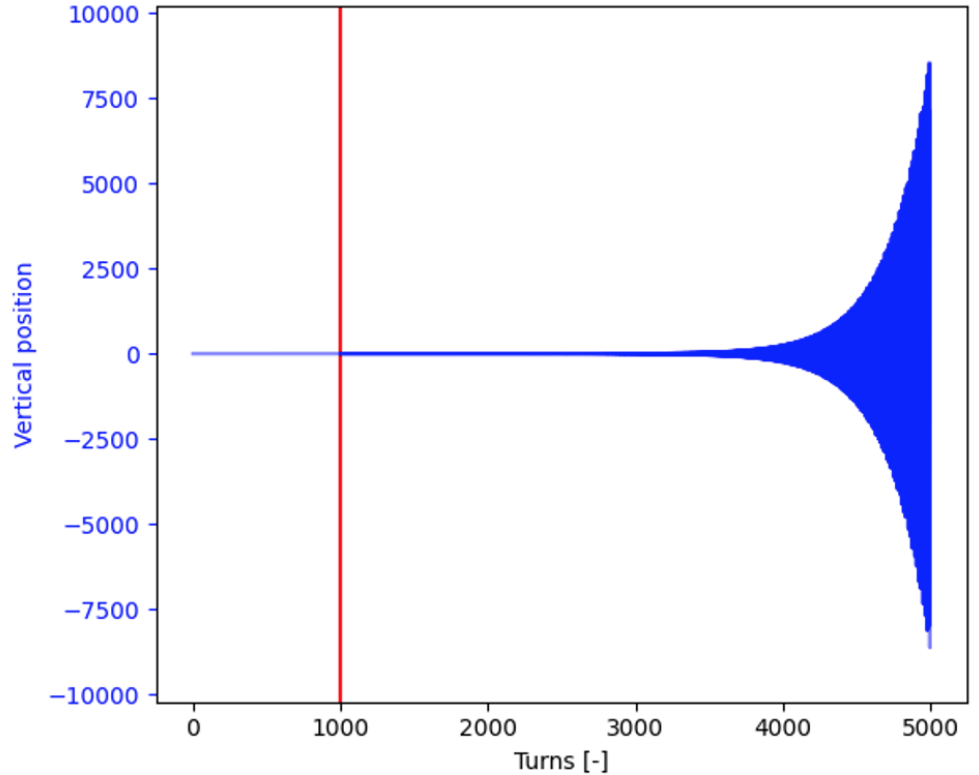
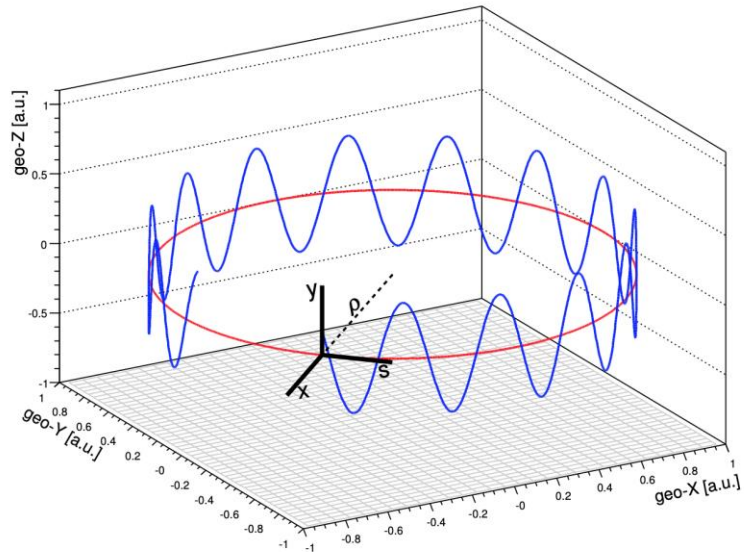
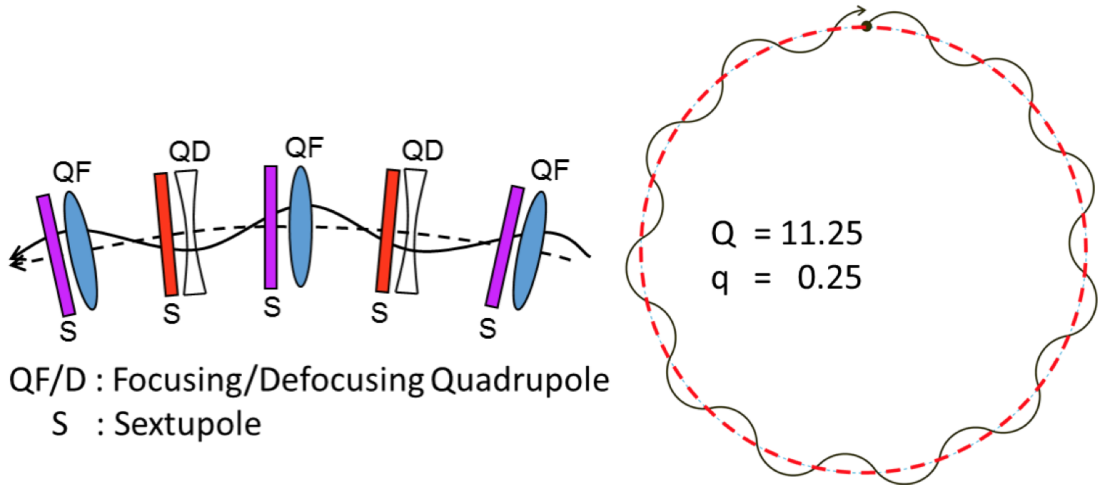
Sextupolos (Cromaticidad)



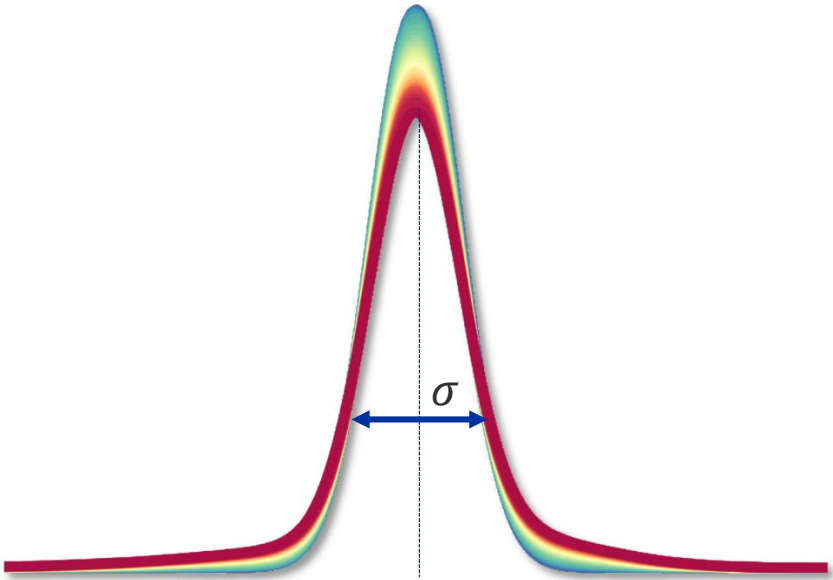
Efectos que limitan el rendimiento del acelerador

- Space charge
- Intra Beam Scattering (IBS)
- Electron cloud: nube de electrones
- Cambio de la frecuencia de oscilación (tune) del haz a causa de la impedancia.

