

# Aceleradores Presente y Futuro



**VII ESCUELA UNIANDINA  
DE FÍSICA DE PARTÍCULAS**

**Diciembre 5 – 7 de 2022**

**Bernardo Gómez Moreno  
(Dr.rer.nat.)**

**Profesor Emérito  
Universidad de los Andes**

# **Aceleradores Presente y Futuro**



**Fundamentos de  
Aceleradores y Colisionadores  
Hadrónicos y Leptónicos**

**Sincrotrón y  
Colisionadores Circulares**

**Colisionadores Lineales**

**Nuevos Desarrollos y  
proyectos futuros**

**Conclusiones**

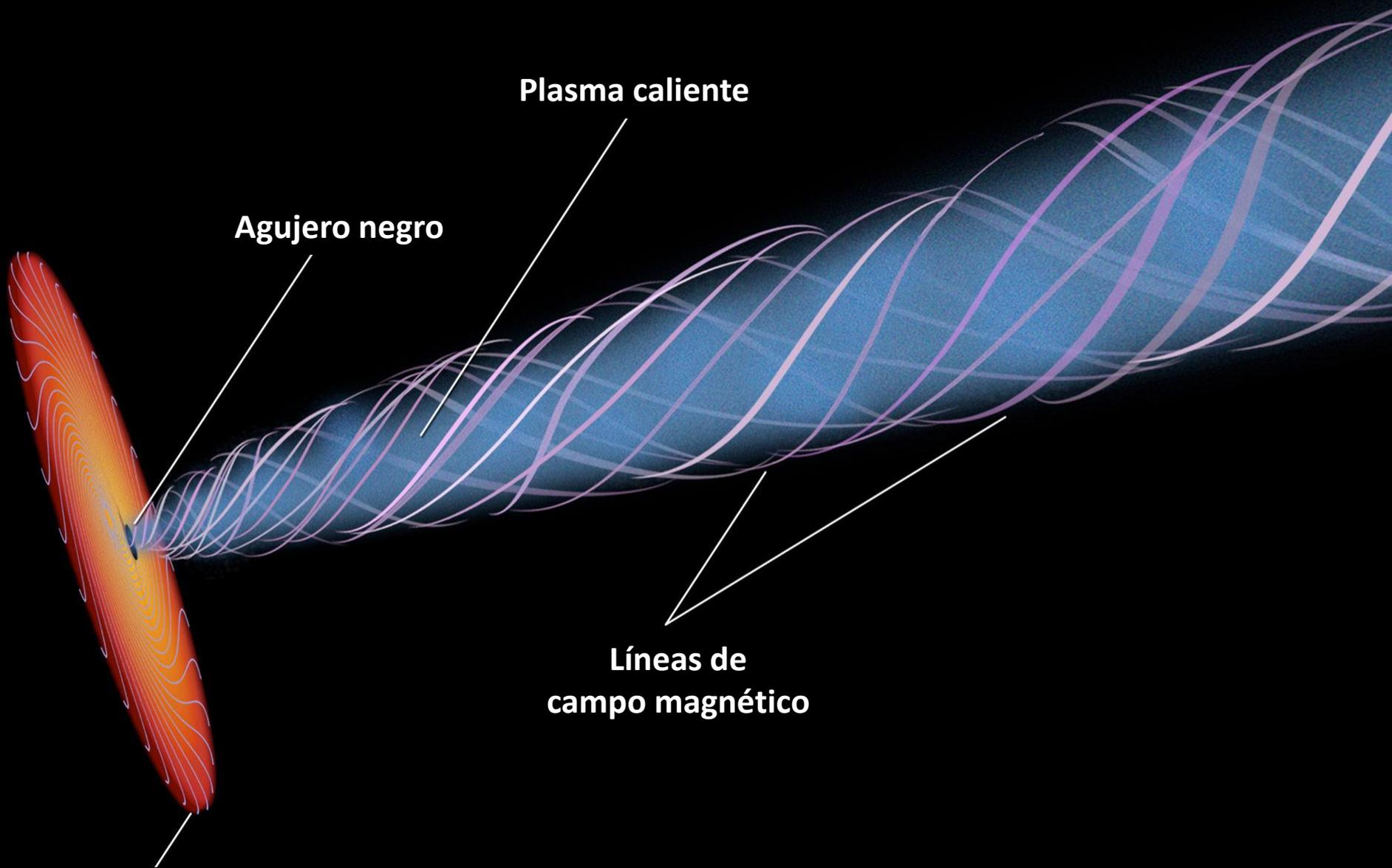


Agujero negro supermasivo de 6500 millones de masas solares como el M87.

Jet de acreción de millones de años luz

Disco de acreción de 1000 millones de km

# Formación de un jet a partir del disco de acreción de un agujero negro



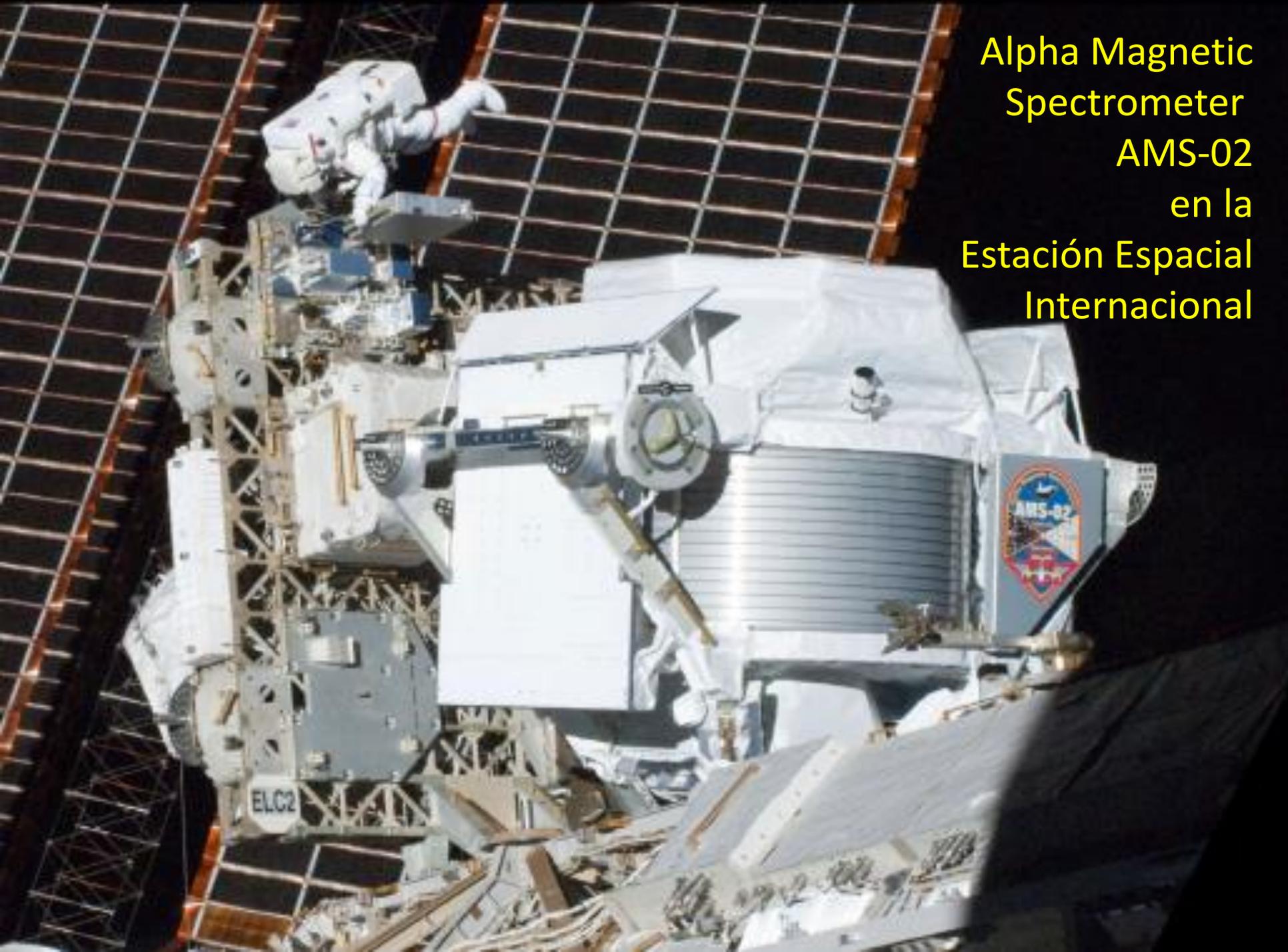
Agujero negro

Plasma caliente

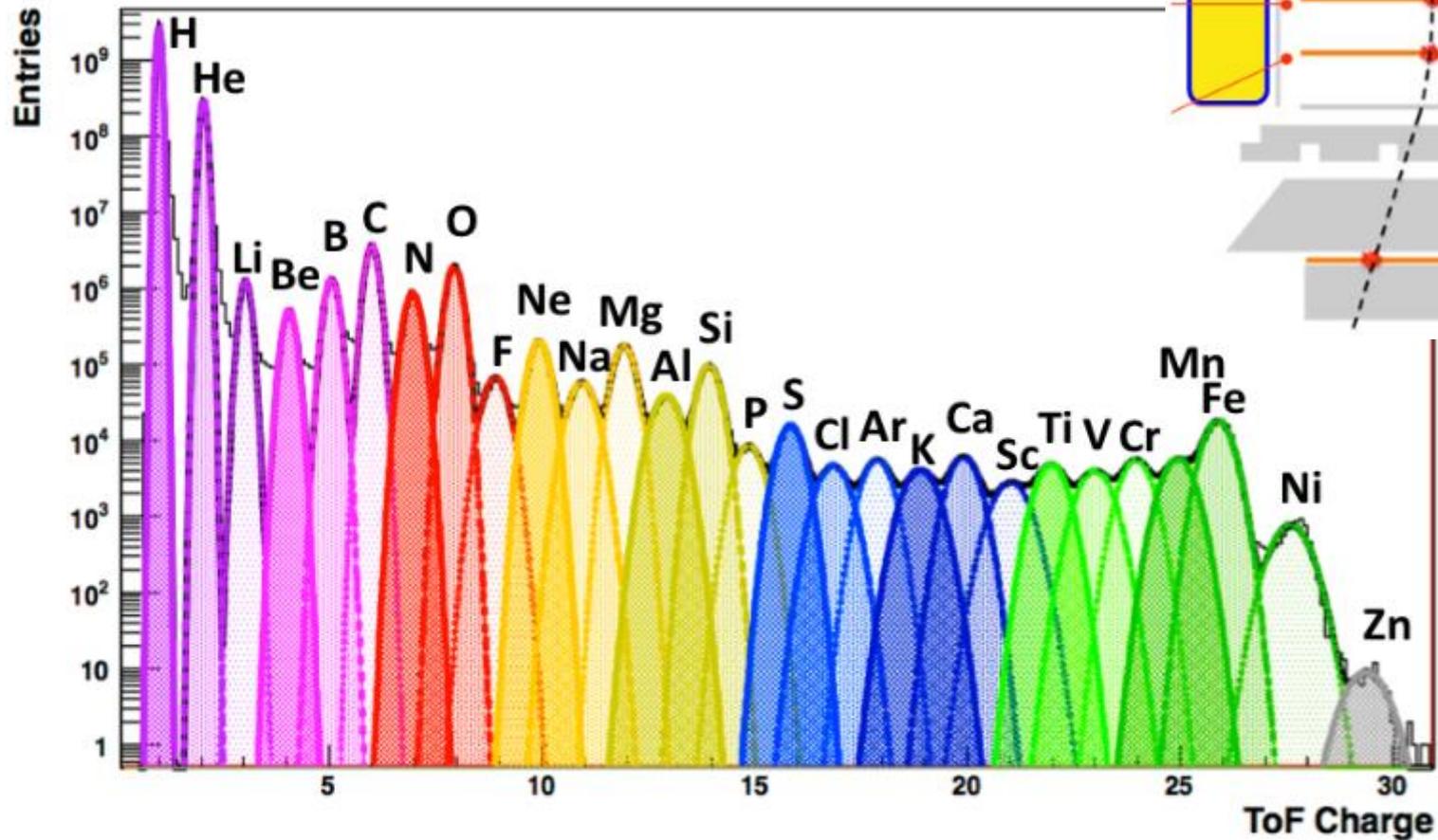
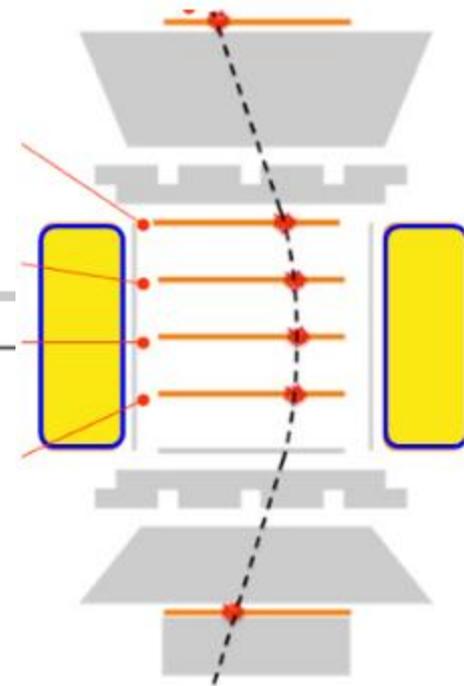
Líneas de  
campo magnético

Disco de acreción

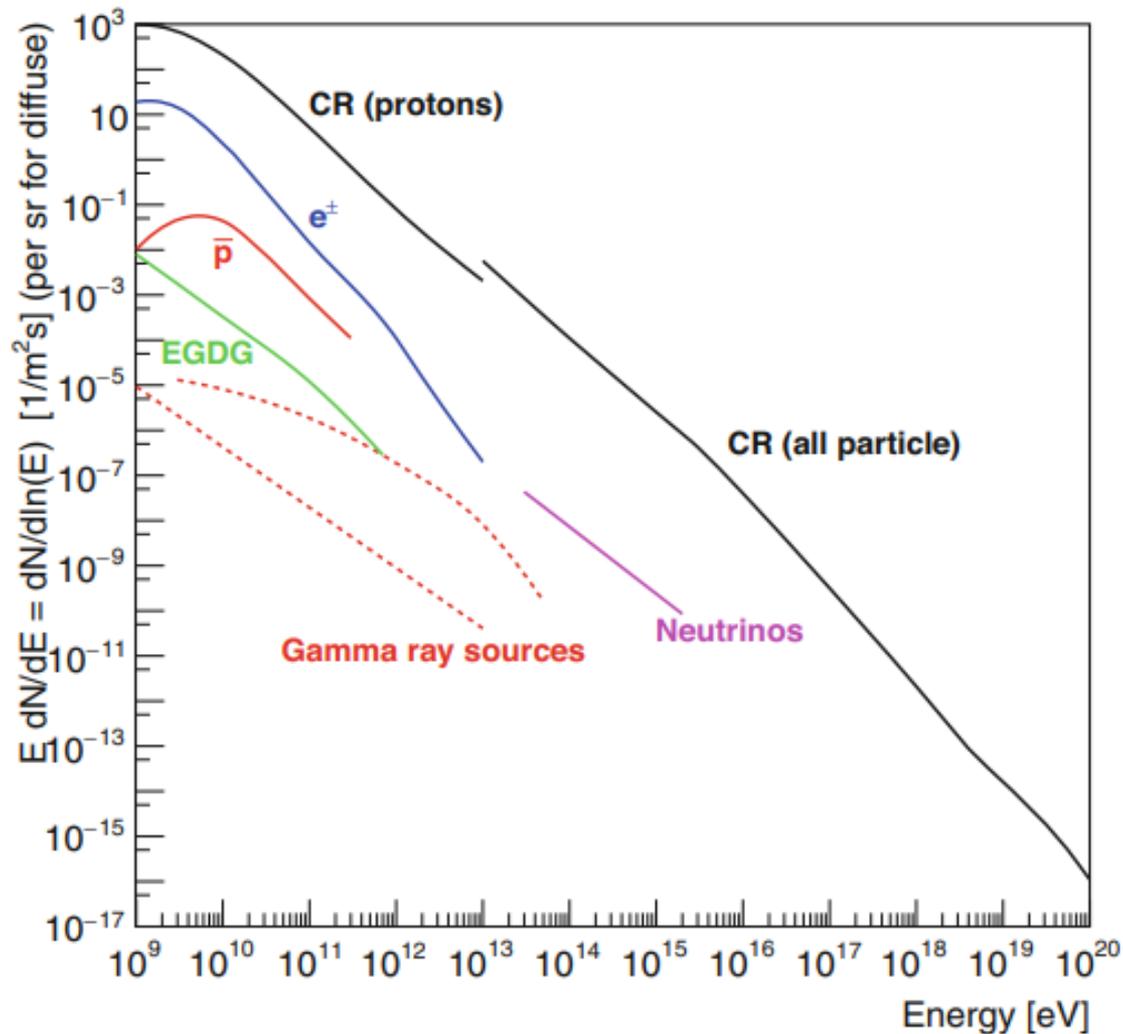
Alpha Magnetic  
Spectrometer  
AMS-02  
en la  
Estación Espacial  
Internacional



# AMS-02 Detector



Distribución de núcleos atómicos, elementos químicos, en los rayos cósmicos.  
Medición del Alpha Magnetic Spectrometer, AMS-02.



## Flujo de partículas de rayos cósmicos

expresado como rata por intervalo logarítmico de energía vs. energía en [eV]

$$E \cdot \frac{dN}{dE} = \frac{dN}{d \ln(E)}$$

# **Aceleradores Presente y Futuro**



**Fundamentos de  
Aceleradores y Colisionadores  
Hadrónicos y Leptónicos**

**Sincrotrón y  
Colisionadores Circulares**

**Colisionadores Lineales**

**Nuevos Desarrollos y  
proyectos futuros**

**Conclusiones**

Ahora aterrizando...

con nuestros aceleradores en Tierra:

*¿qué energías alcanzamos?*

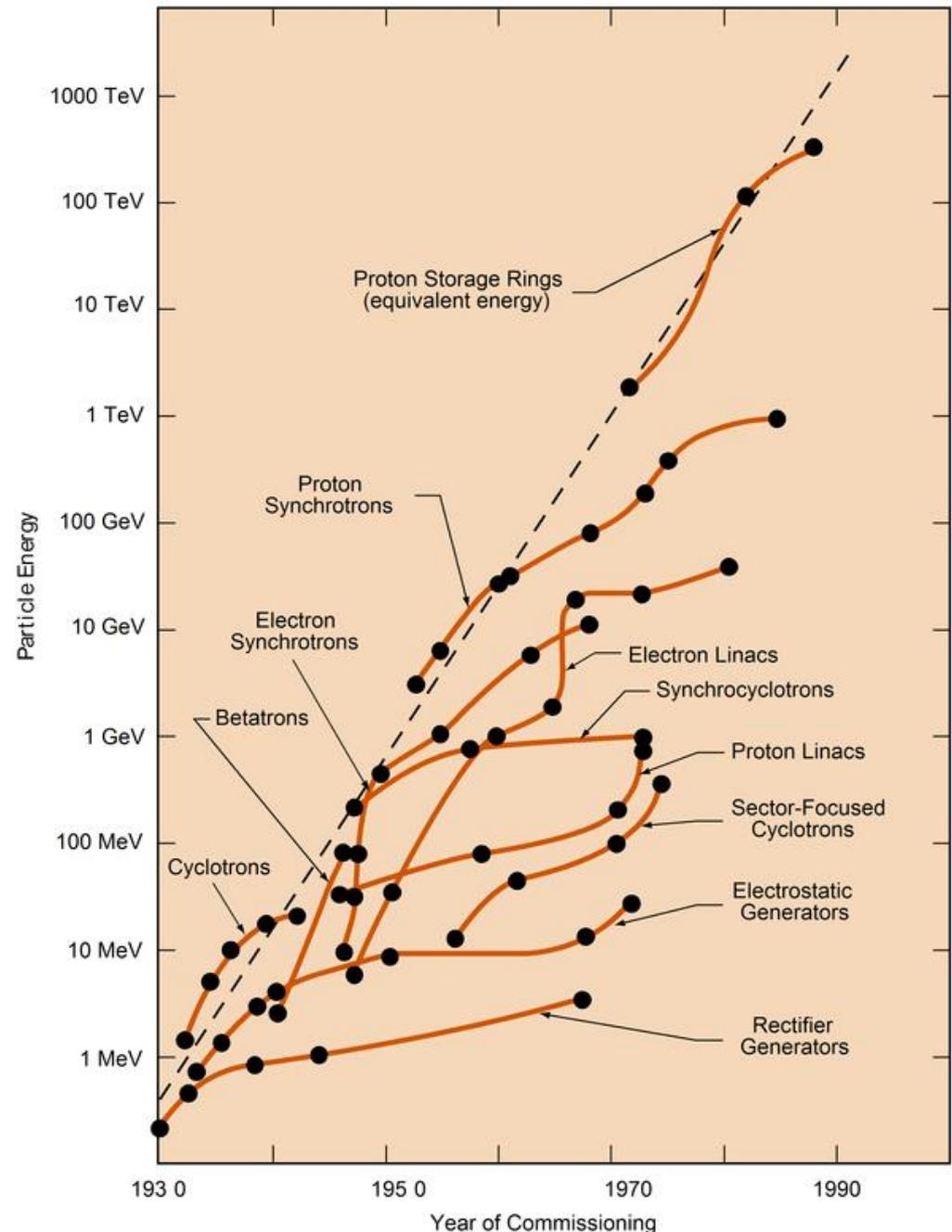
*¿con cuáles partículas?*

*Y... ¿cómo las aceleramos?*

LHC

# ¿Hasta qué energía logramos llegar?

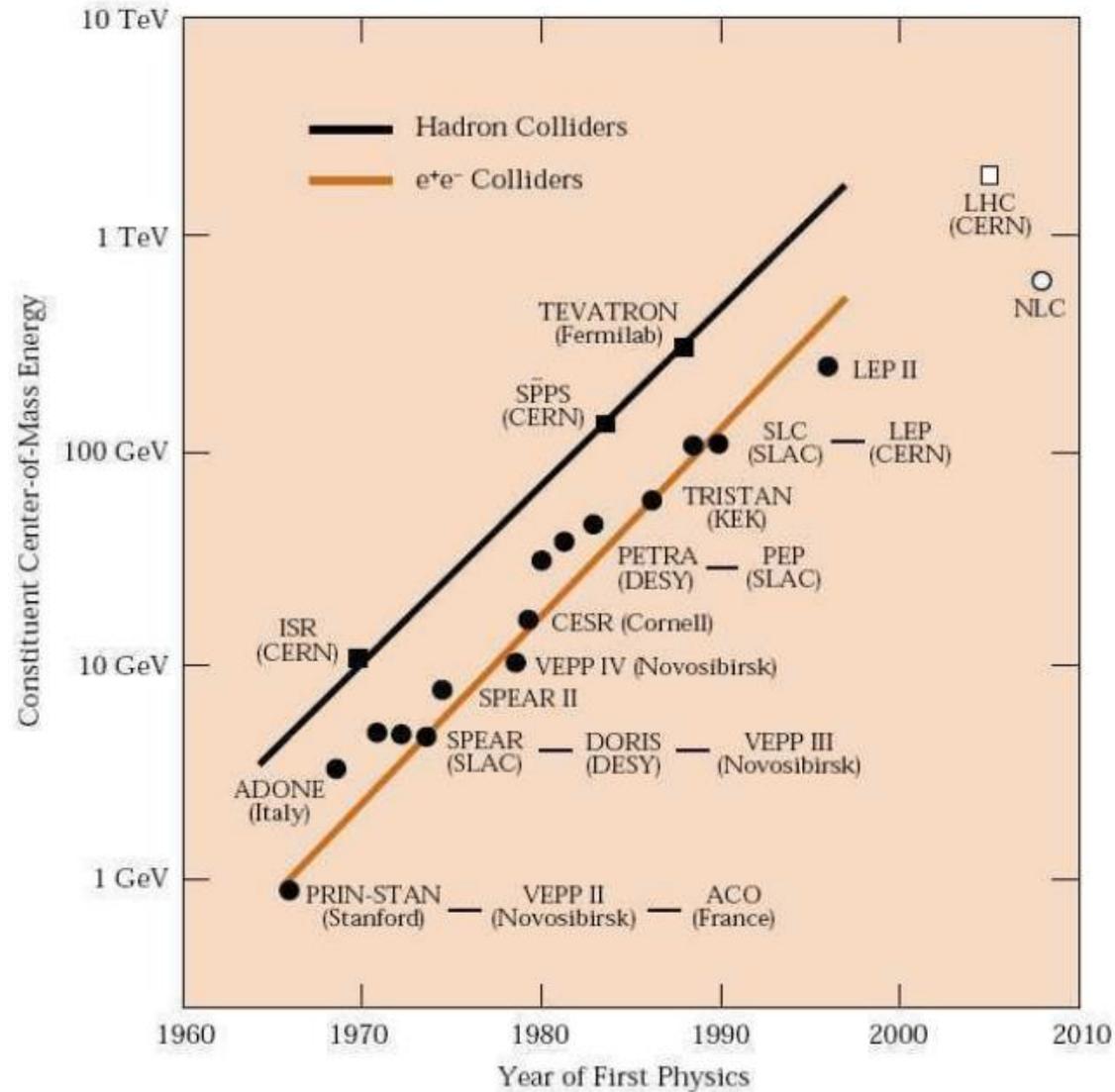
El avance en la Física de Partículas depende de la frontera en las altas energías que dan los aceleradores



Plot de Livingston

# ¿Hasta qué energía logramos llegar?

El avance en la Física de Partículas depende de la frontera en las altas energías que dan los aceleradores



Plot de Livingston

Con los aceleradores de partículas...

aceleramos partículas cargadas eléctricamente y estables:

$$q \neq 0 \quad \text{y} \quad \tau \geq 1 \mu\text{s}$$

Principalmente: electrón  $e^-$  y protón  $p$

y sus antipartículas: positrón  $e^+$  y antiprotón  $\bar{p}$ .

Iones:  ${}_Z^A X^{q/e} : {}_1^1 H^+ = p, {}_1^1 H^-, {}_2^4 He^{2+} = \alpha \dots {}_{92}^{238} U^{n+} \dots$

Muones:  $\mu^+, \mu^-$  aunque son inestables, pero:  $\tau = 2.2 \mu\text{s}$

Y producimos...

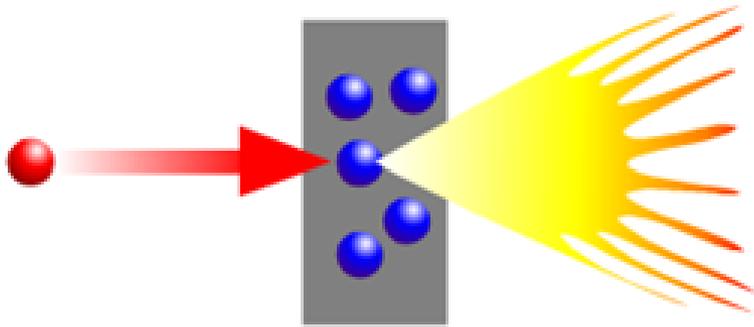
Pión:  $\pi^+$  ( $\tau = 26 \text{ ns}$ ), neutrón  $n$ , neutrino  $\nu$ , fotón  $\gamma$  ...

Para destacar:

---

$$\text{Electrón: } m_0 c^2 = 0.511 \text{ MeV}$$

$$\text{Protón: } m_0 c^2 = 938.3 \text{ MeV}$$



## Blanco fijo

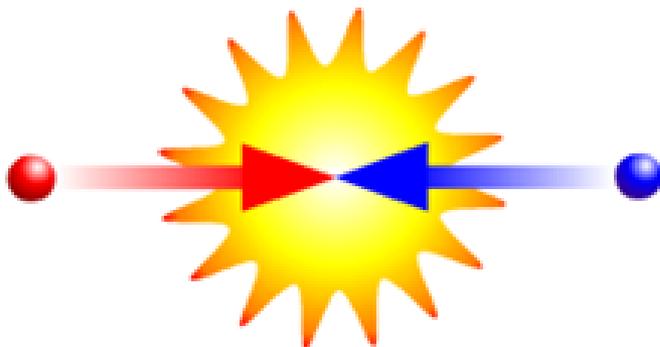
para

Producción de antipartículas  $e^+$ ,  $\bar{p}$

Producción de mesones  $\pi$ ,  $K$

Muones y neutrinos  $\mu$  ( $\rightarrow \nu_\mu$ )

Neutrones  $n$



## Colisionador

para

Alcanzar más altas energías:

**LHC** con  $E_{cm} = 14TeV$

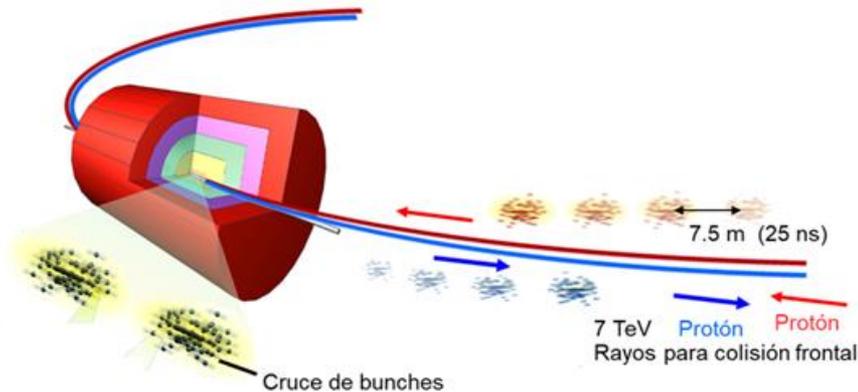
Producción leptónica pura

$e^- \rightarrow \leftarrow e^+$

Época	<b>Dos mundos: Protones vs. Electrones</b> <span style="float: right;">(Tabla simplificada)</span>
Décadas de 1950,1960,1970	Costa este de Estados Unidos: <ul style="list-style-type: none"> <li>•Brookhaven (protones)</li> <li>•Cornell University (electrones)</li> </ul>
Décadas de 1950,1960,1970	Costa oeste de Estados Unidos: <ul style="list-style-type: none"> <li>•Berkeley Radiation Laboratory (protones)</li> <li>•Stanford: SLAC (electrones)</li> </ul>
Décadas de 1980,1990 y 2000	Estados Unidos (nivel nacional): <ul style="list-style-type: none"> <li>•Fermilab (protones)</li> <li>•Stanford: SLAC (electrones)</li> </ul>
Décadas de 1960,1970 y 1980	Europa: <ul style="list-style-type: none"> <li>•CERN (protones)</li> <li>•DESY (electrones)</li> </ul>
Décadas de 1990, 2000	Mundo: <ul style="list-style-type: none"> <li>•Fermilab: Tevatron (protones antiprotones)</li> <li>•CERN: LEP (electrones positrones) años 1989 - 2000</li> </ul>
Décadas de 2020 ... ?	Mundo: <ul style="list-style-type: none"> <li>•CERN: LHC (protones protones)</li> <li>•ILC o CLIC (?) (electrones positrones)</li> </ul>

# Aceleradores de protones vs. aceleradores de electrones

Aceleradores de protones  
Colisionadores hadrónicos

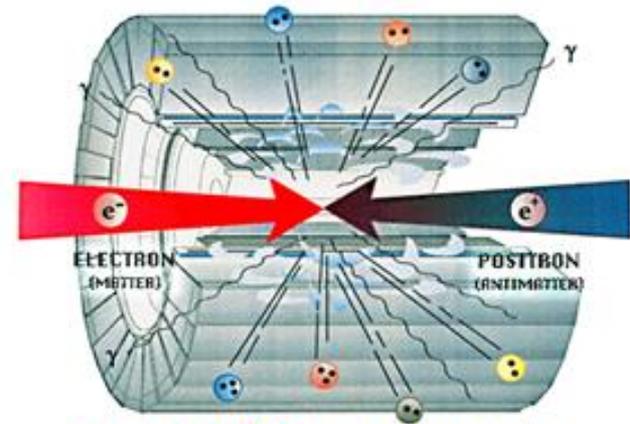


**PROTÓN - PROTÓN**

Protones no son elementales.  
Partones que interaccionan  
Solo una fracción de la energía está  
disponible para los procesos a estudiar

Máquinas de descubrimiento.

Aceleradores de electrones  
Colisionadores leptónicos



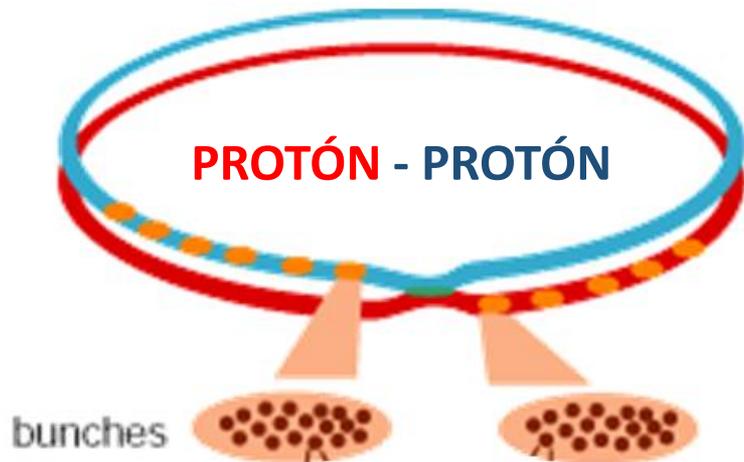
**ELECTRÓN - POSITRÓN**

Electrones son elementales.  
En colisiones electrón positrón toda la  
energía de las partículas incidentes está  
disponible para los procesos a estudiar

Estudios detallados de precisión para  
partículas de masa ya conocida.

# Aceleradores de protones vs. aceleradores de electrones

Aceleradores de protones  
Colisionadores hadrónicos



Colisionadores hadrónicos son CIRCULARES.

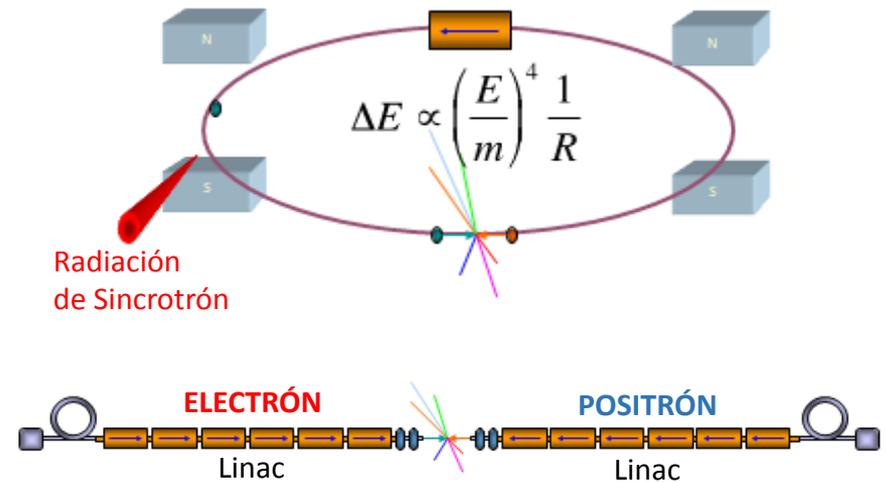
*Ventaja:*

Aceleración en cavidad RF circulando **repetidamente**.

*Desventaja:*

Exigen campo magnético, número alto de electroimanes.

Aceleradores de electrones  
Colisionadores leptónicos



Colisionadores leptónicos pueden ser CIRCULARES o LINEALES.

**CIRCULARES:**

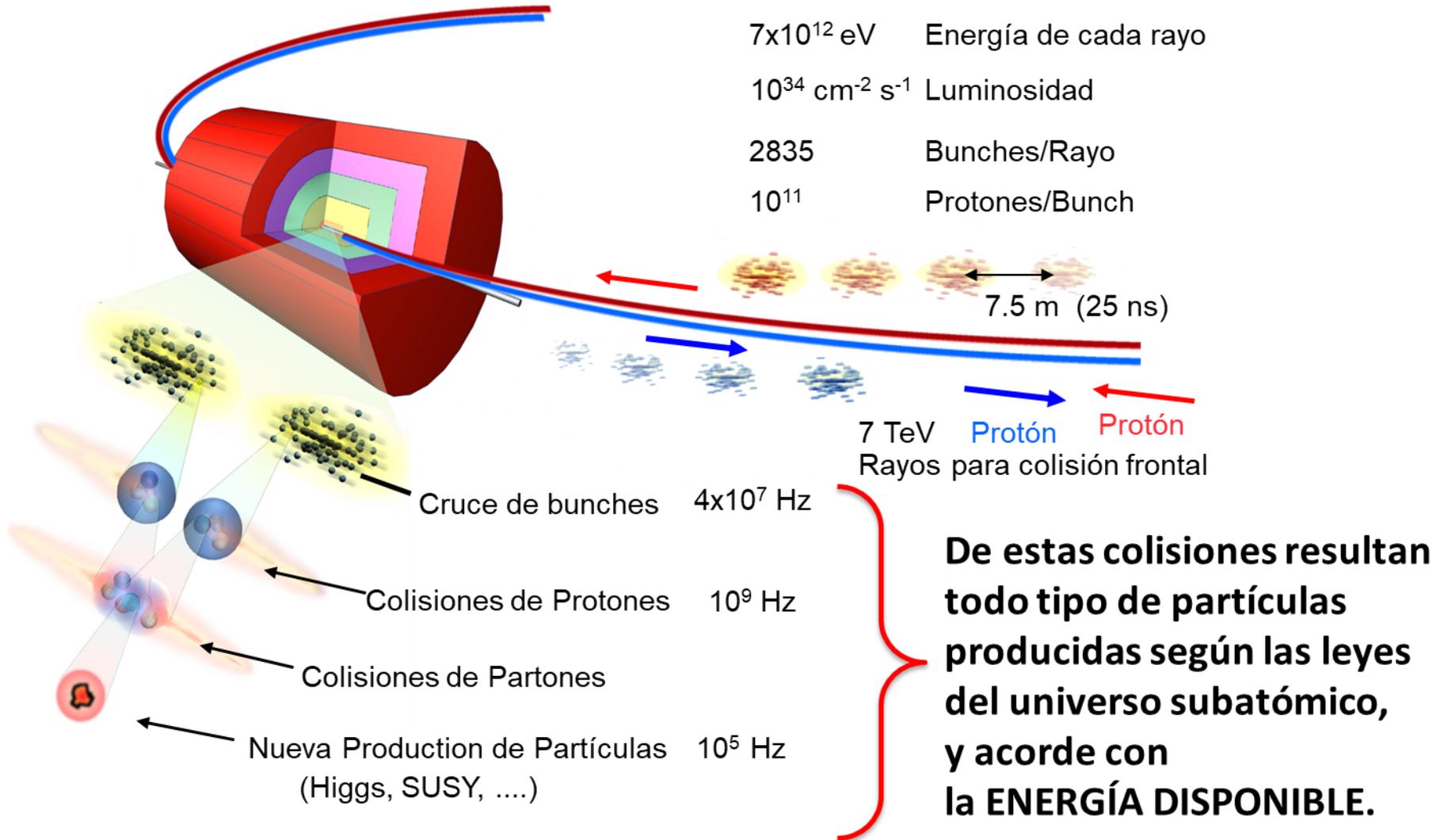
Tienen límite por **RADIACIÓN de SINCROTRÓN**.

**LINEALES:**

*Ventaja:* Muy poca radiación en Linac.

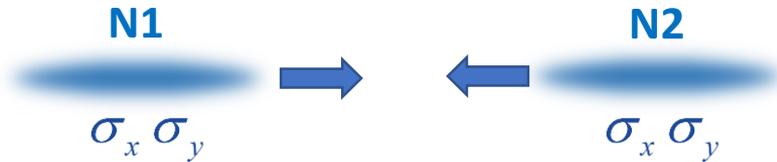
*Desventaja:* Solo un disparo exige alcanzar toda la energía y toda la luminosidad en un solo recorrido.

# Colisiones en el “Large Hadron Collider”



# Luminosidad

En el colisionador, para colisiones frontales de rayos de partículas, secuencia de bunches colisionando,



**N1:** número de partículas en el bunch 1.

**N2:** número de partículas en el bunch 2.

$\sigma_x \sigma_y$  tamaño horizontal y vertical del bunch.

el número de eventos por segundo está dado por:

$$\dot{N}_p = \sigma_p \mathcal{L}$$

La sección transversal  $\sigma_p$  de la reacción entre partículas resulta de las leyes de la naturaleza, mientras que el factor  $\mathcal{L}$ , la **LUMINOSIDAD**, es una medida de la probabilidad de interacción entre los rayos que colisionan.