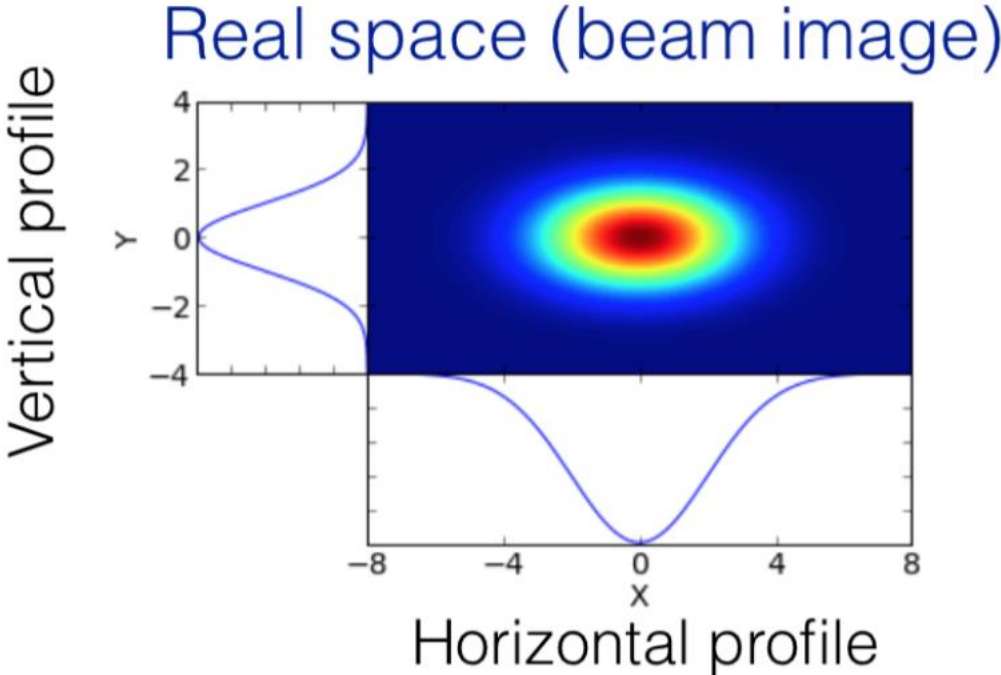
Inestabilidades del haz de partículas



Perfil transversal del haz de partículas



Perfil transversal del haz de protones



Luminosidad

Es una medida del número de **colisiones** que pueden producirse en un detector **por cm² y por segundo**.
Para dos haces Gaussianos colisionando frontalmente, la luminosidad se expresa así:

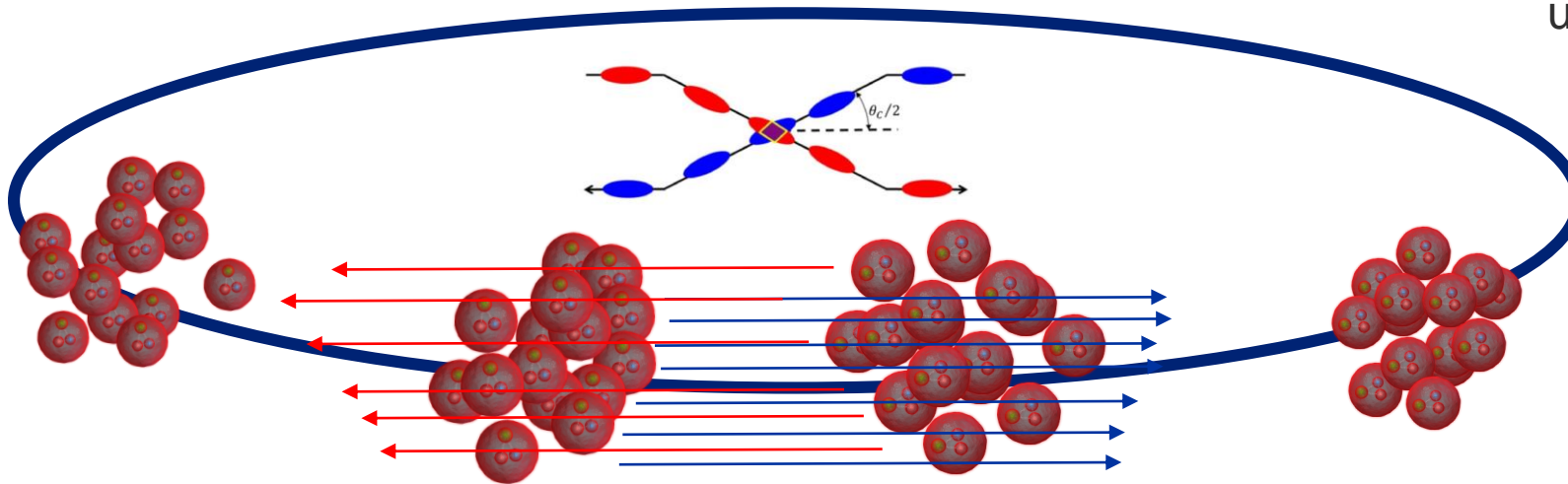
$$L = \frac{N^2 n_b f_{rep}}{4\pi\sigma^2}$$

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

Acelerador
Luminosidad

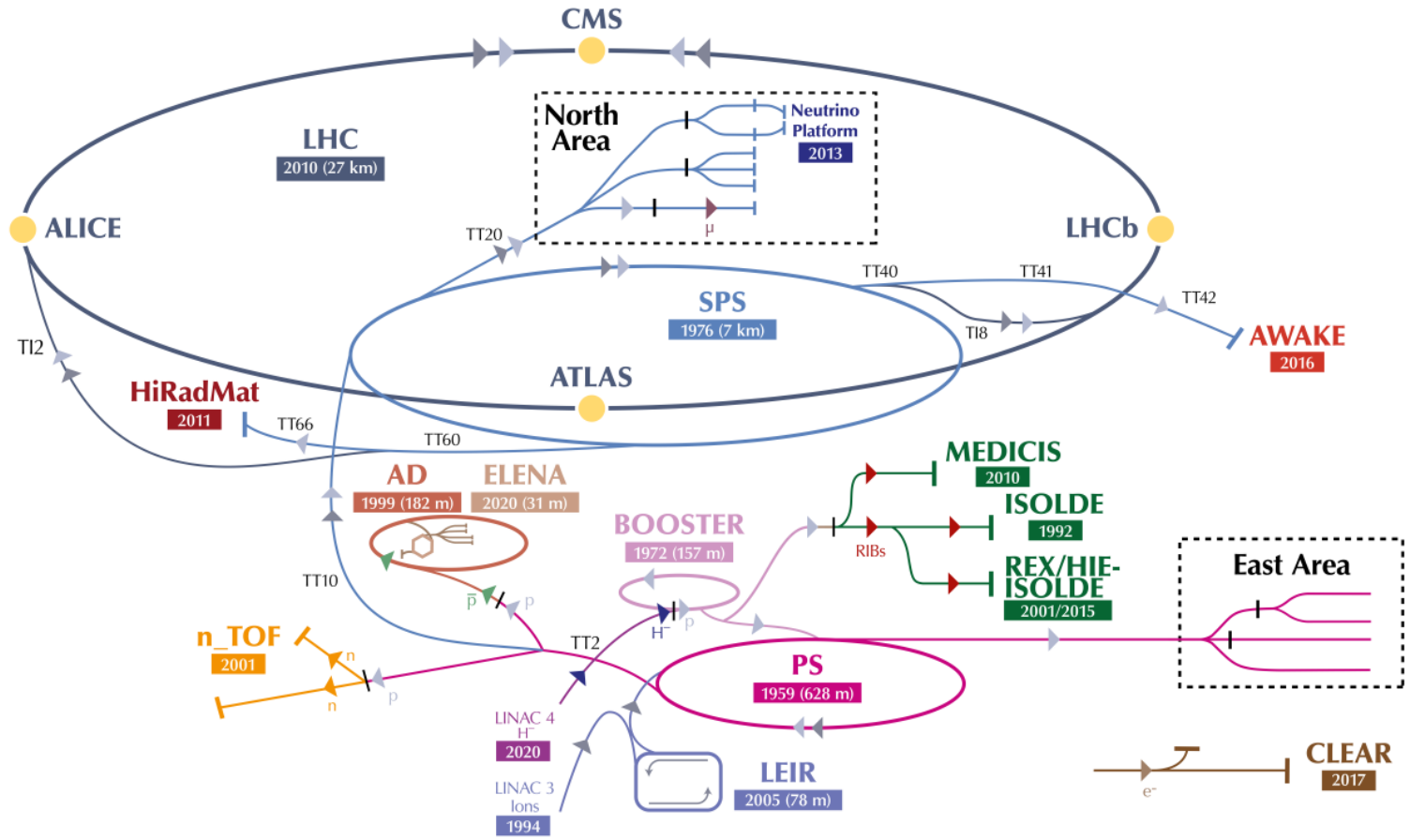
Natura

Sección Eficaz:
Probabilidad de que un evento ocurra



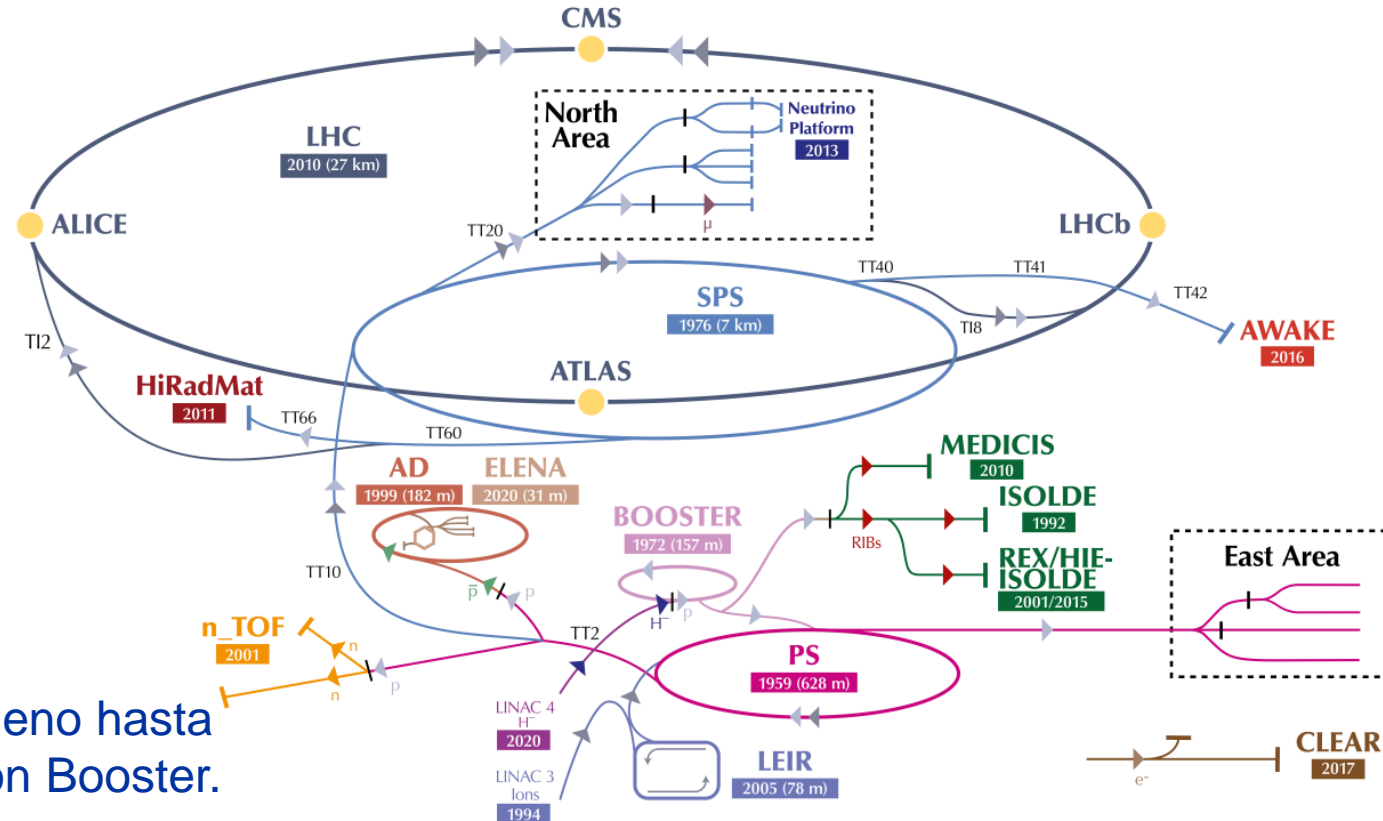
Complejo de aceleradores del CERN

The CERN accelerator complex
Complexe des accélérateurs du CERN



LINAC 4

The CERN accelerator complex Complexe des accélérateurs du CERN

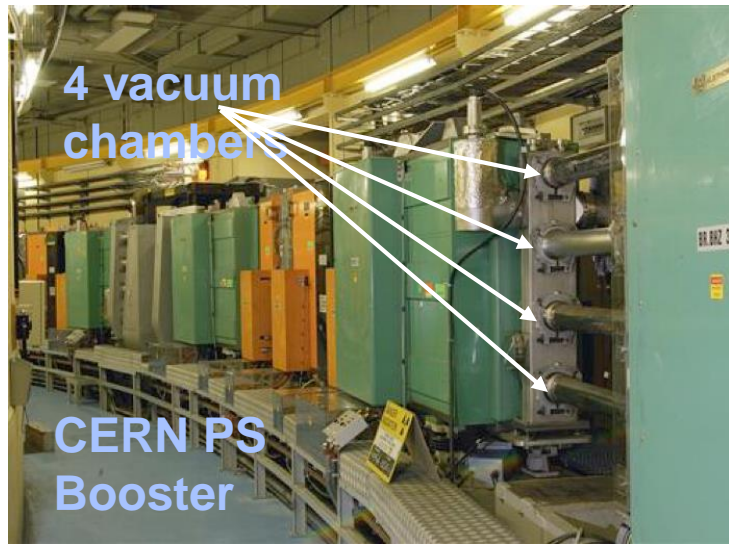