La **LUMINOSIDAD** es propia del acelerador, y es una medida de su desempeño:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4\pi} \frac{f_{rev} N_1 N_2}{\sigma_x \sigma_y}$$

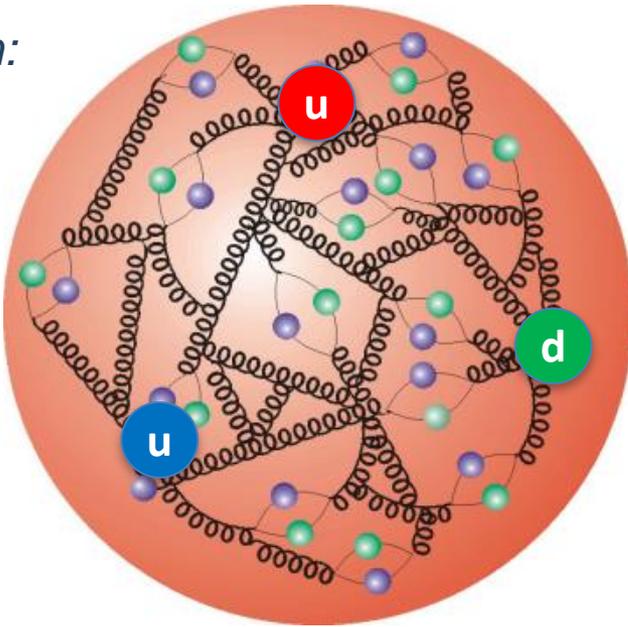
$f_{rev}$  es la frecuencia de revolución de los bunches en el colisionador.

Damos la **LUMINOSIDAD** en unidades de  $cm^{-2} s^{-1}$ .

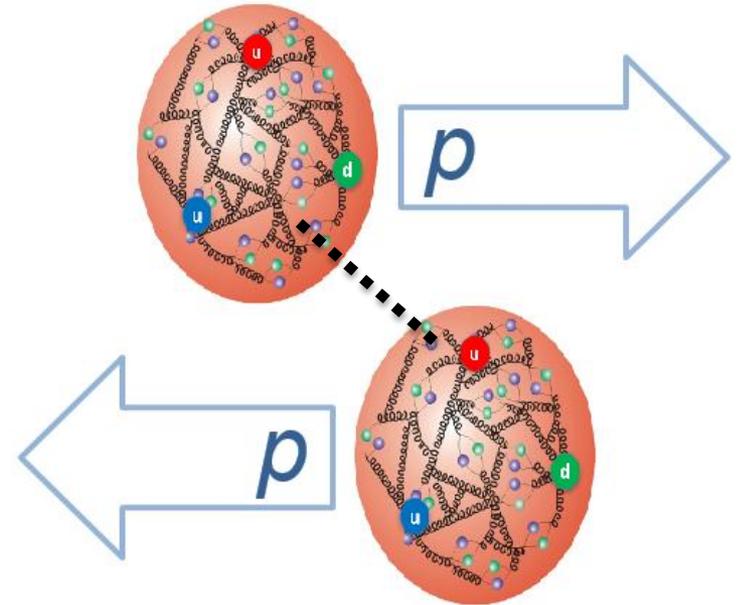
# Colisiones Protón + Protón a las energías del LHC

...son colisiones entre partículas  
que no son elementales,  
tienen estructura interna:

Protón:

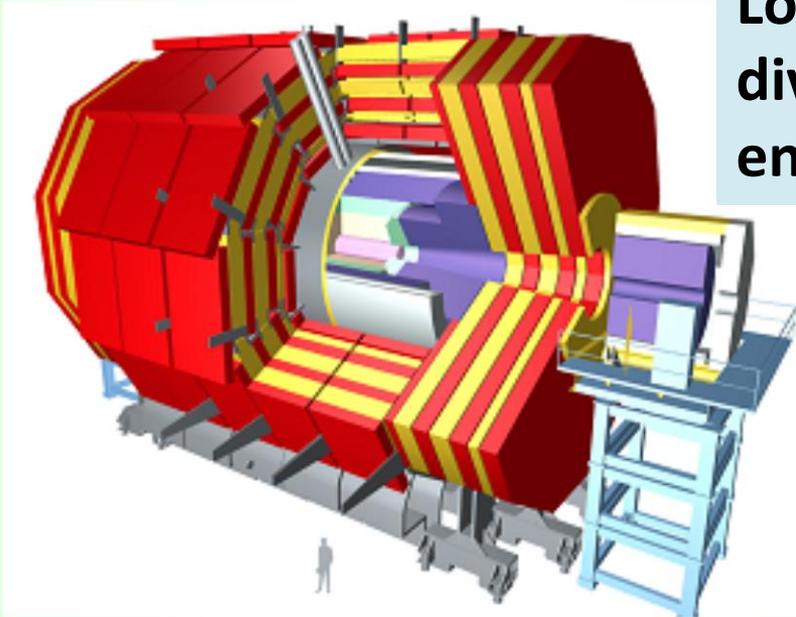


“Quarks de valencia” **uud**  
intercambiando gluones  
en un mar de gluones y pares  
quark-antiquark...  
el campo  
de la interacción fuerte.



**... interacciones entre  
los partones: quarks y gluones**

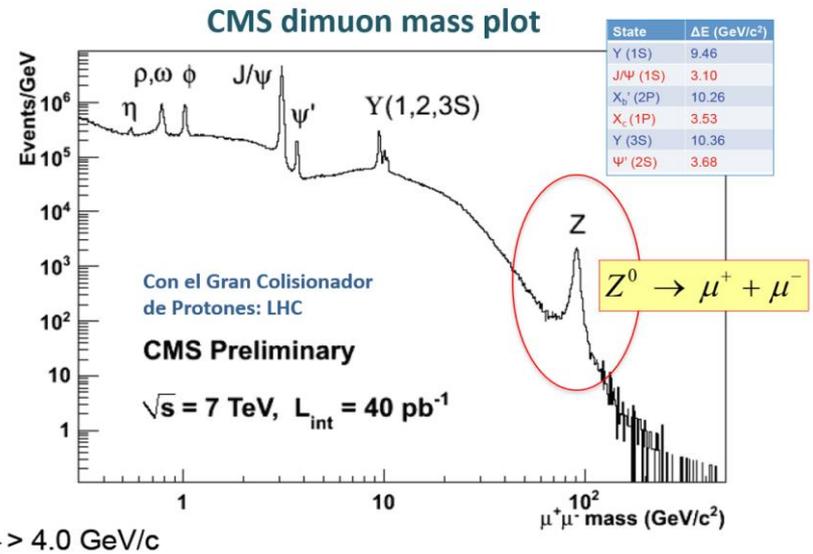
# CMS Compact Muon Solenoid

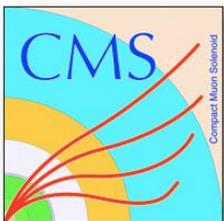


Los detectores registran la enorme diversidad de partículas producidas en las colisiones protón + protón...

¿Cómo hallamos de entre tal diversidad de partículas, aquella que queremos estudiar?

Por ejemplo:  $Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

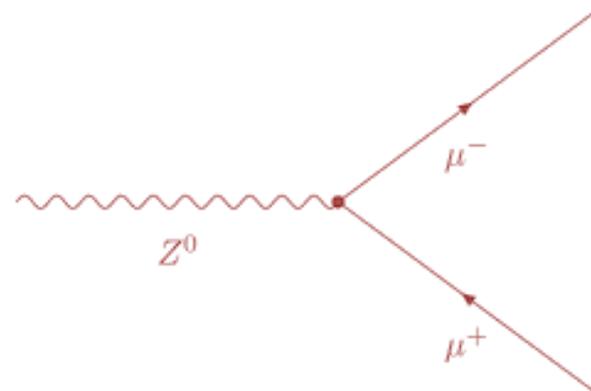
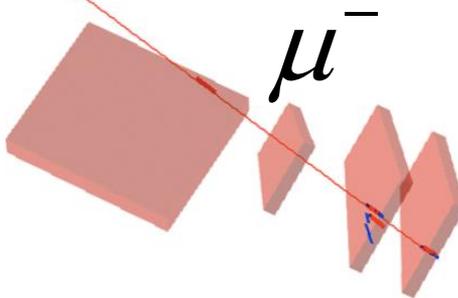
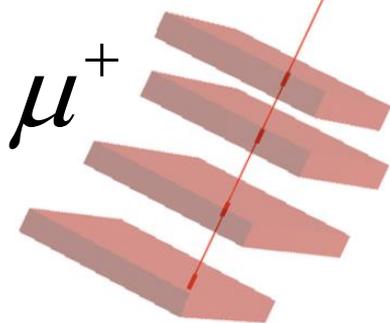
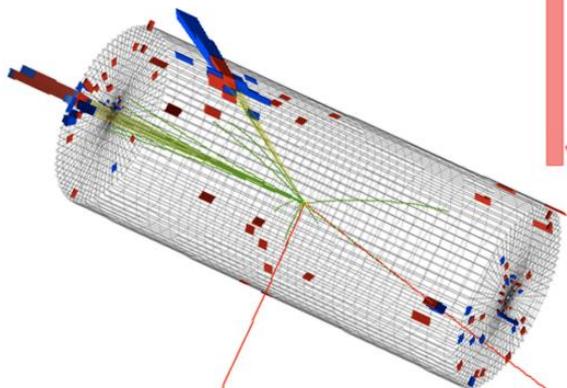
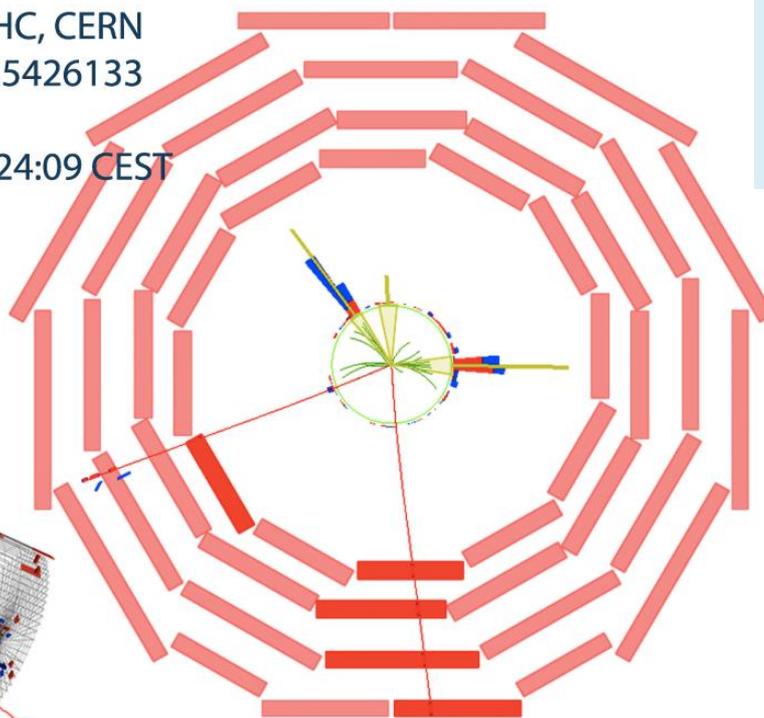




CMS Experiment at LHC, CERN  
Run 135149, Event 125426133  
Lumi section: 1345  
Sun May 09 2010, 05:24:09 CEST

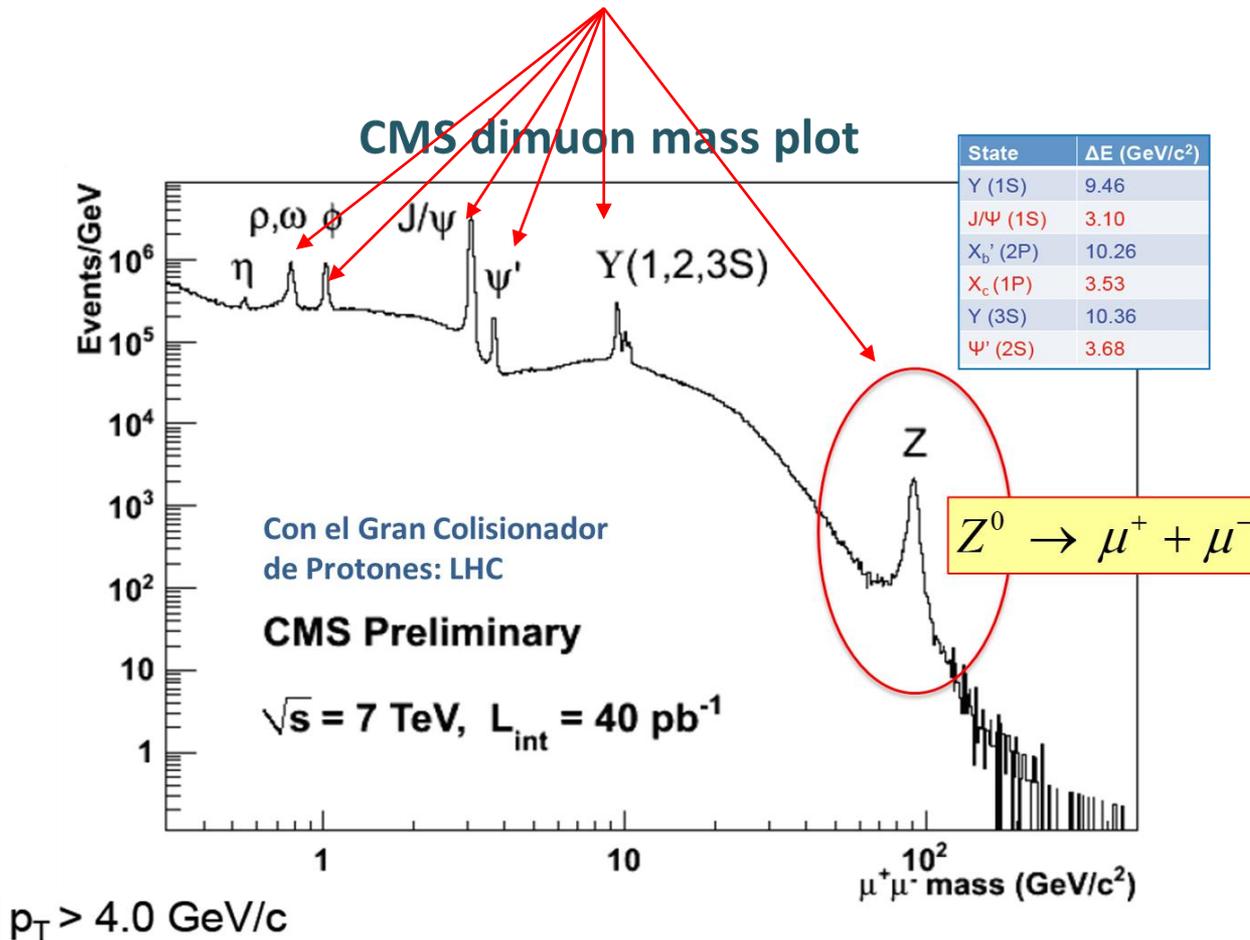
Producción de  $Z^0$   
en colisionador  
de protones.

Muon  $p_T = 67.3, 50.6$  GeV/c  
Inv. mass =  $93.2$  GeV/c<sup>2</sup>



$$Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$

Colisionadores hadrónicos son **MÁQUINAS DE DESCUBRIMIENTO...**  
 Con ellos podemos descubrir partículas... aunque su masa sea desconocida...  
 Si la partícula es producida en las colisiones y está presente...  
**crece** como un **pico por encima del fondo** (background) en el histograma:



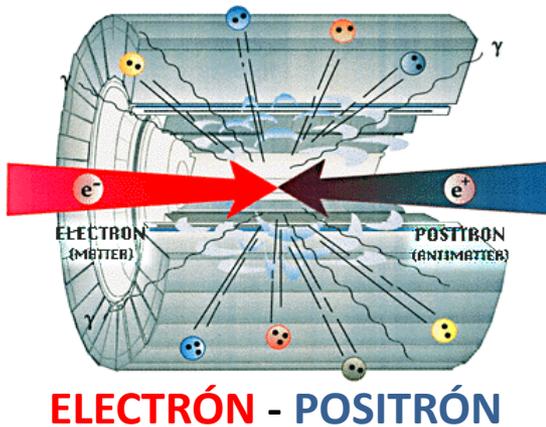
Así filtrando datos de parejas de muones, distribución de masas reconstruidas a partir de datos de dimuones.

Así se obtienen partículas, mesones, que han decaído en

$\dots \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

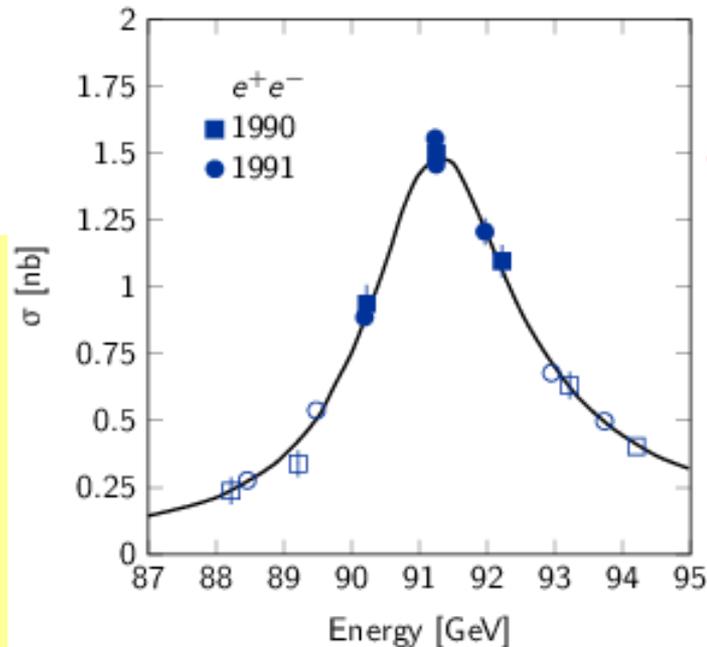
Los **Colisionadores Leptónicos**, **colisionadores de electrón – positrón**, son MÁQUINAS PARA ESTUDIO DE PRECISIÓN, óptimo si ya se conoce la partícula, descubierta en el colisionador de protones...

## PRODUCCIÓN RESONANTE DE PARTÍCULAS



Si cada haz tiene energía de 45.5 GeV, la energía disponible para producir partículas es de  $2 * 45.5 \text{ GeV} = 91 \text{ GeV}$ , que es la masa del  $Z^0$ .

Hay **“resonancia”** y se produce el  $Z^0$  **preferencialmente**, más que cualquier otra partícula.

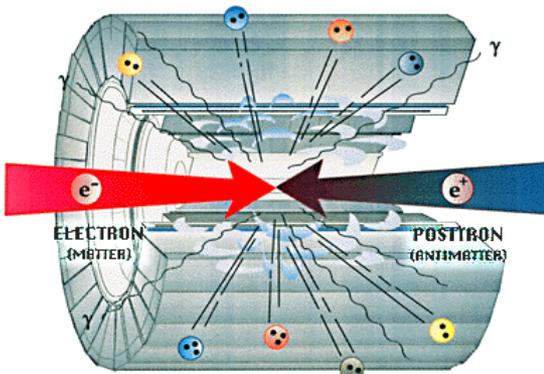


**Cada día se pone una energía mayor, empezando en 88 GeV, y se toman datos barriendo el rango de energías hasta 94 GeV. Resulta la distribución**



Los **Colisionadores Leptónicos**, **colisionadores de electrón – positrón**, son MÁQUINAS PARA ESTUDIO DE PRECISIÓN, óptimo si ya se conoce la partícula, descubierta en el colisionador de protones...