LINAC4 (86 m) acelera iones negativos de Hidrogeno hasta 160 MeV para inyectarlos en el Proton Synchrotron Booster.

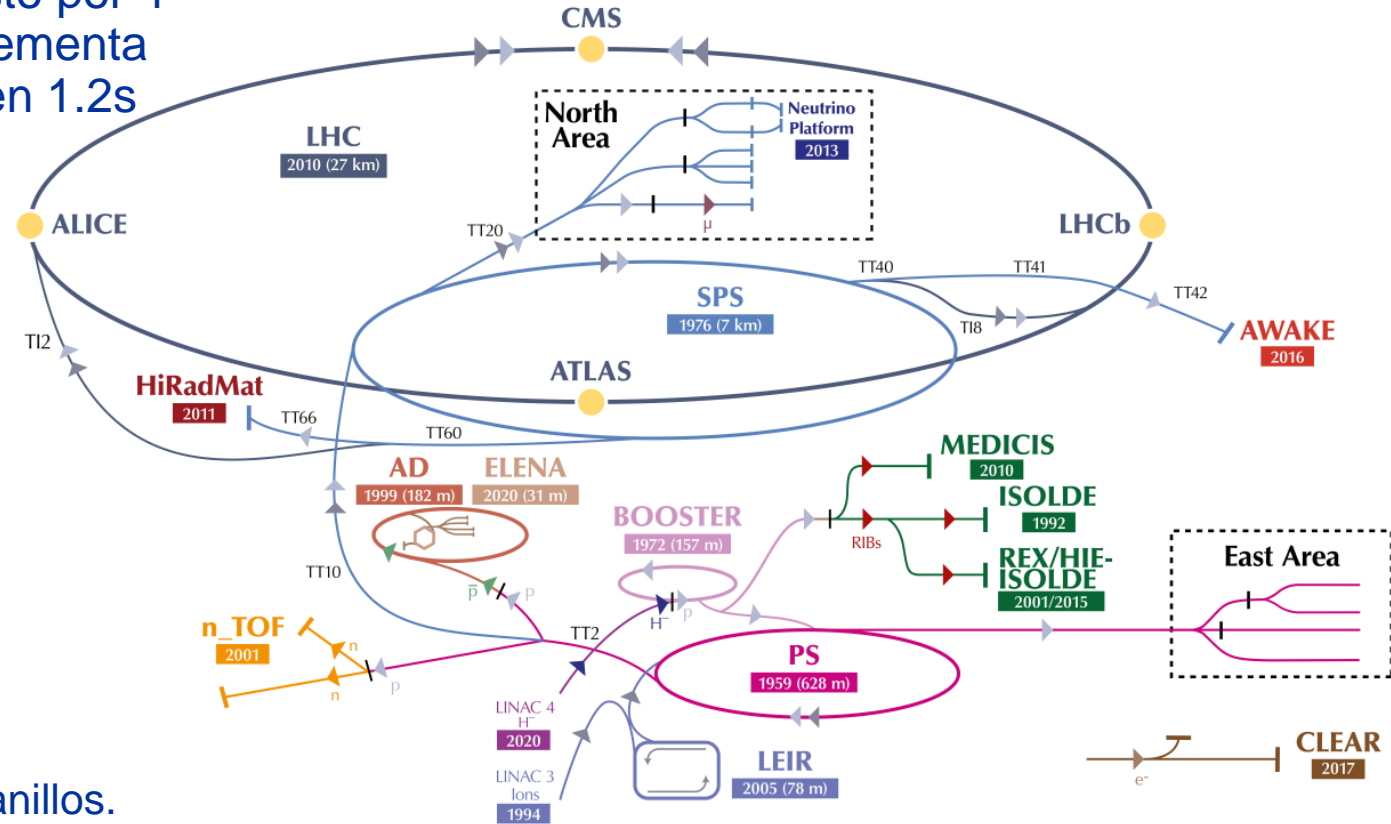
LINAC3 acelera iones pesados (plomo) para inyectarlos en el LEIR (Low Energy Ion Ring).

PS Booster

1^{er} Síncrotrón 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



The CERN accelerator complex Complexe des accélérateurs du CERN



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).