## PRODUCCIÓN RESONANTE DE PARTÍCULAS



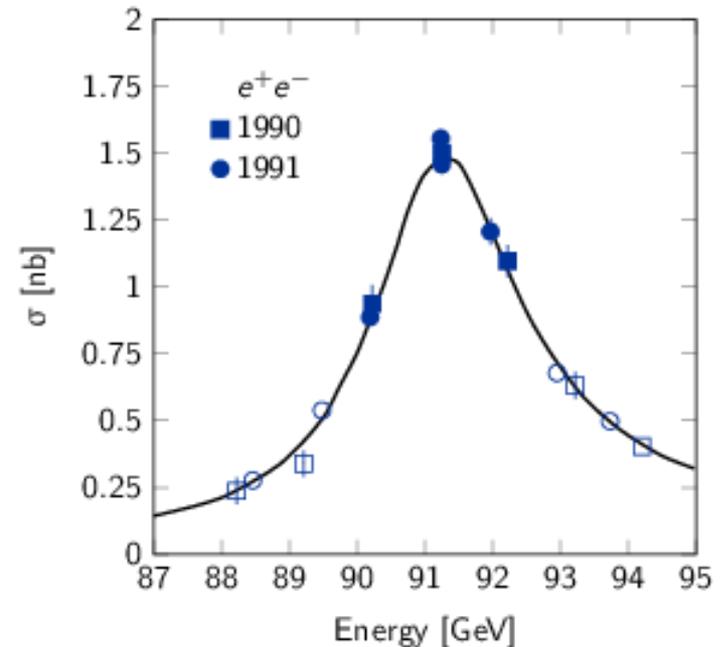
**ELECTRÓN - POSITRÓN**

El Sistema de Laboratorio coincide con el SCM:  
Sistema de Centro de Masa = Sistema de Cero Momento:

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 = 0$$

$$M_X c^2 = \sqrt{\left( (E_1 + E_2)^2 - c^2 (\vec{P}_1 + \vec{P}_2)^2 \right)}$$

$$M_X c^2 = E_1 + E_2$$



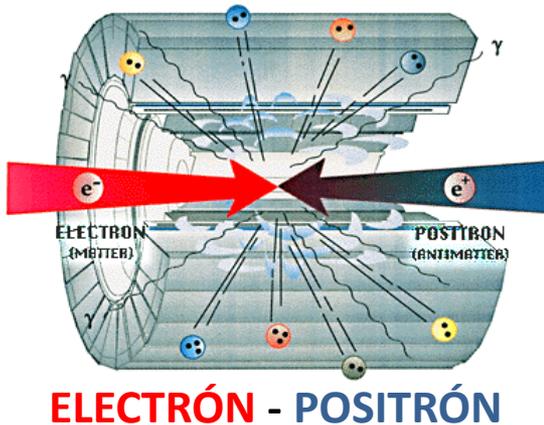
# ¿Cómo se obtiene el TIEMPO DE VIDA?

A mitad de  $\sigma_{\max}$  se mide el ancho de la curva  $\Delta E$ .

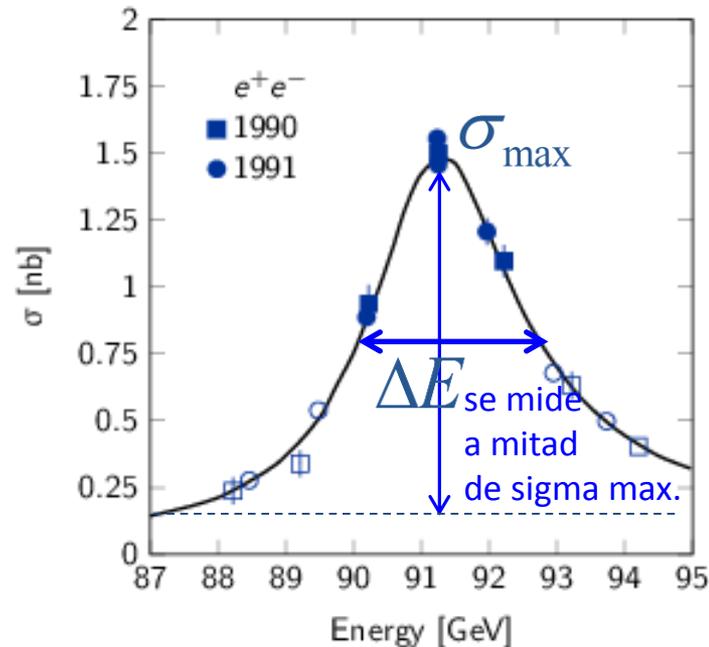
A este ancho  $\Delta E$  corresponde por Principio de Incertidumbre de Heisenberg

un TIEMPO DE VIDA  $\Delta t$  dado por:

$$\Delta t \sim \frac{\hbar}{\Delta E}$$

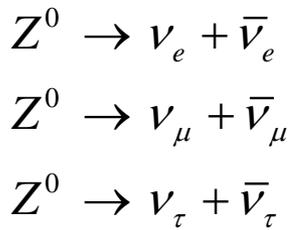


$\Delta t$  es el TIEMPO DE VIDA de la partícula.

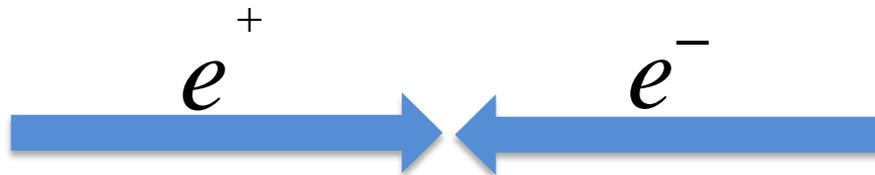
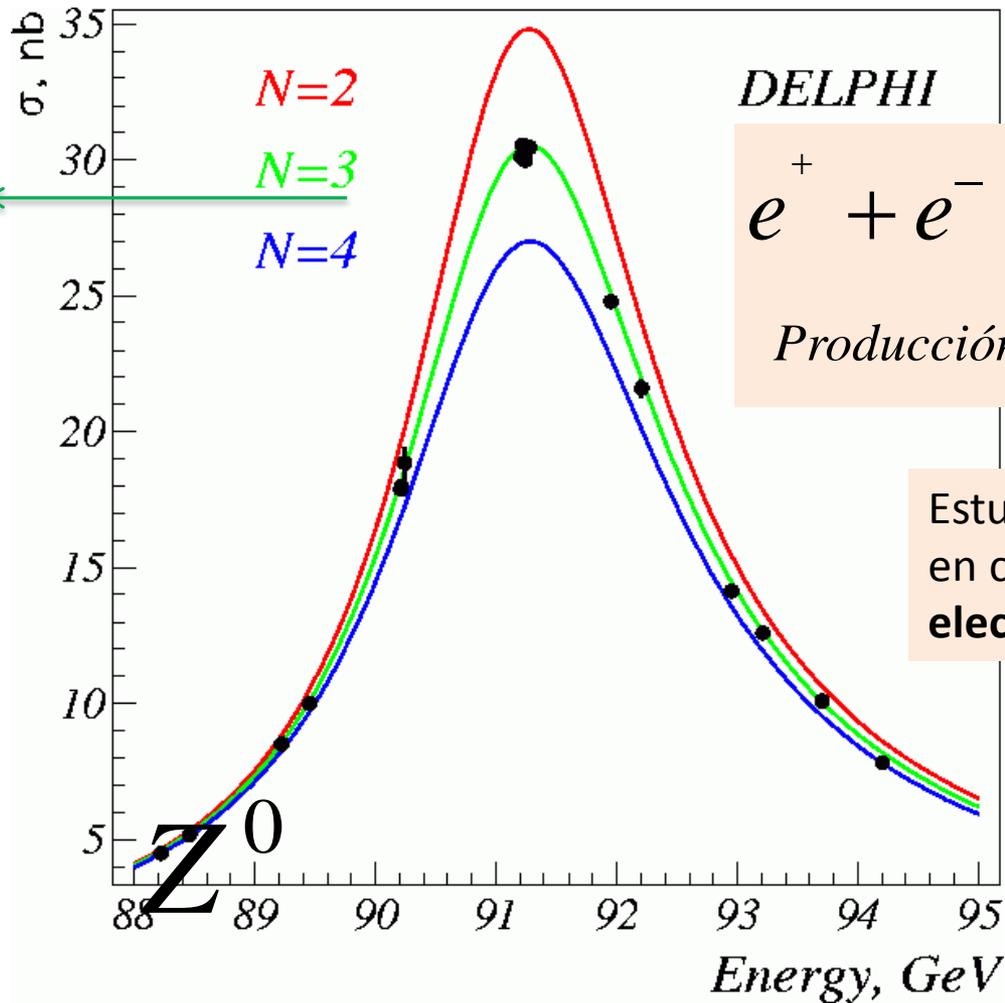


Luego de restar el background, determinar la altura y a media altura determinar el ancho.

¿Cuánto se obtiene para  $Z^0$ ?



Entonces:  
Solo hay  
**3 generaciones**  
de neutrinos.

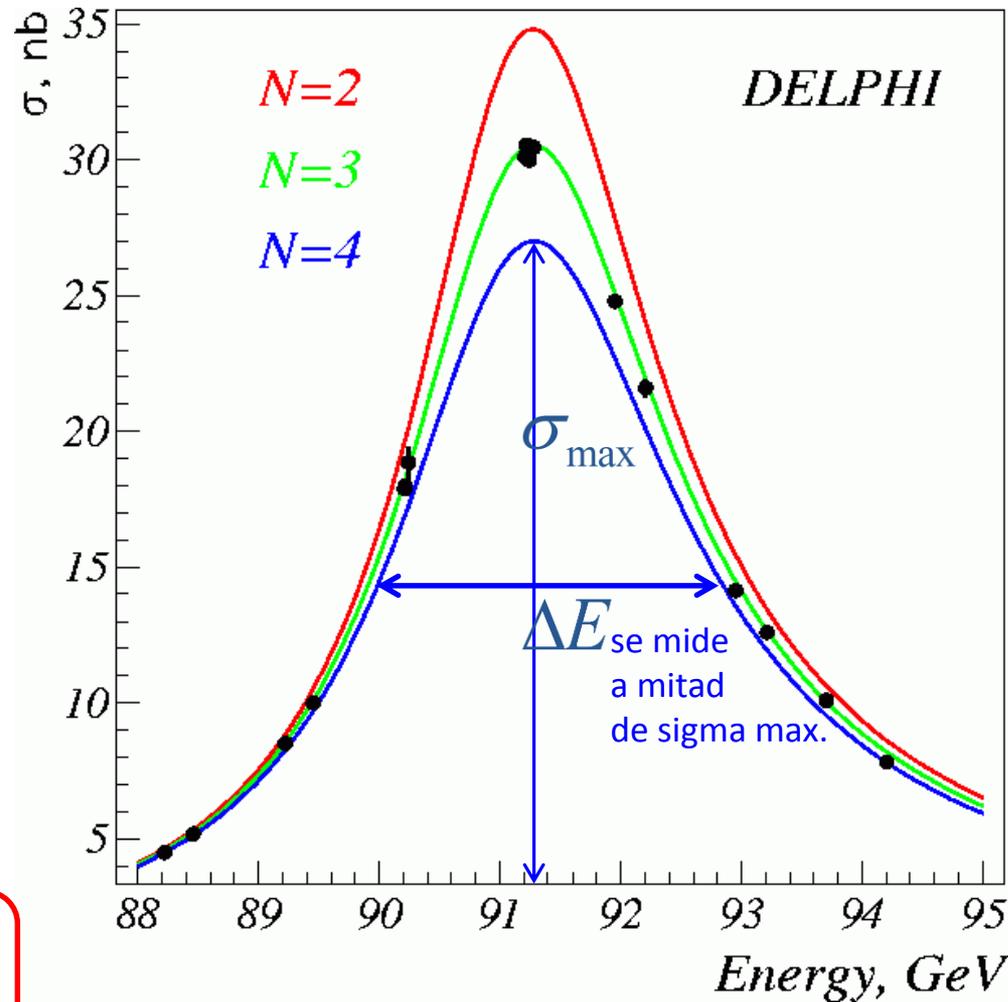


Para  $N=4$   
 $\Delta E$  es mayor  
que para  $N=3$ .

Como  
$$\Delta t \sim \frac{\hbar}{\Delta E}$$

para  $N=4$   
 $\Delta t$  es menor  
que para  $N=3$ .

$\Delta t$  menor  
significa más  
canales de  
decaimiento,  
más neutrinos.



Entre más neutrinos, más canales para decaer,  
más corto el tiempo de vida.

Pero el  
experimento  
dice:  $N=3$ .  
Entonces solo  
**3** neutrinos.

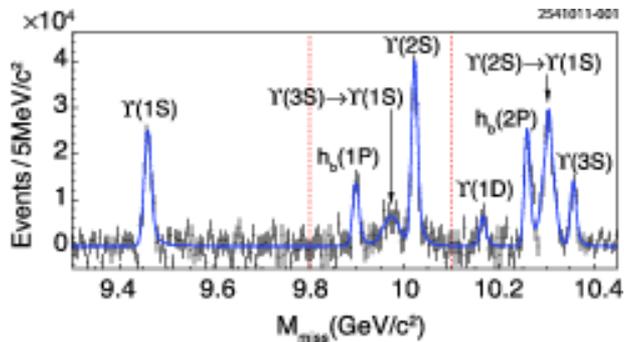
No hay  
4 neutrinos.

Para  $N=4$  serían 4 generaciones de neutrinos.

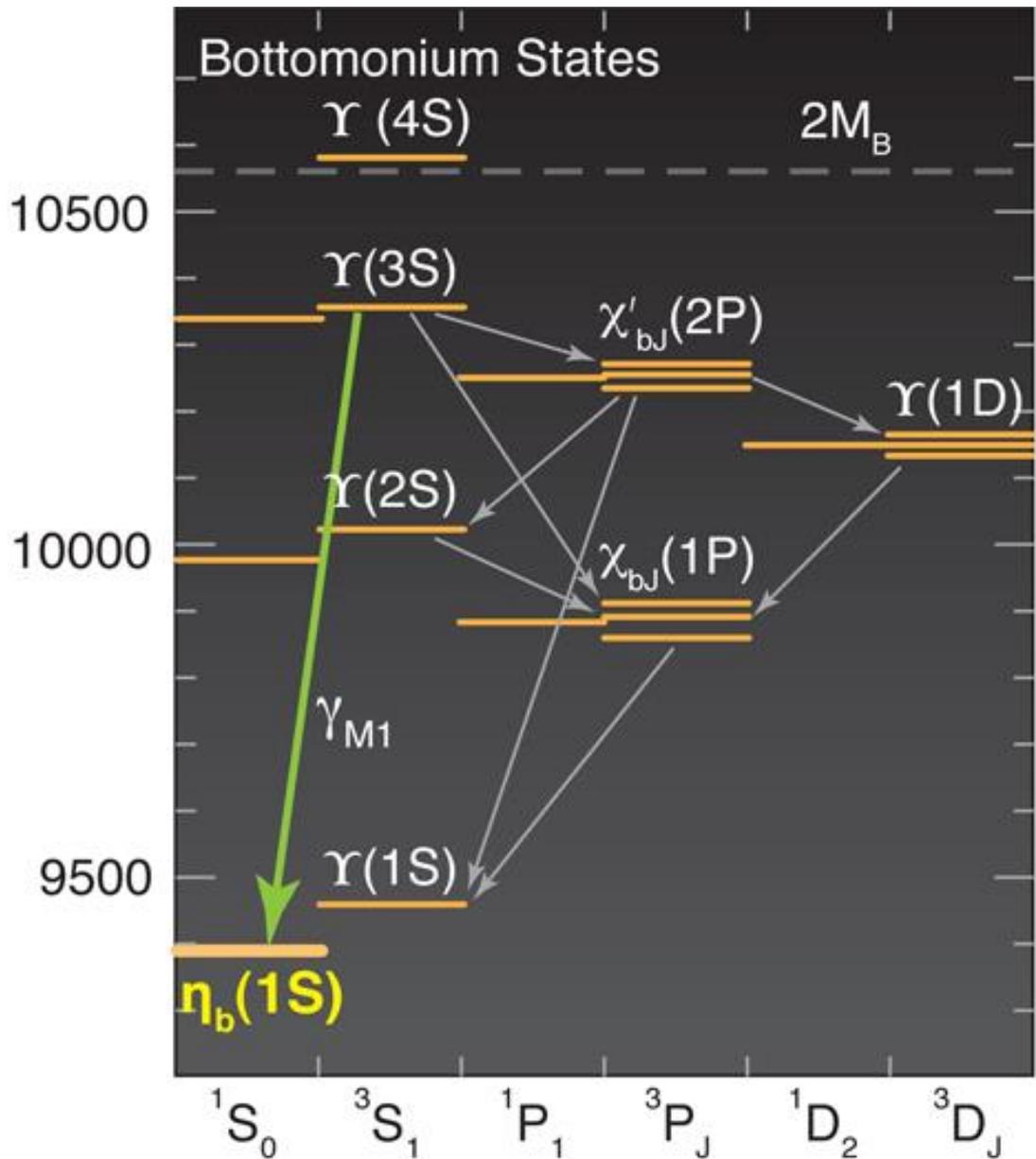
$$e^- e^+ \rightarrow \Upsilon(3S)$$

$$e^- e^+ \rightarrow \Upsilon(2S)$$

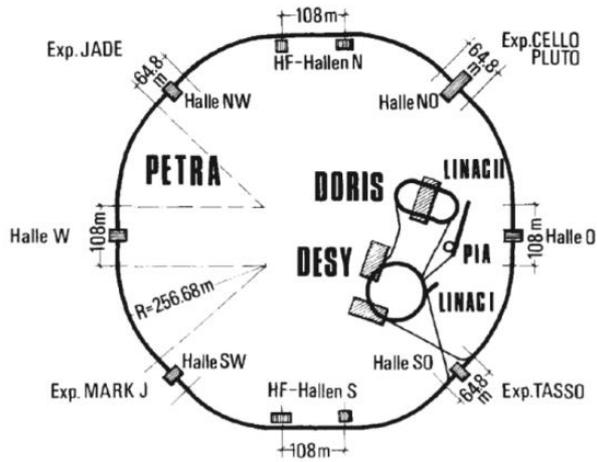
Espectroscopía del  
Bottomonio  
con el Colisionador  
 $e^- e^+$   
DORIS  
del Laboratorio  
DESY  
Hamburgo  
1982 - 1983



Mass (MeV)



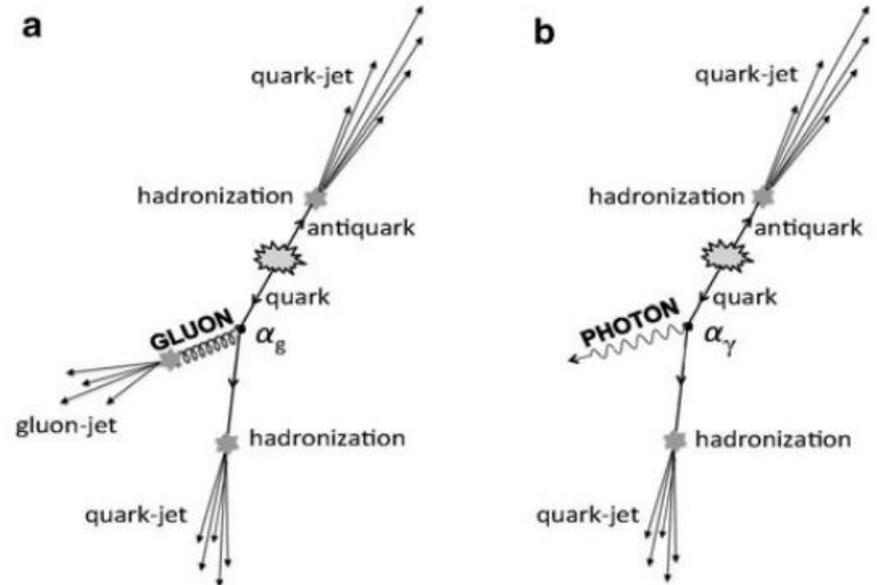
# Descubrimiento del Gluón año 1979 DESY Hamburgo