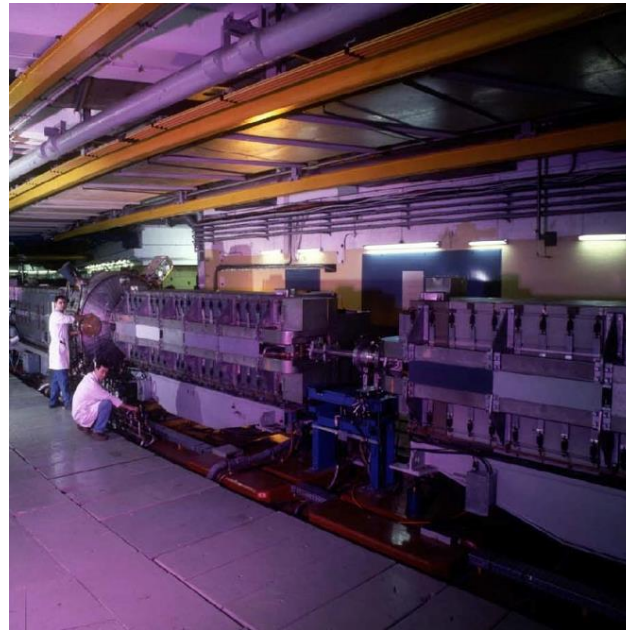
PS: Proton Synchrotron

El más antiguo en el CERN desde 1959

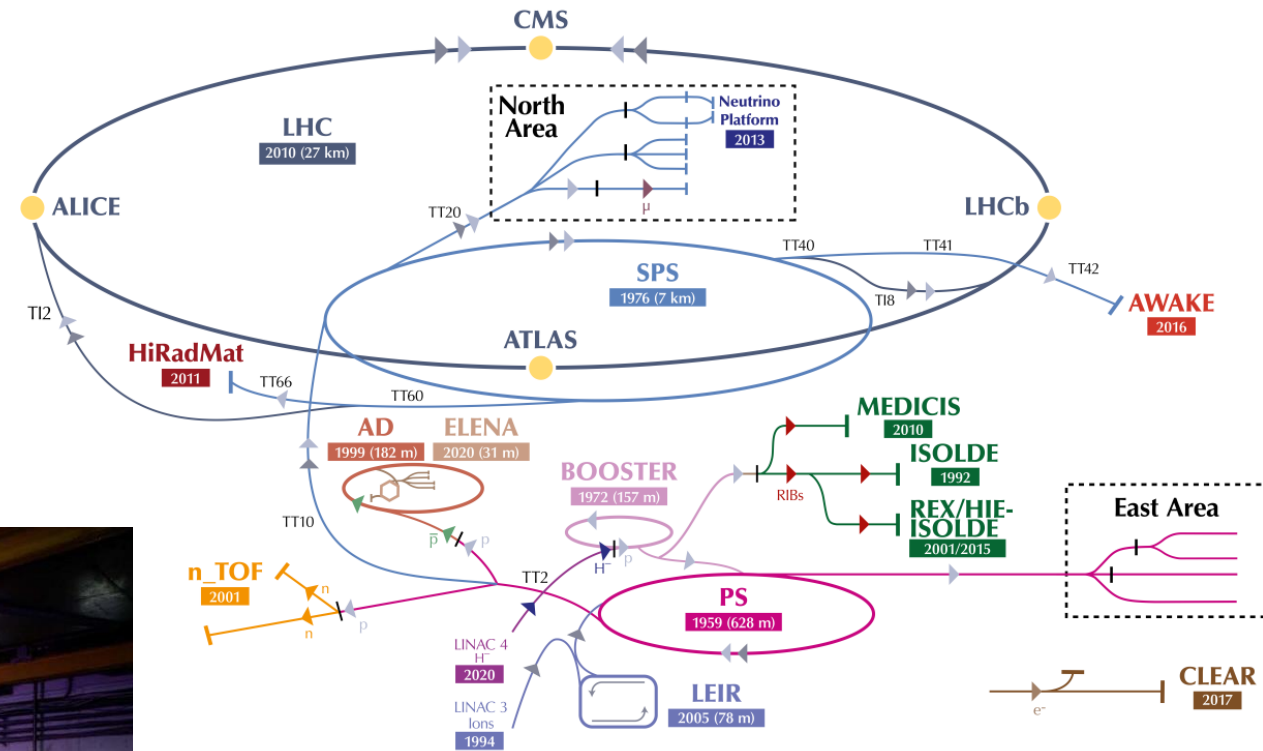
Circunferencia de 628 m

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

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



The CERN accelerator complex Complexe des accélérateurs du CERN



SPS

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

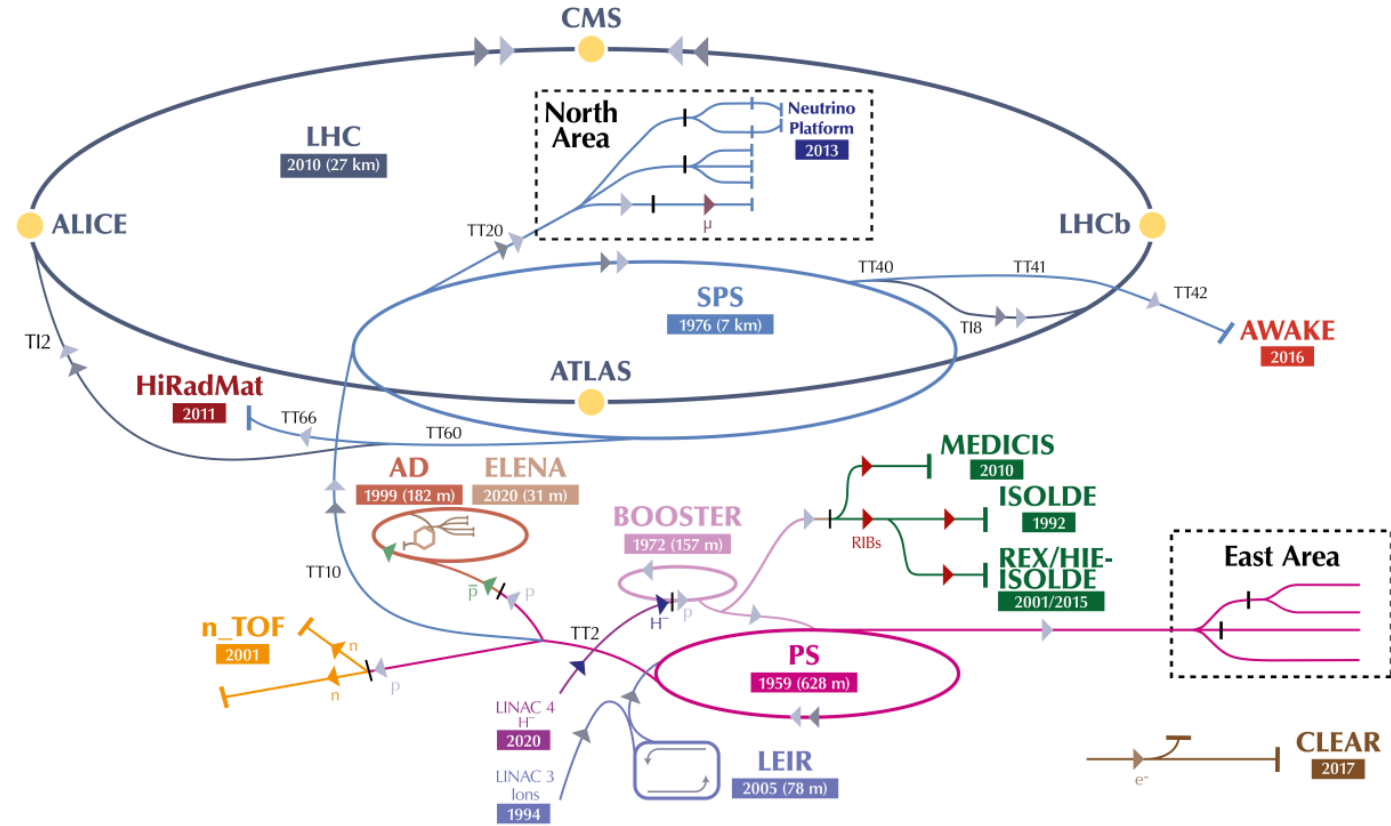