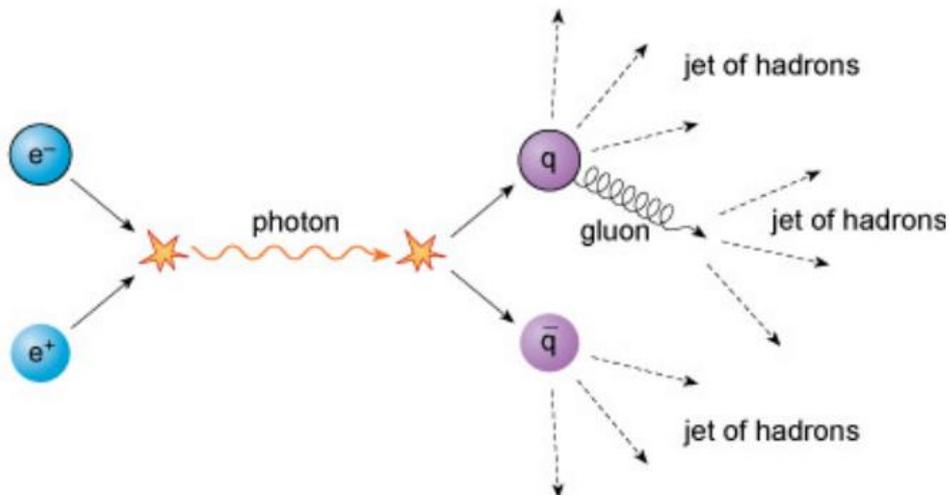
Proceso propuesto por John Ellis:

$$e^-e^+ \longrightarrow q\bar{q}g$$

Resulta en 3 jets



Tomado de: Ugo Amaldi, From Big Bang Physics to Hadron Therapy



3 jets

# **Aceleradores Presente y Futuro**



**Fundamentos de  
Aceleradores y Colisionadores  
Hadrónicos y Leptónicos**

**Sincrotrón y  
Colisionadores Circulares**

**Colisionadores Lineales**

**Nuevos Desarrollos y  
proyectos futuros**

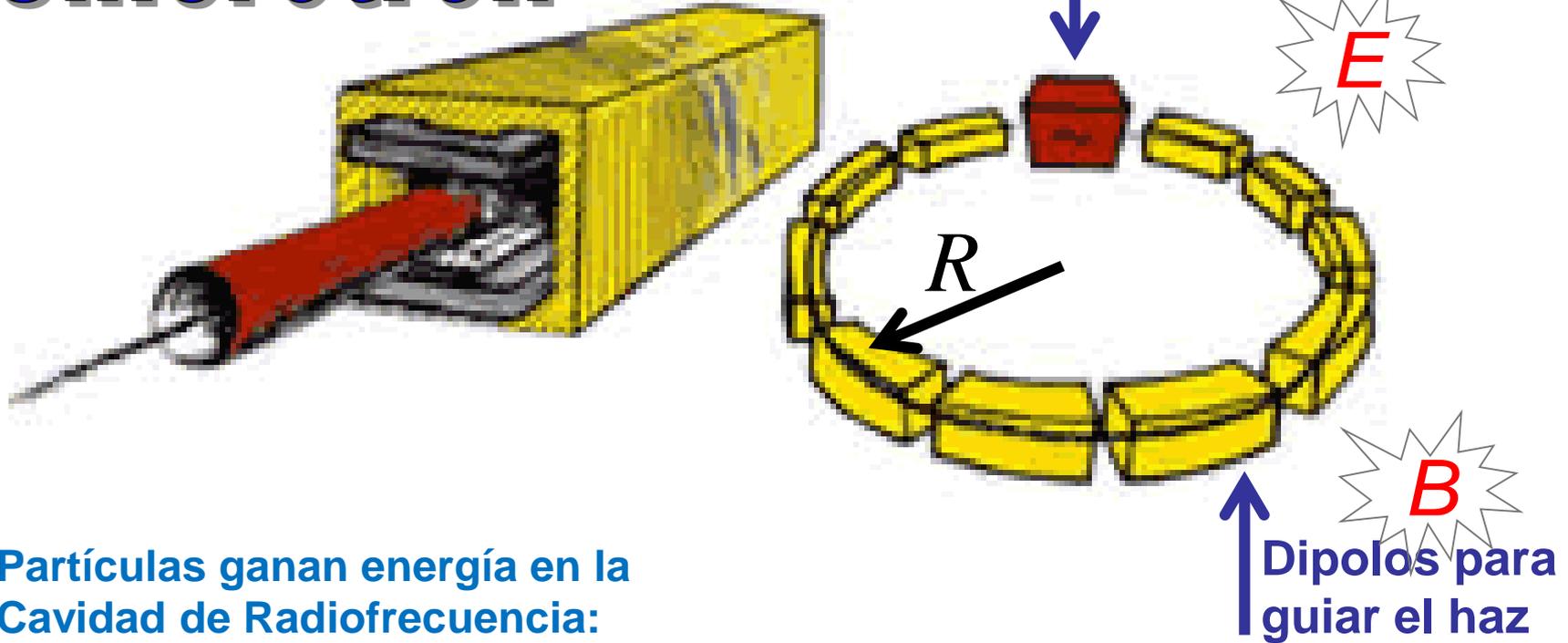
**Conclusiones**



HERA

PETRA

# Sincrotrón



Partículas ganan energía en la Cavidad de Radiofrecuencia:

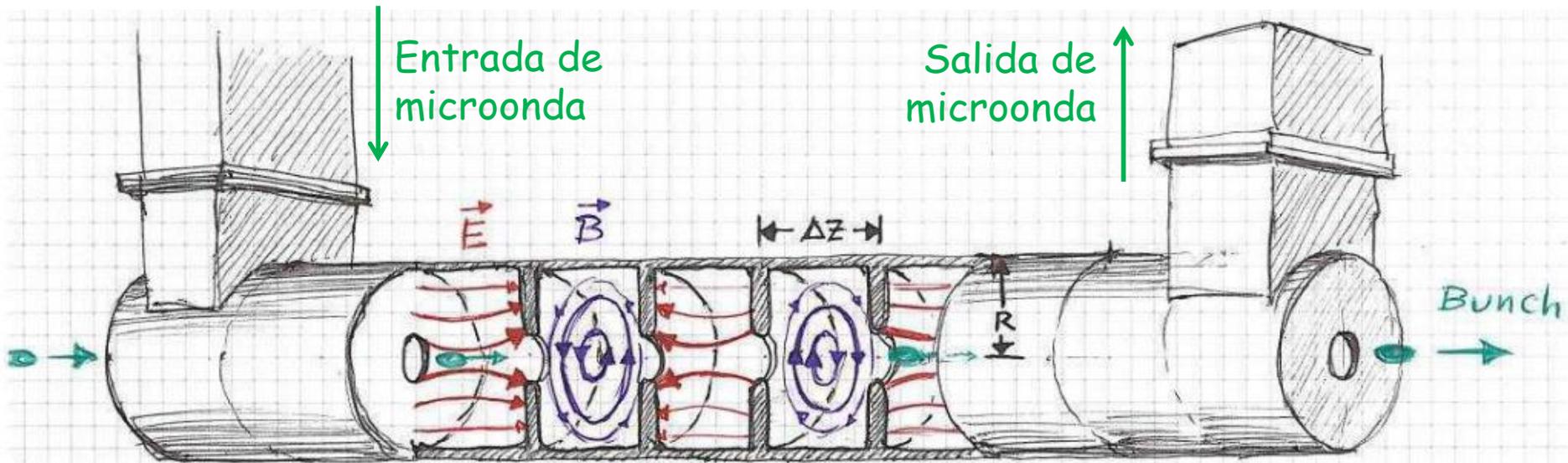
Solo hay transferencia de energía del campo eléctrico a la carga eléctrica.  
NO del campo magnético.

La transferencia de energía del campo magnético a la carga eléctrica es CERO:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{\vec{F}_{mag} \cdot d\vec{l}}{dt} = \vec{F}_{mag} \cdot \vec{v} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} = 0$$

# Aceleración por campos de Radiofrecuencia RF.

## Cavidad de Radiofrecuencia RF



Frecuencias del orden de 100 MHz... 500 MHz.

# Sincrotrón



## CAMPO MAGNÉTICO PARA GUIAR EL HAZ

De la fuerza magnética se obtiene la ecuación de movimiento radial:

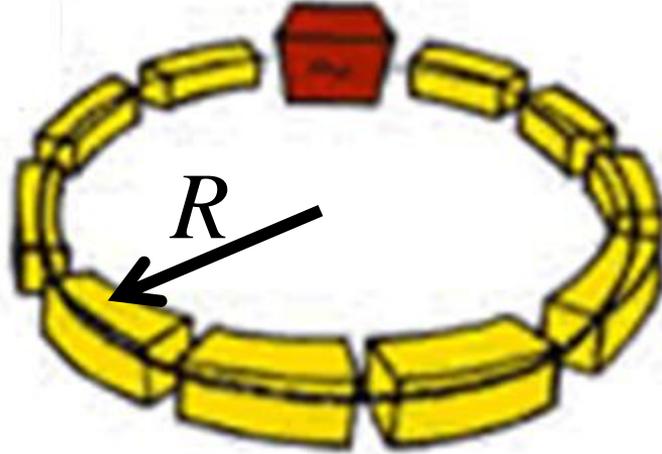
$$qvB = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow qBR = mv$$

$$R = \frac{mv}{qB} \Rightarrow R = \frac{p}{qB} \longrightarrow R = \text{const}$$

# Sincrotrón

Acelerador de Partículas  
exige

**ESTABILIDAD:**



Estabilidad en espacio y tiempo:

- Estabilidad espacial RADIAL
- Estabilidad espacial VERTICAL
- Estabilidad temporal: ESTABILIDAD DE FASE.

Fuerza restauradora → OSCILACIONES

En el Síncrotrón  
vale:

$$R = \frac{p}{qB} = \text{const}$$

En el Síncrotrón  
**NO** es cierto que:

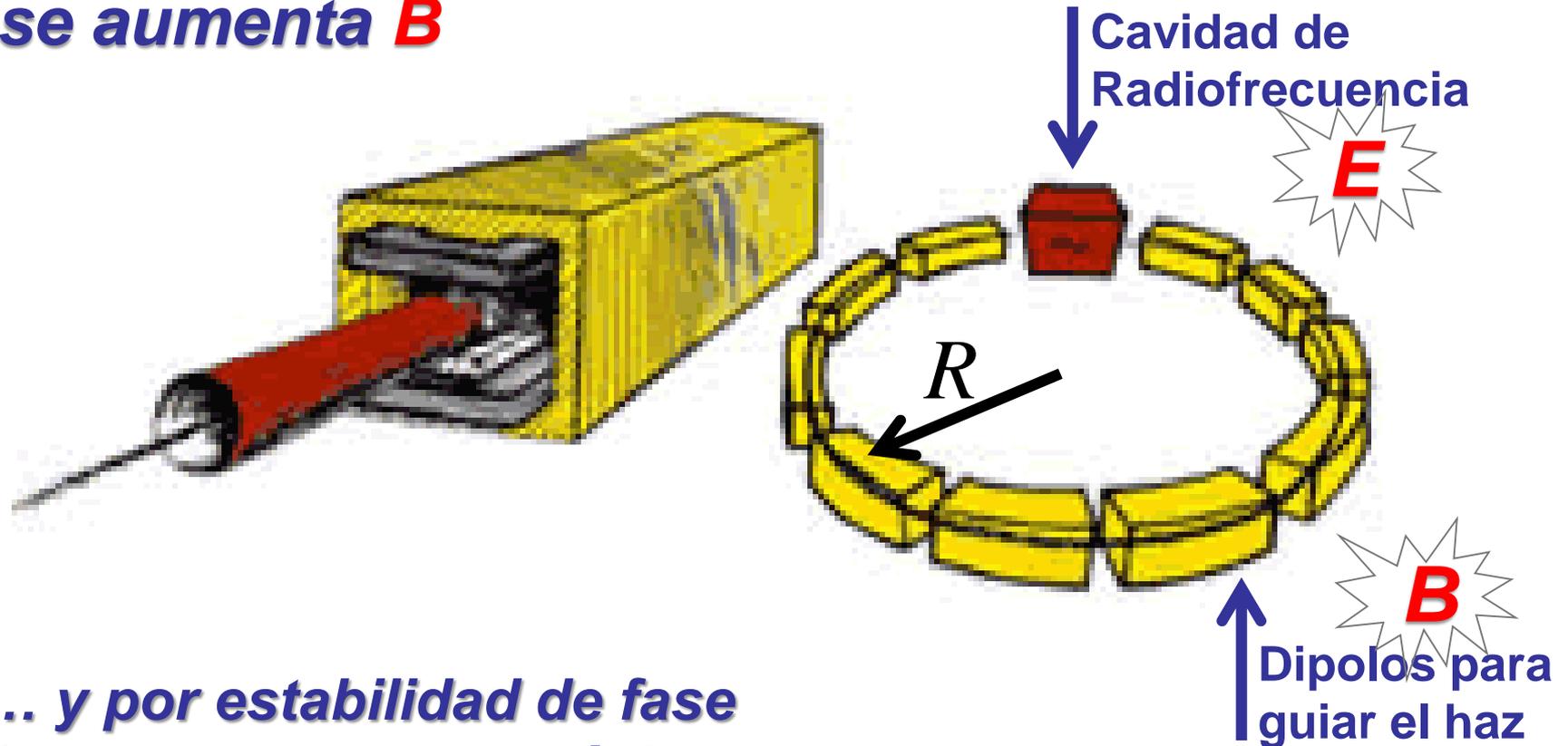
Al acelerar las partículas  
con el aumento de  $p$   
se ajuste el campo magnético  $B$   
para que  $R=\text{const}$ .

Lo que **SÍ** vale en el Síncrotrón:

Se aumenta el campo magnético  $B$   
y la máquina **“automáticamente”**  
ajusta la energía de las partículas,  
así que  $R=\text{const}$ .

**“automáticamente”** := por “principio de síncrotrón”  
principio de síncrotrón := “estabilidad de fase”

Para acelerar las partículas  
se aumenta **B**



... y por estabilidad de fase  
(principio de sincrotrón)  
en la cavidad de radiofrecuencia  
el campo eléctrico **E**  
da a la partícula la energía justa requerida  
para que  **$R = \text{const.}$**

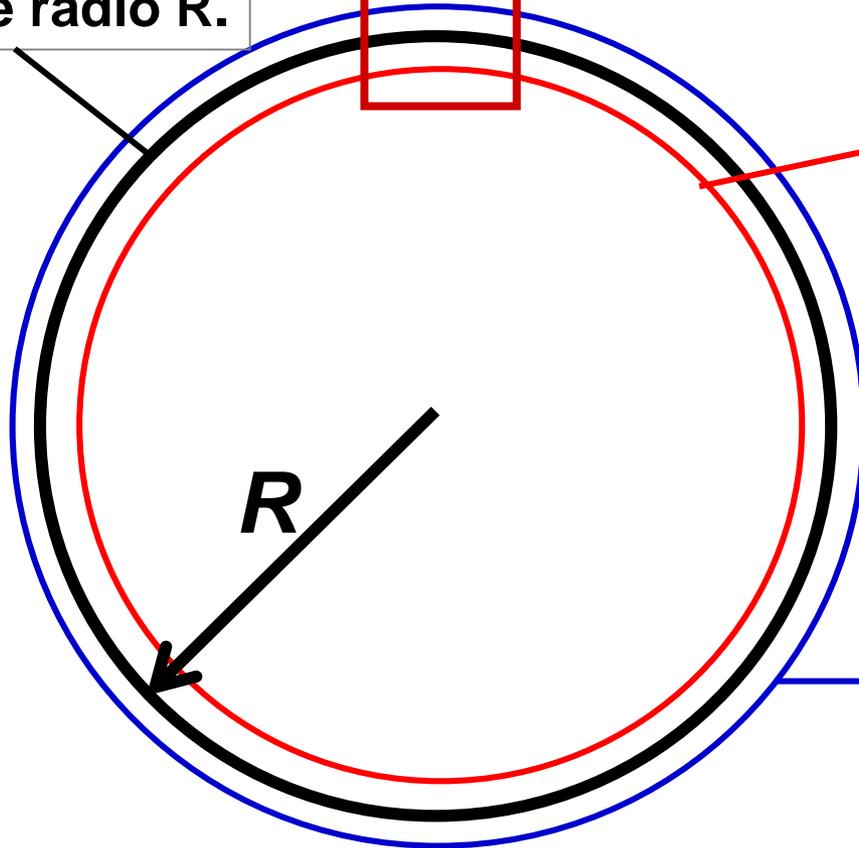
Los sincrotrones son aceleradores para alcanzar las más altas energías: Entonces las partículas allí aceleradas son RELATIVIVISTAS.

$$v \approx c$$

*Todas las partículas van con la misma rapidez (aproximadamente).*

Partícula IDEAL  
órbita de radio R.

Cavidad de radiofrecuencia



Partícula de menor energía se desvía más en el campo magnético, órbita de menor radio, recorrido más corto, menor tiempo, llega ANTES.

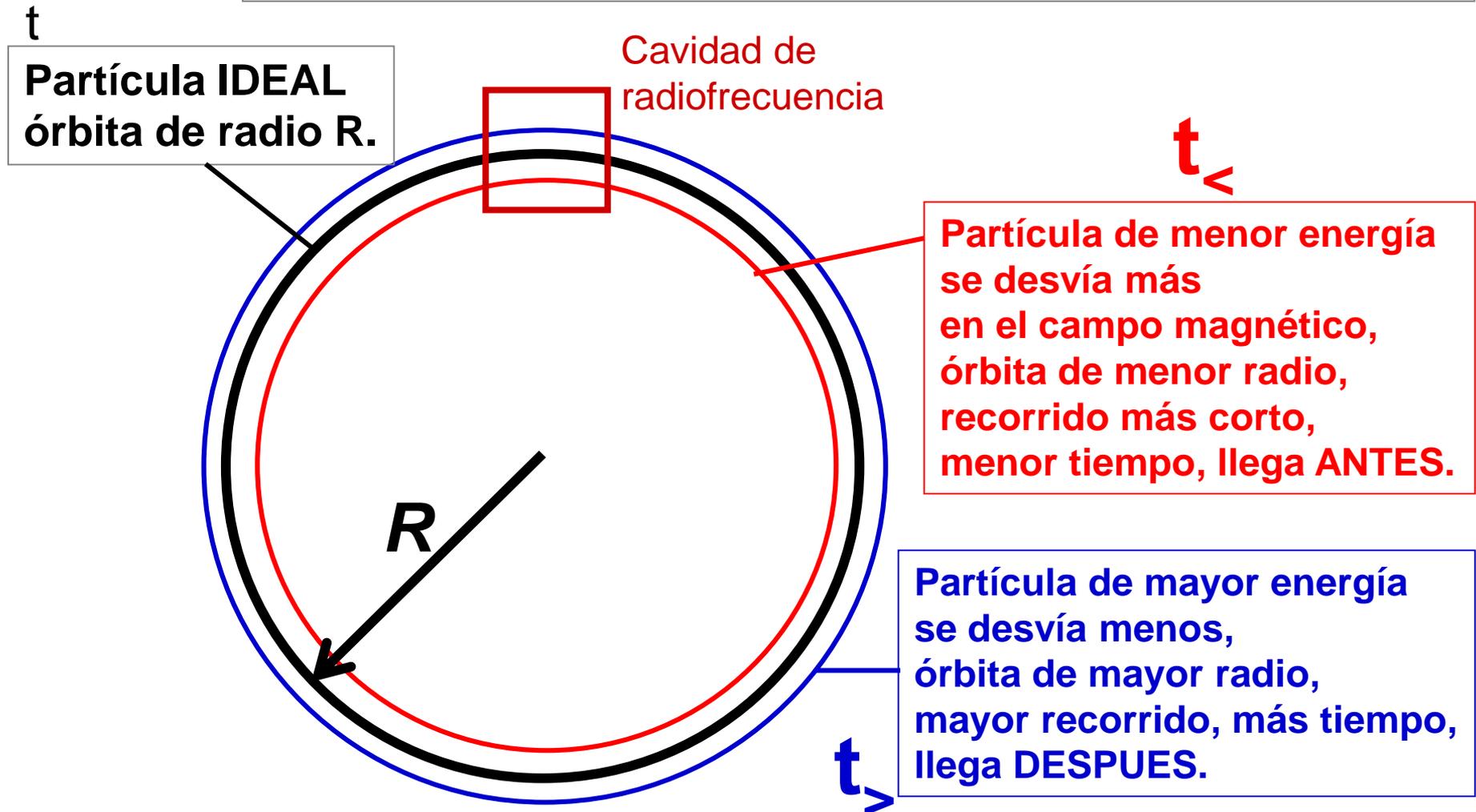
Partícula de mayor energía se desvía menos, órbita de mayor radio, mayor recorrido, más tiempo, llega DESPUES.