Circunferencia de 6.9km

Acelera de 26GeV hasta 450GeV

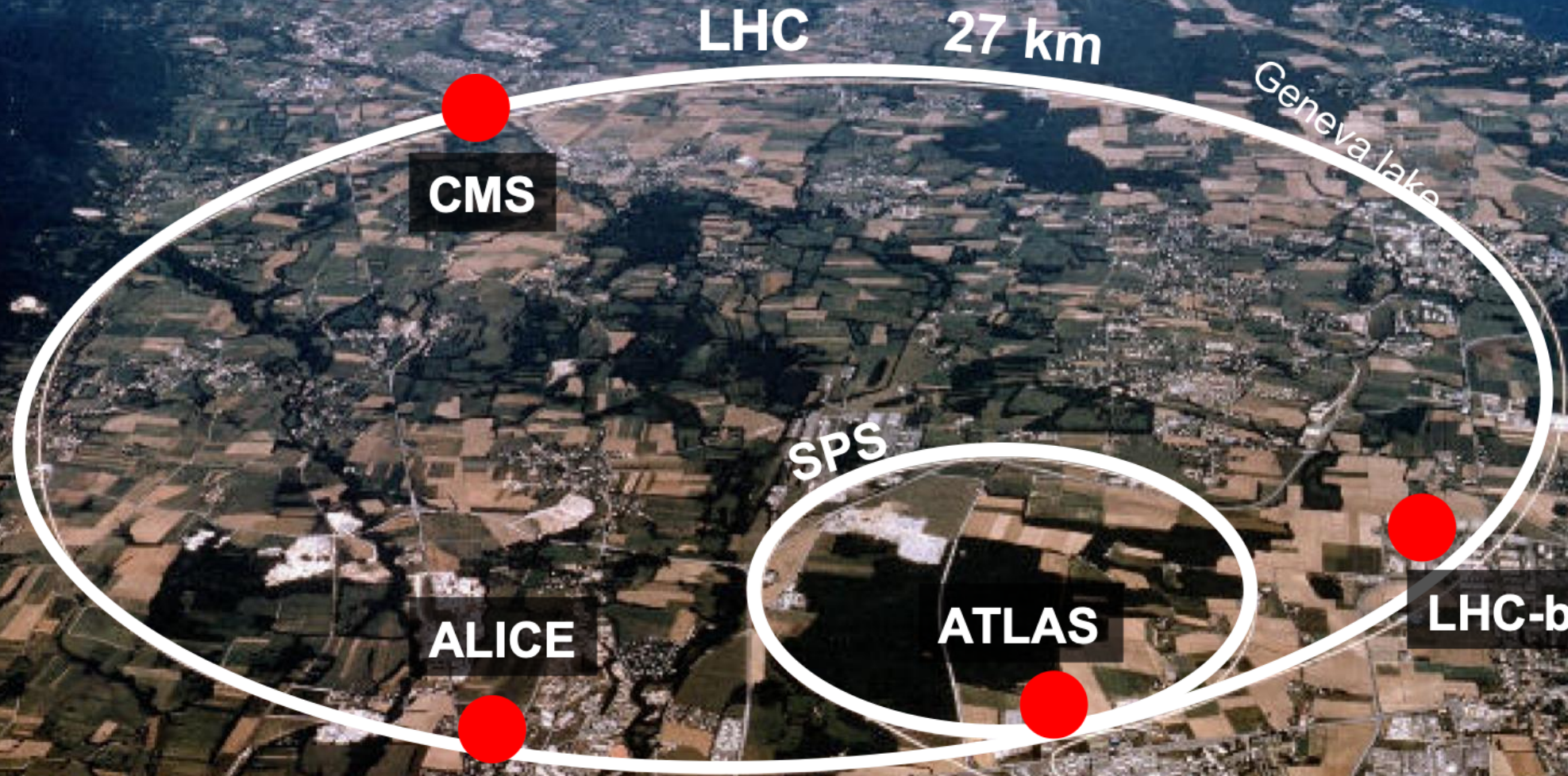
- Extracción hacia:
El Area Norte, LHC, AWAKE and HiRadMat



The CERN accelerator complex *Complexe des accélérateurs du CERN*



LHC



CMS

ALICE

SPS

ATLAS

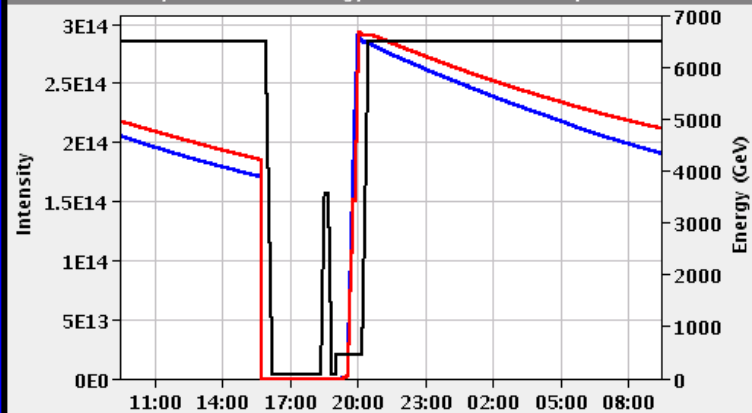
LHC-b

PROTON PHYSICS: STABLE BEAMS

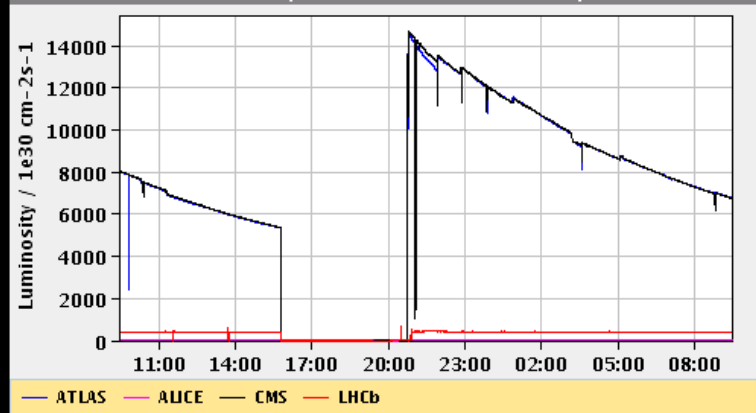
Energy: 6499 GeV I(B1): 1.90e+14 I(B2): 2.12e+14