# ¿Cuándo llegan las partículas a la cavidad de radiofrecuencia?

$t$  : instante cuando llega partícula IDEAL

$t_{<}$  : instante cuando llega partícula de menor energía

$t_{>}$  : instante cuando llega partícula de mayor energía



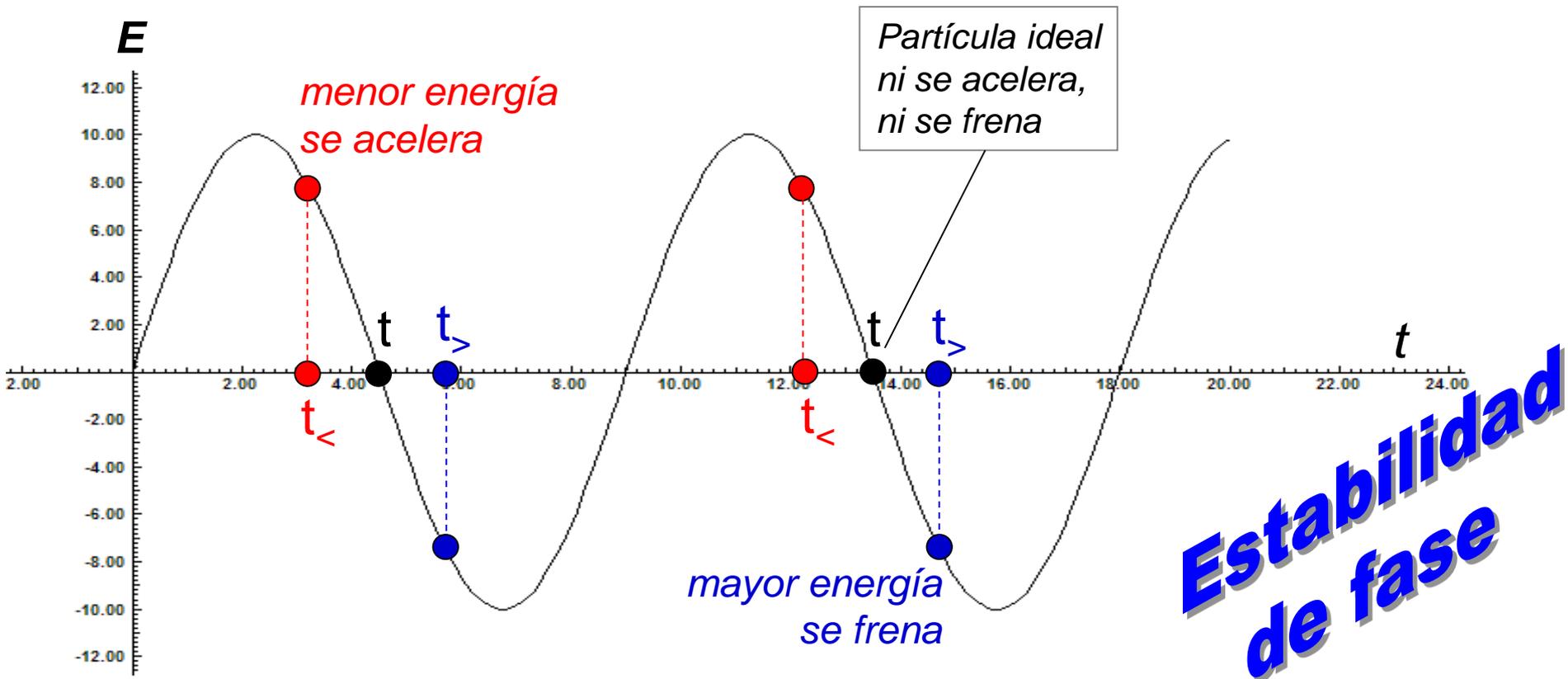
# ¿Cuándo llegan las partículas a la cavidad de radiofrecuencia?

$t$  : instante cuando llega partícula IDEAL

$t_{<}$  : instante cuando llega partícula de menor energía

$t_{>}$  : instante cuando llega partícula de mayor energía

## Campo eléctrico en la cavidad de radiofrecuencia:

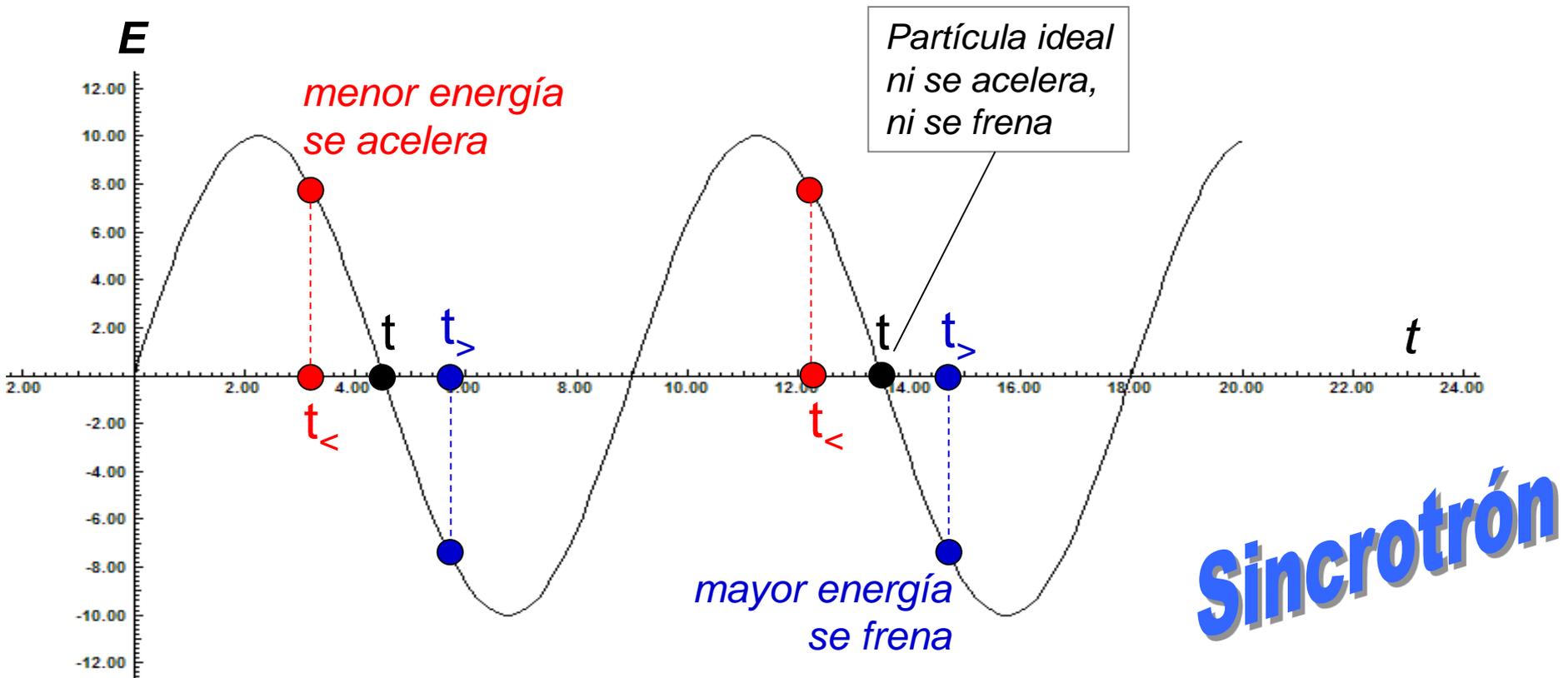


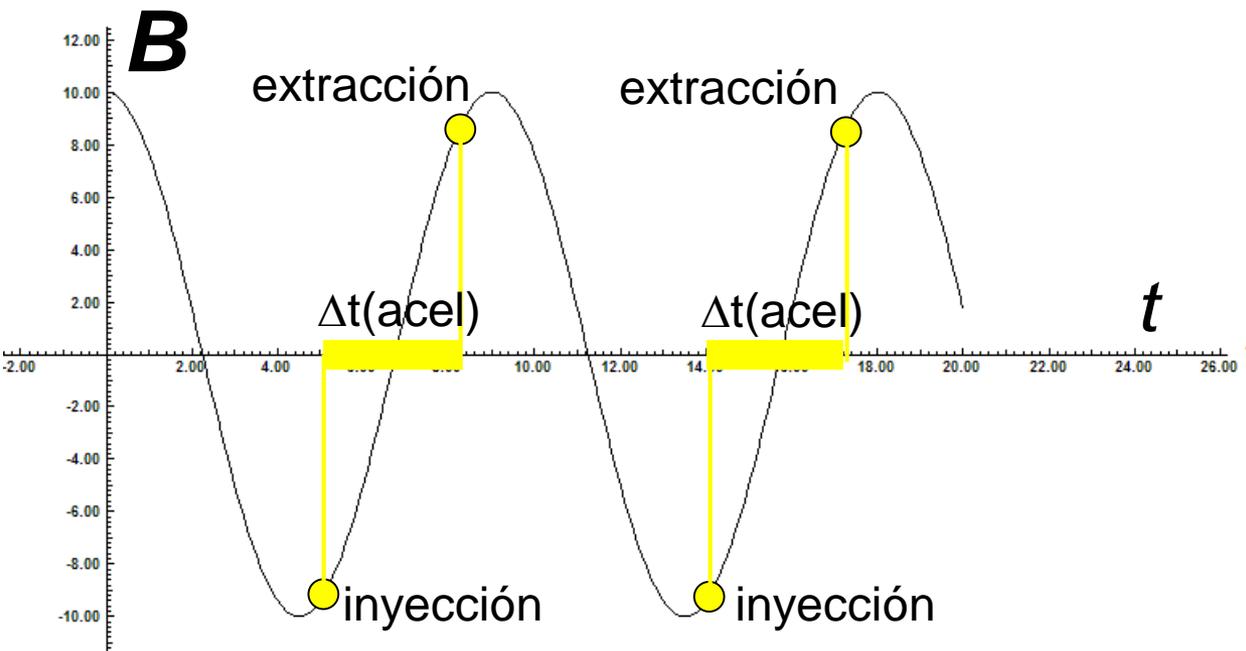
**Al aumentar  $B$  se aceleran las partículas, así que  $R = \text{const.}$**

Al aumentar  $B$  todas las partículas se desvían más, la órbita se hace más pequeña, todas llegan **ANTES** ( $t_<$ ) que la partícula IDEAL (ideal para radio  $R = \text{const.}$ )

Todas encuentran  $E$  que las acelera, justo lo requerido para recuperar  $R = \text{const.}$

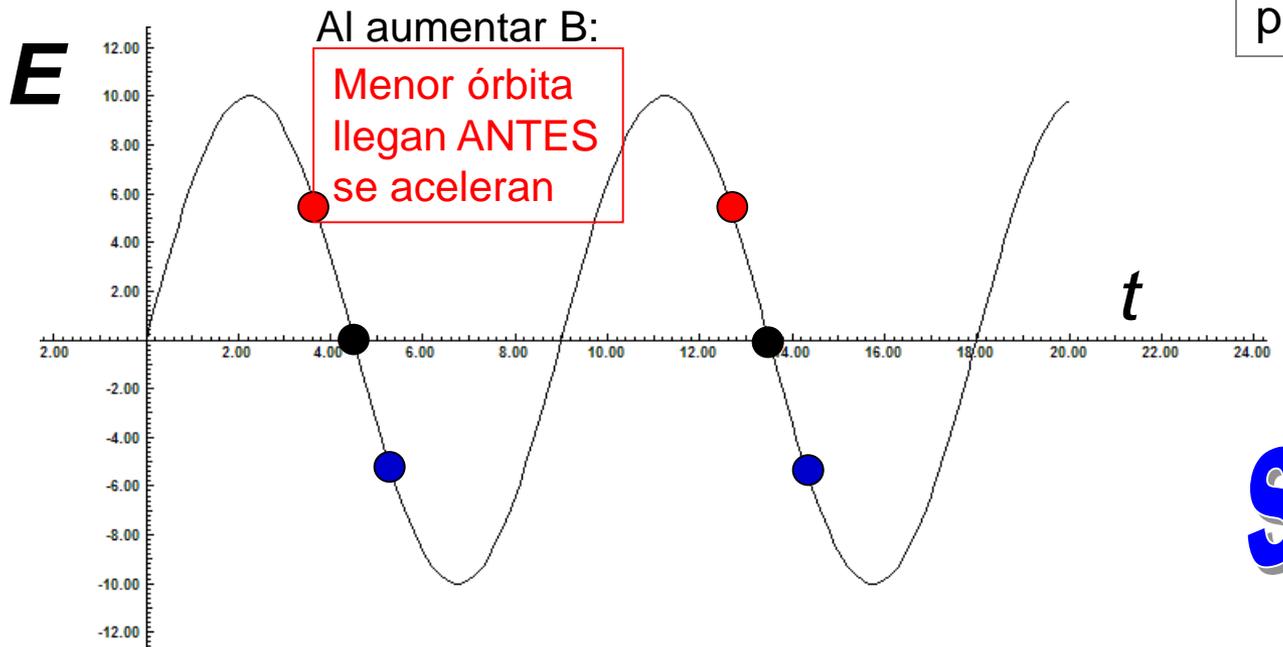
**Campo eléctrico en la cavidad de radiofrecuencia:**





El Sincrotrón es una máquina **pulsada**: Solo durante el intervalo:  $\Delta t(\text{acel})$  se aceleran partículas, mientras B va en aumento.

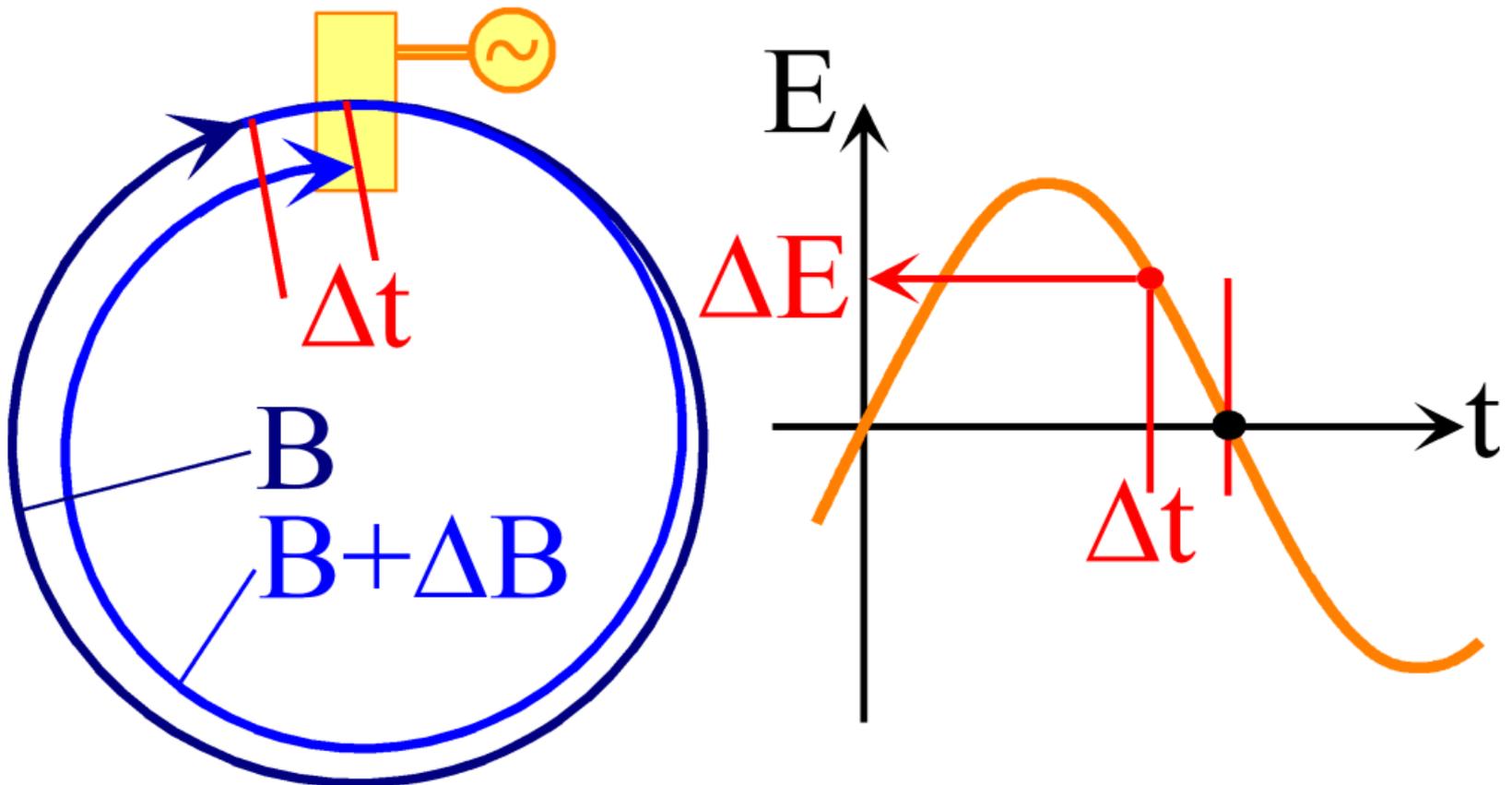
Al aumentar B por **estabilidad de fase** E acelera las partículas justo lo requerido para **R = const.**