Inst. Lumi [(ub.s)⁻¹] IP1: 6777.96 IP2: 2.53 IP5: 6749.57 IP8: 412.68

FBCT Intensity and Beam Energy Updated: 09:26:39



Instantaneous Luminosity Updated: 09:26:41



Comments (31-Jul-2017 05:06:18)

Fill for physics

XING angle at 120urad

BIS status and SMP flags

B1 B2

| | | |
|-----------------------------|-------|-------|
| Link Status of Beam Permits | true | true |
| Global Beam Permit | true | true |
| Setup Beam | false | false |
| Beam Presence | true | true |
| Moveable Devices Allowed In | true | true |
| Stable Beams | true | true |

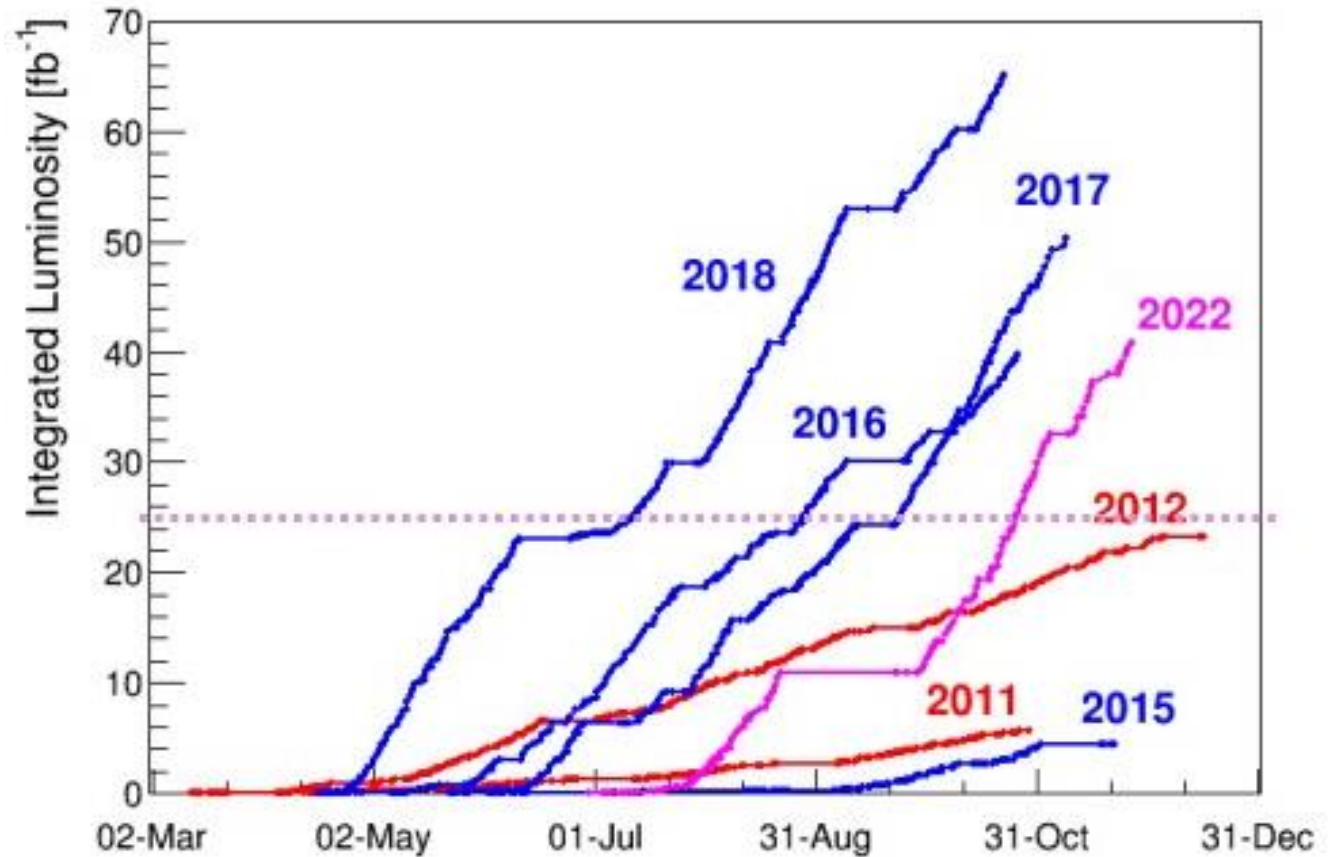
AFS: 25ns_2556b_2544_2215_2332_144bpi_20inj