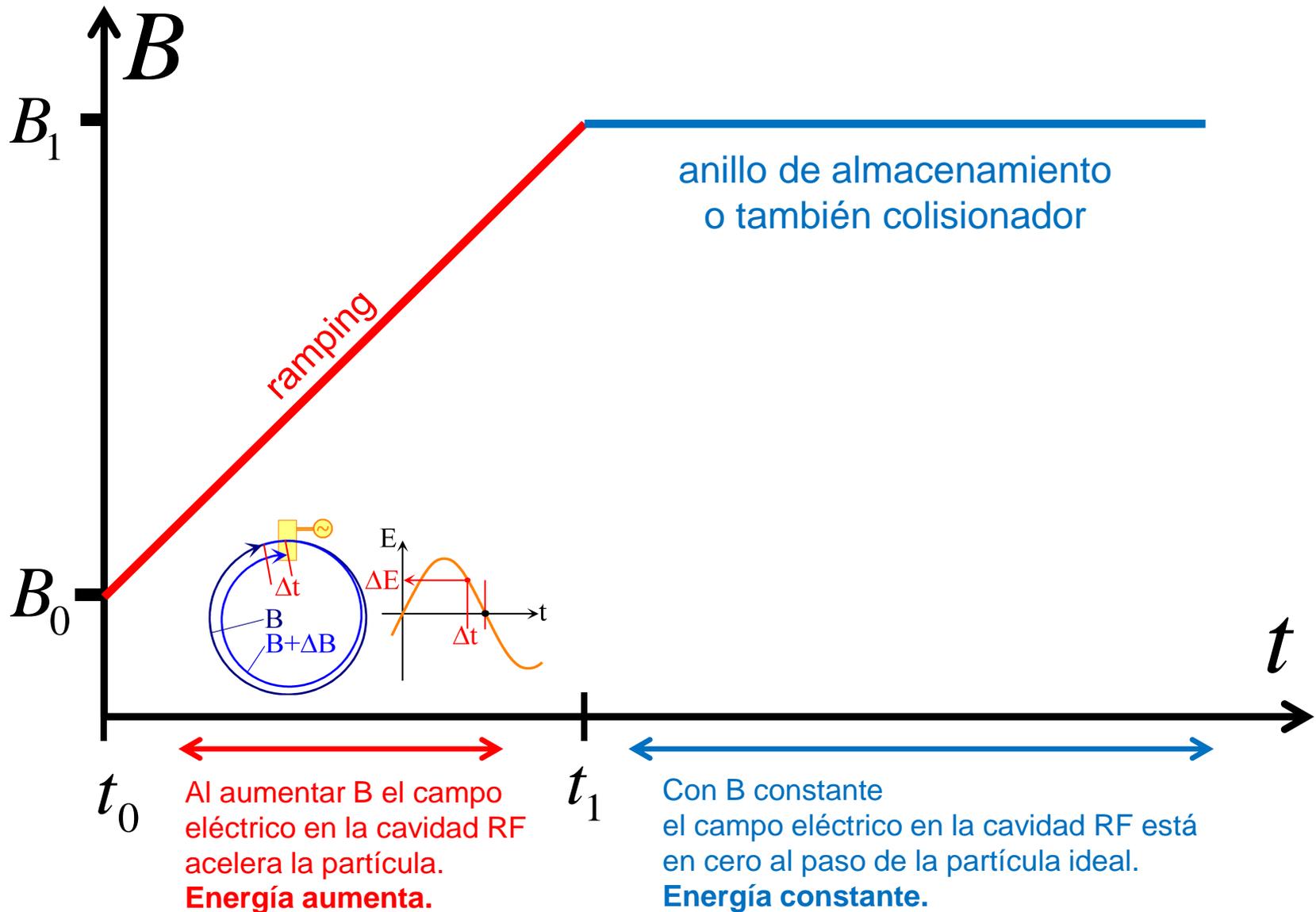
**Sincrotrón**

# Principio de Sincrotrón

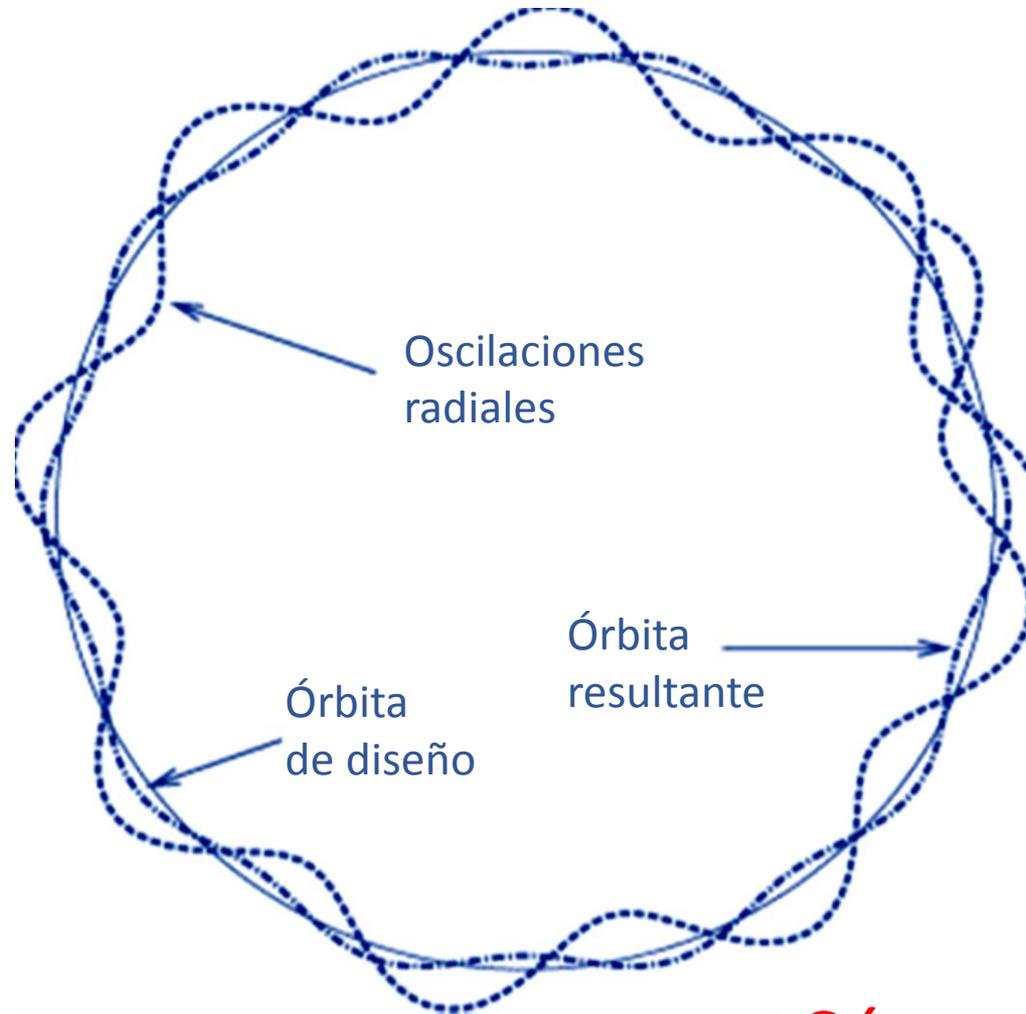
Aceleración por estabilidad de fase



# De sincrotrón a anillo colisionador



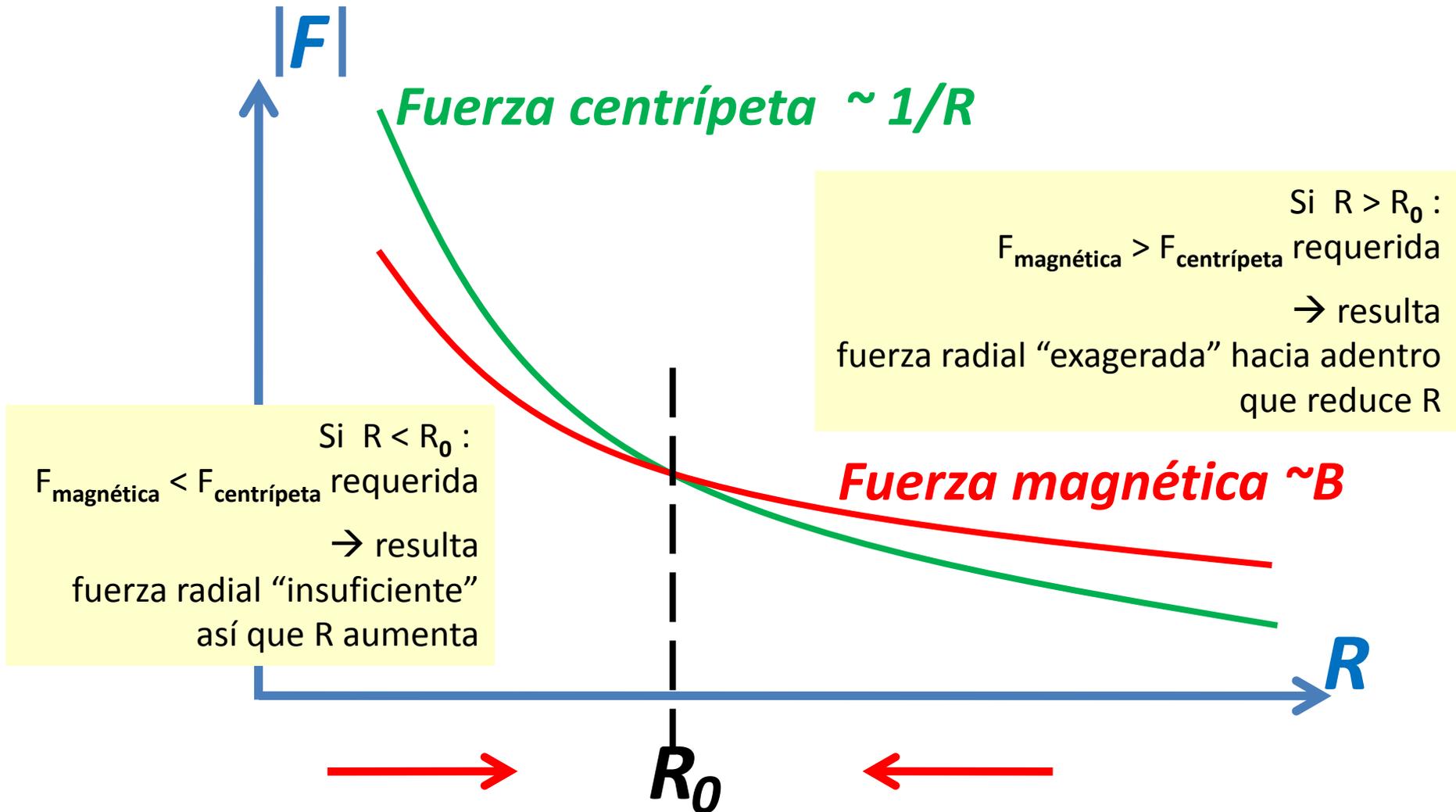
- Estabilidad espacial RADIAL



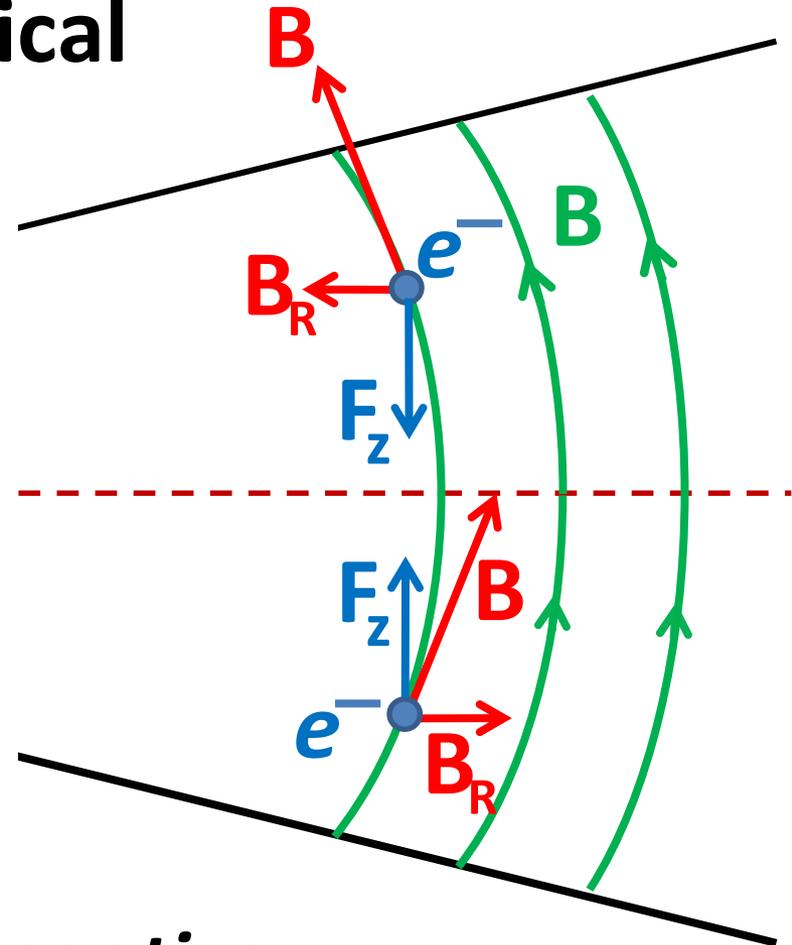
¿Cómo se logra?

# Estabilidad en la dirección radial

B debe disminuir más lentamente que  $1/R$

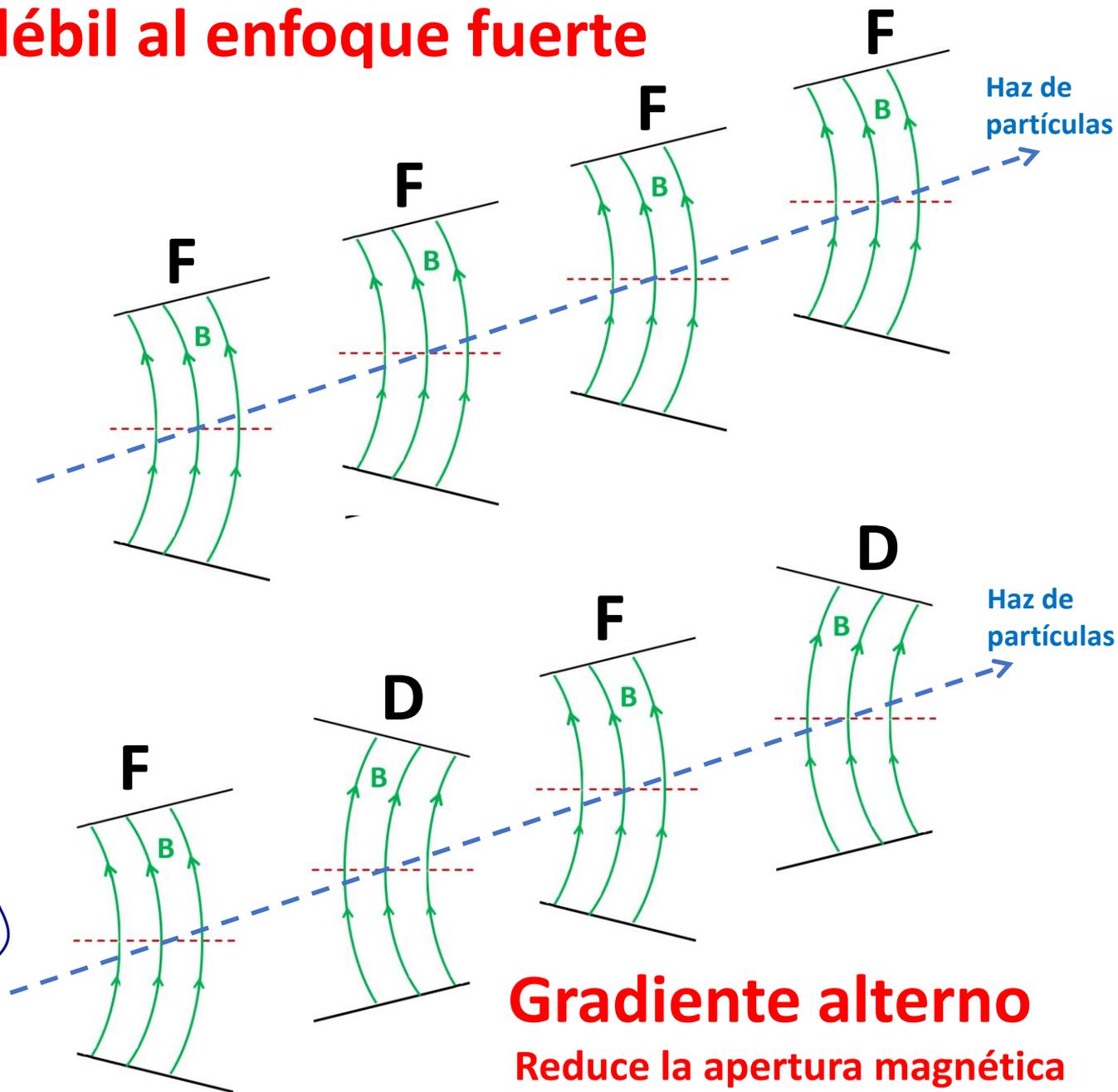
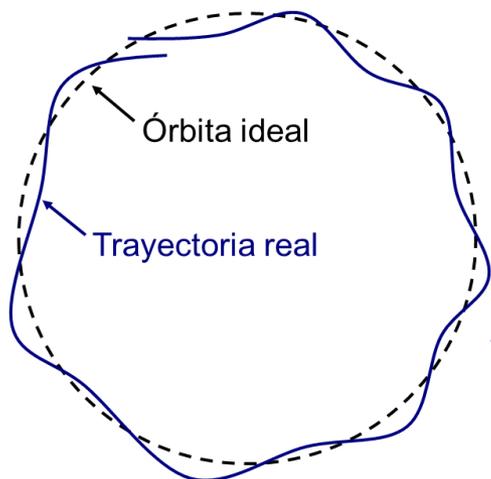
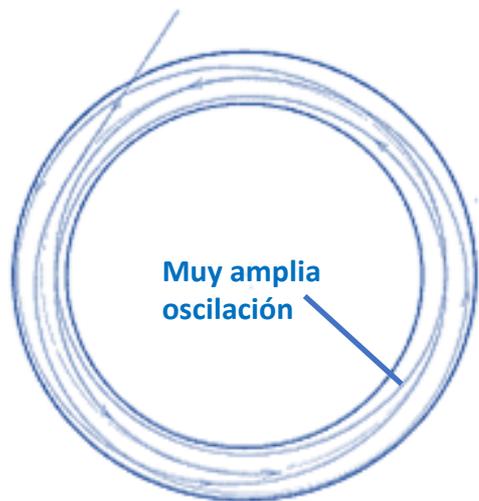