PM Status B1 **ENABLED** PM Status B2 **ENABLED**

Rendimiento del LHC. Luminosidad integrada

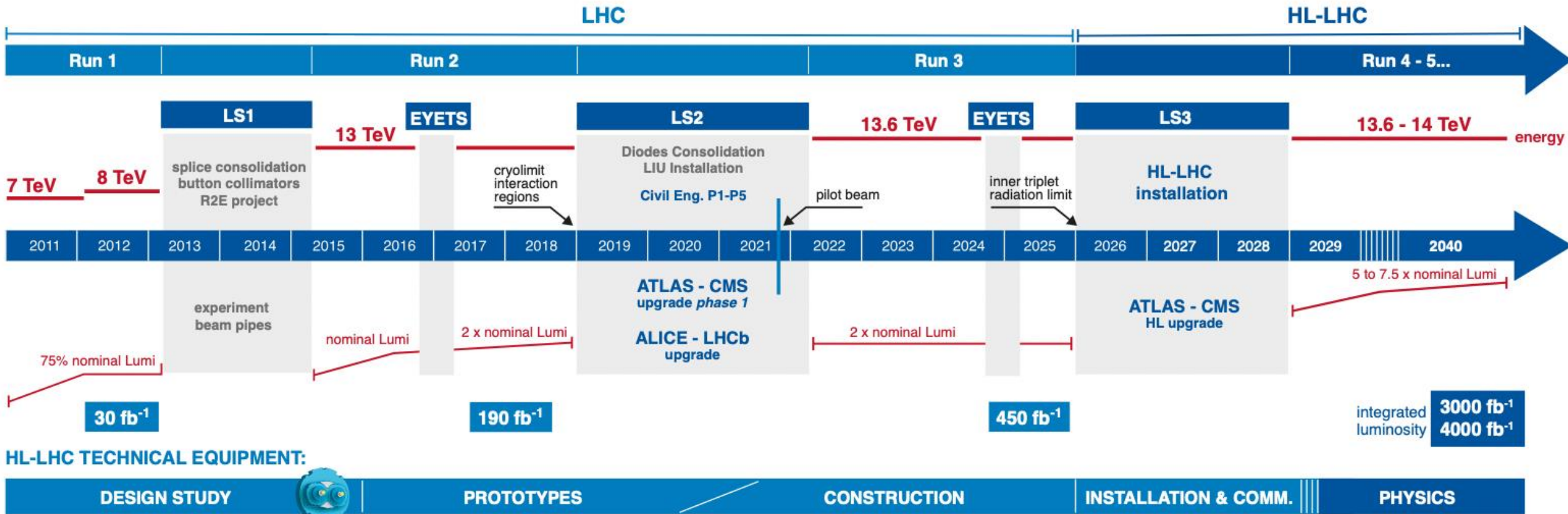
$$\mathcal{L}_T = \int \mathcal{L} dt$$

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

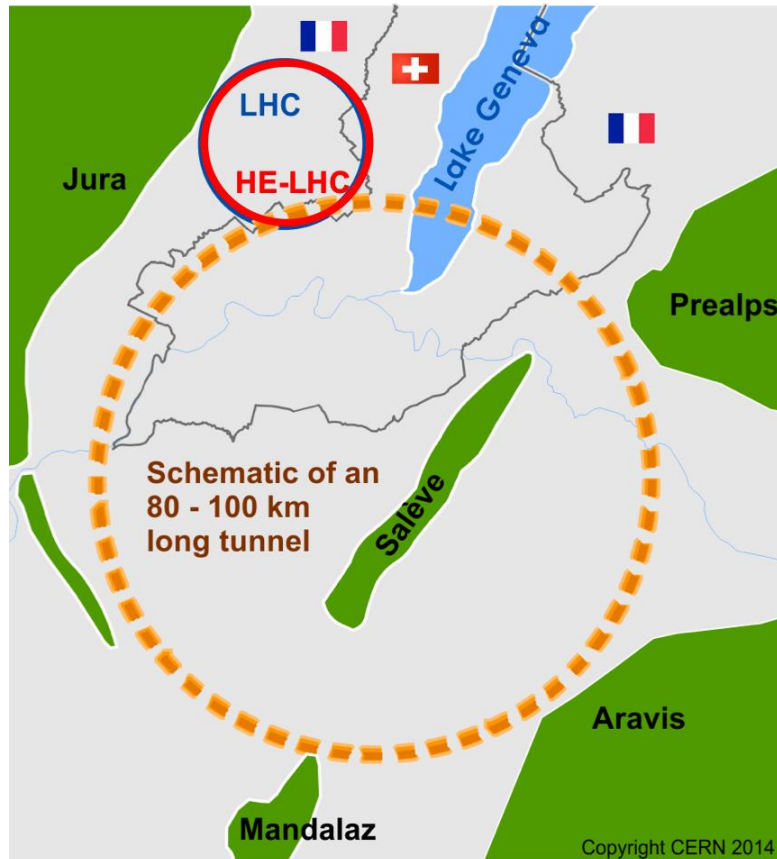




LHC / HL-LHC Plan



Future Circular Collider (FCC)



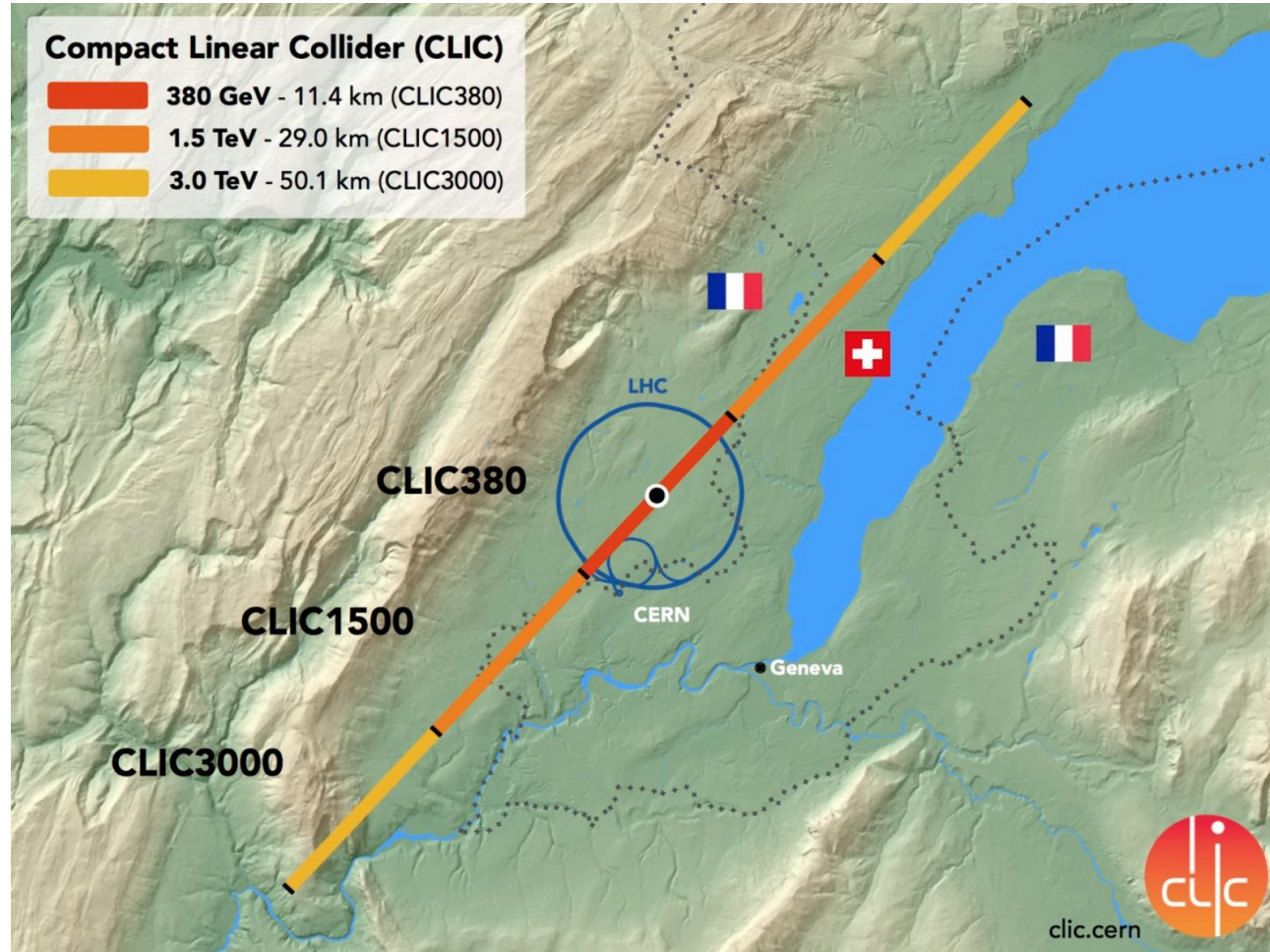
1. Primera fase: colisionador de $e+e-$ FCC-ee

E_{ecm} 90 - 365 GeV

2. Segunda fase: colisionador pp FCC-hh

E_{ecm} 50 - 100 TeV

CLIC (Compact Linear Collider)



¡Muchas gracias!