# Estabilidad en la dirección vertical

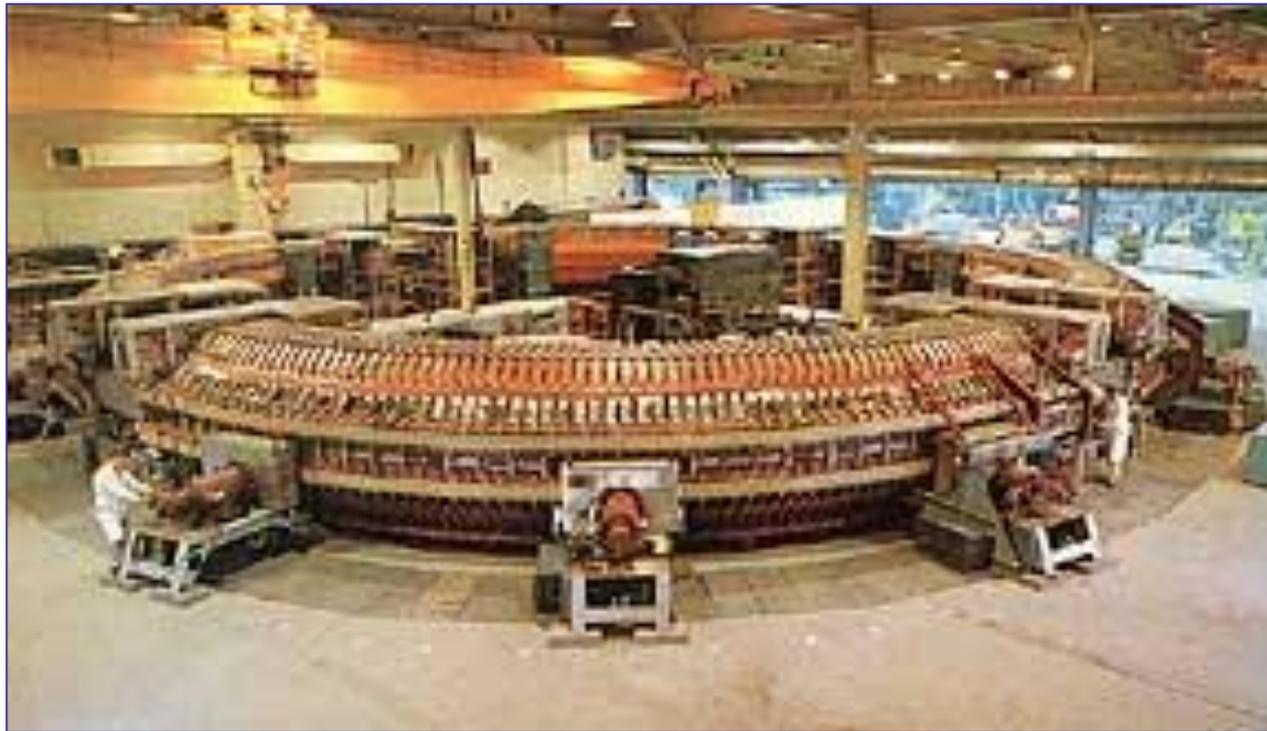


*Para carga eléctrica negativa  
(electrón entrando).*

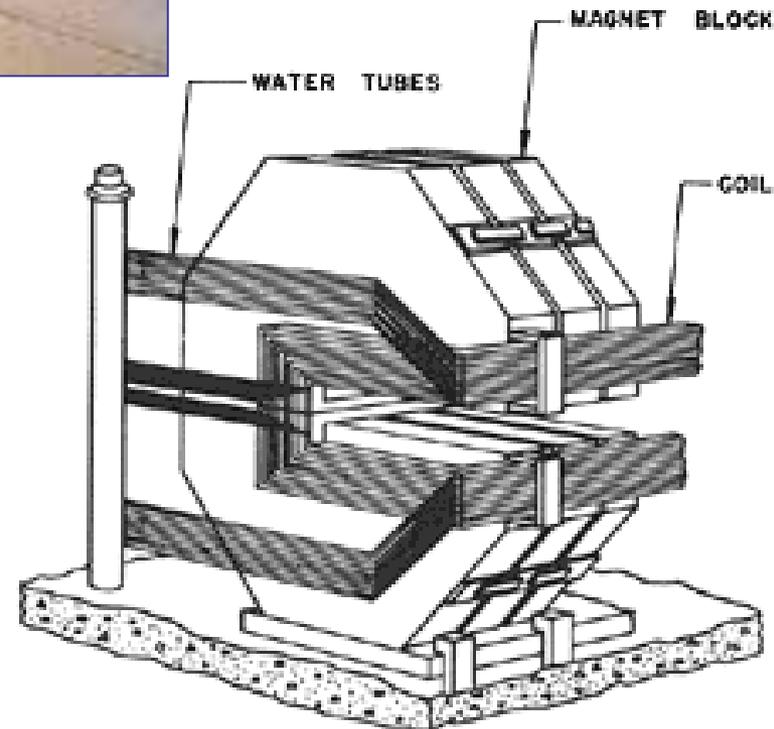
# Del enfoque débil al enfoque fuerte

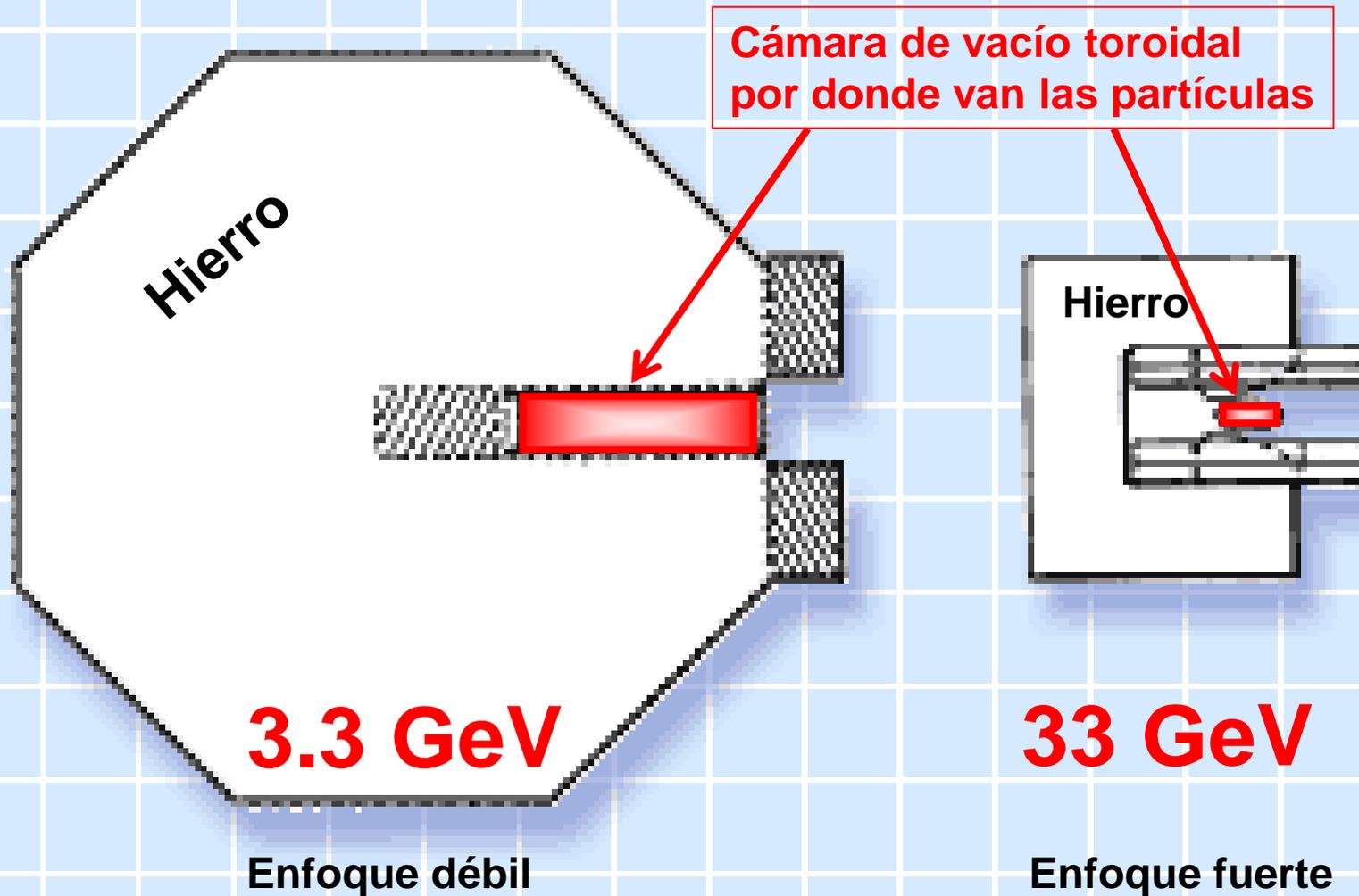


# Brookhaven National Laboratory



**COSMOTRÓN**  
**Sincrotrón**  
**de**  
**enfoque débil**



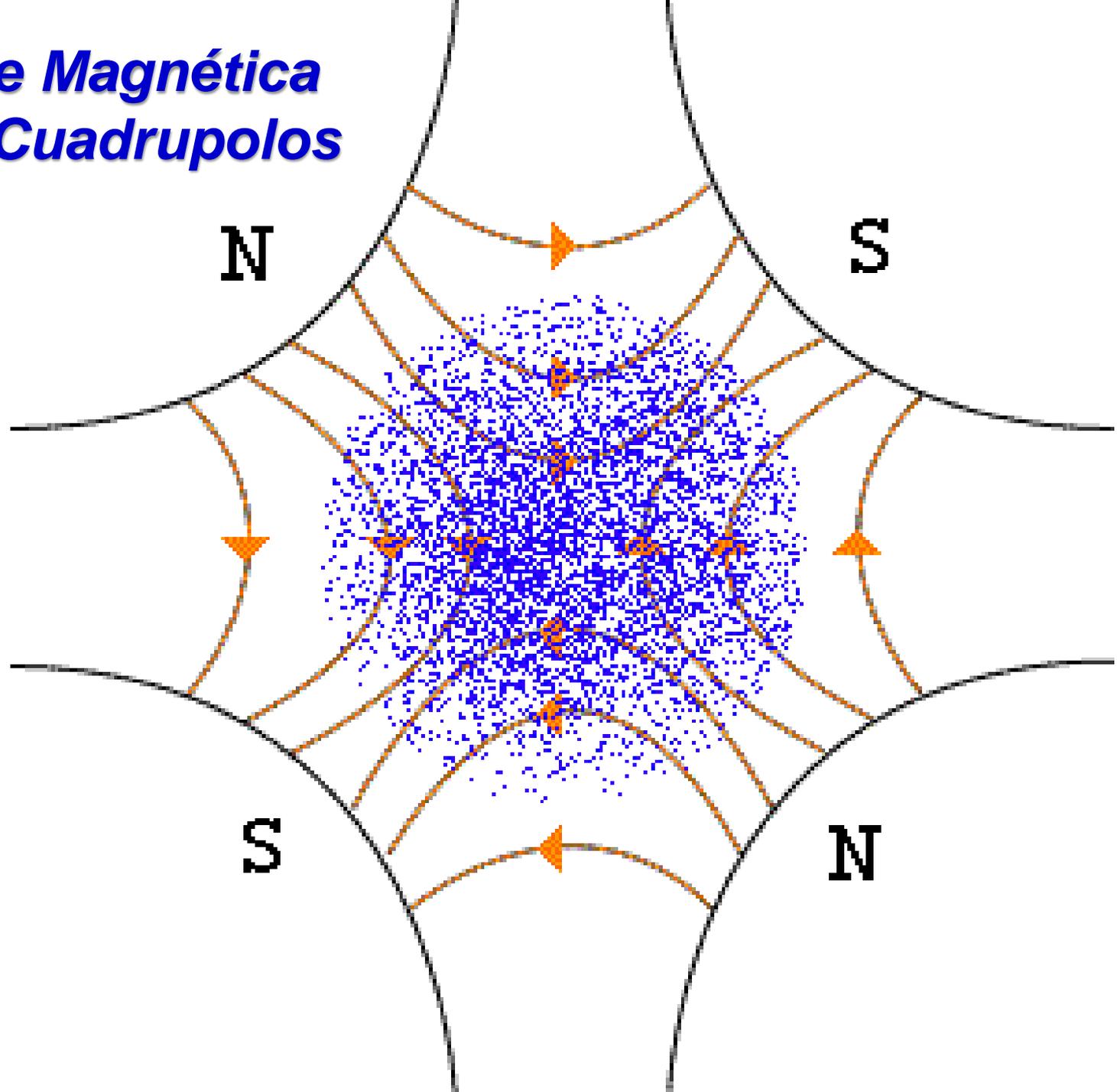


**COSMOTRÓN** 1953

**AGS** 1960

**Brookhaven National Laboratory**

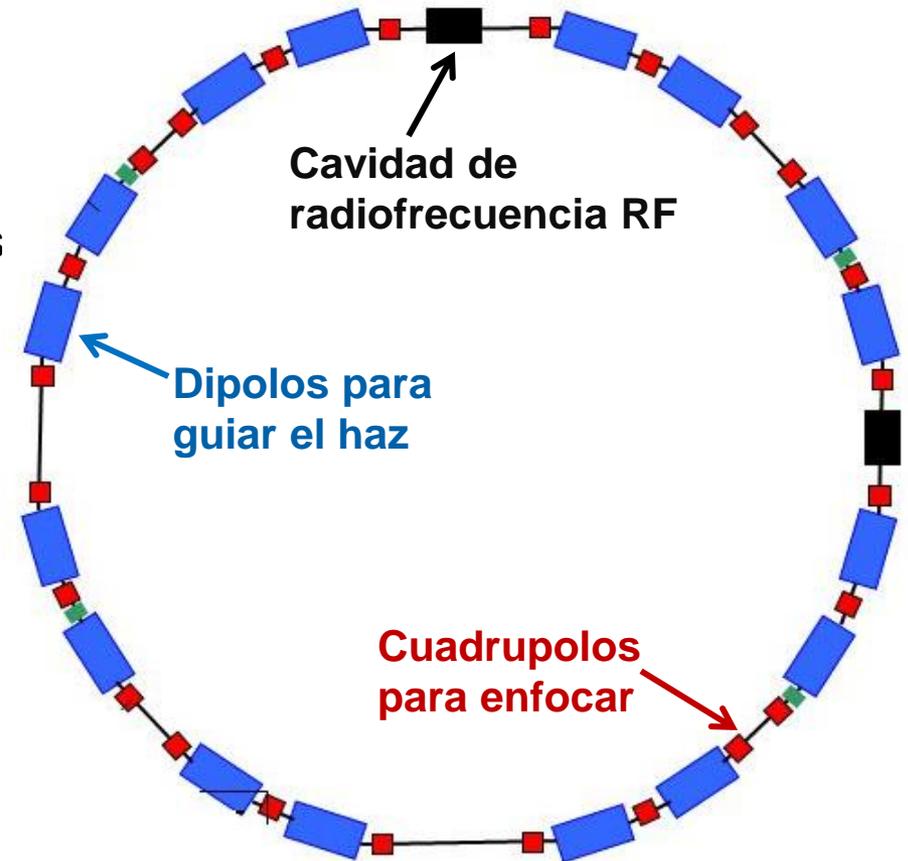
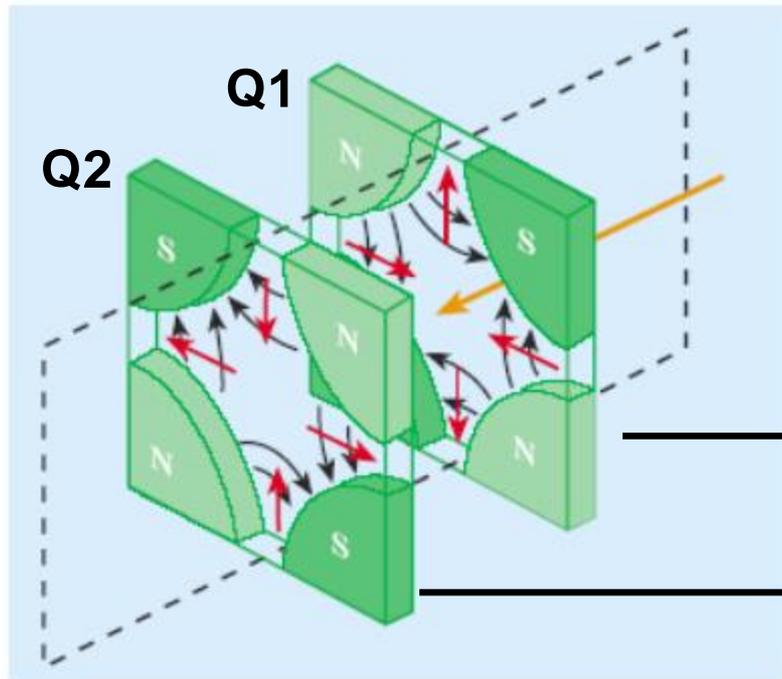
***Lente Magnética  
con Cuadрупolos***



# Sincrotrón moderno:

Dipolos magnéticos para guiar partículas  
Cuadrupolos magnéticos para enfocar  
Sextupolos para correcciones.

## Lente magnética:



→ **Q1:** Enfoca en la horizontal,  
desenfoca en la vertical.

→ **Q2:** Enfoca en la vertical,  
desenfoca en la horizontal.



**Fig. 6.2** The tunnel of the Tevatron is 6.8 km long. The Main Injector was built in the years 1993–1999 and has greatly contributed, with the upgrade of the antiproton source, to reaching the largest proton-antiproton luminosities ever obtained in a collider (Courtesy Fermilab Visual Media Services)

Chicago

Booster

CDF

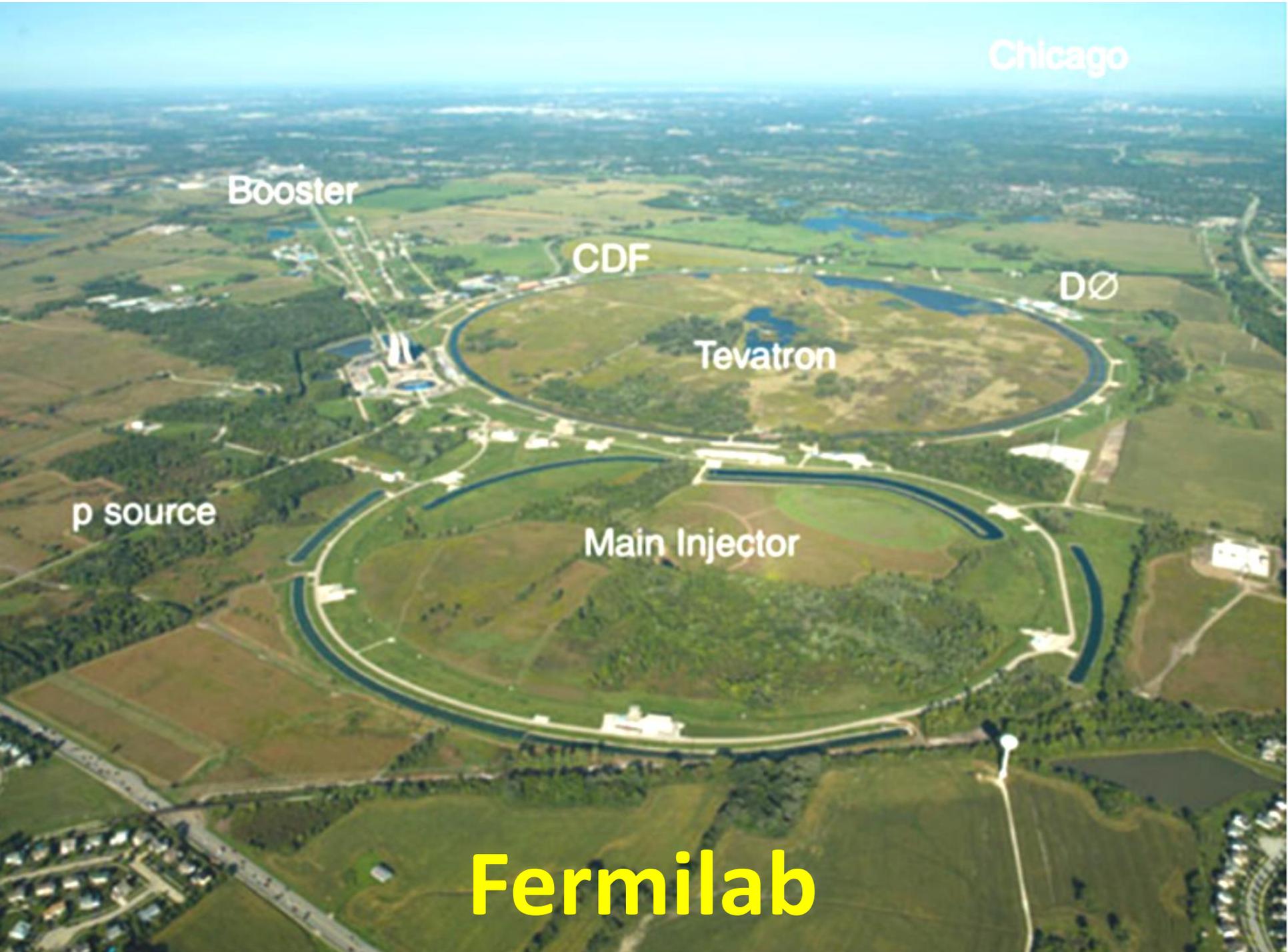
DØ

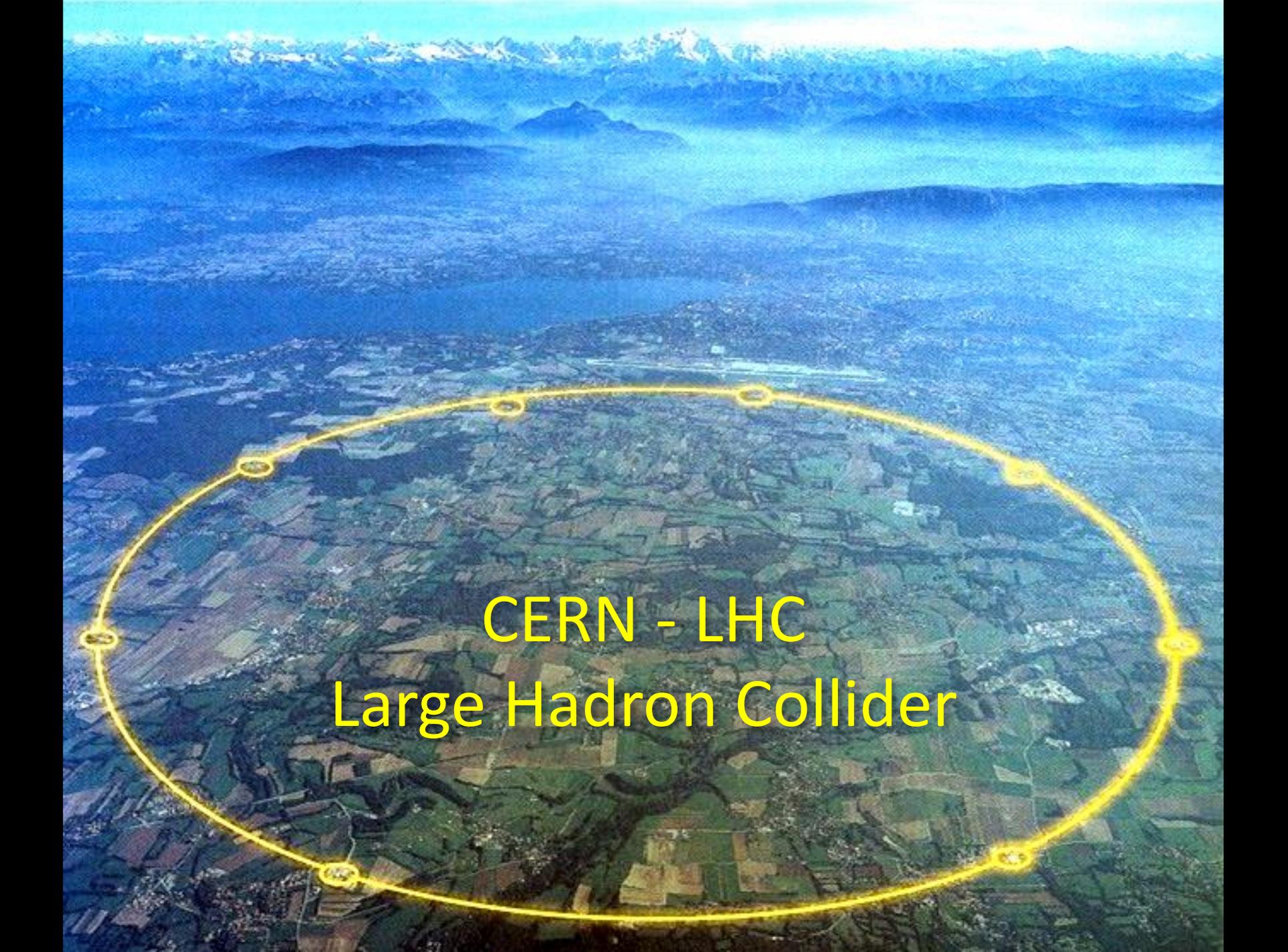
Tevatron

p source

Main Injector

Fermilab

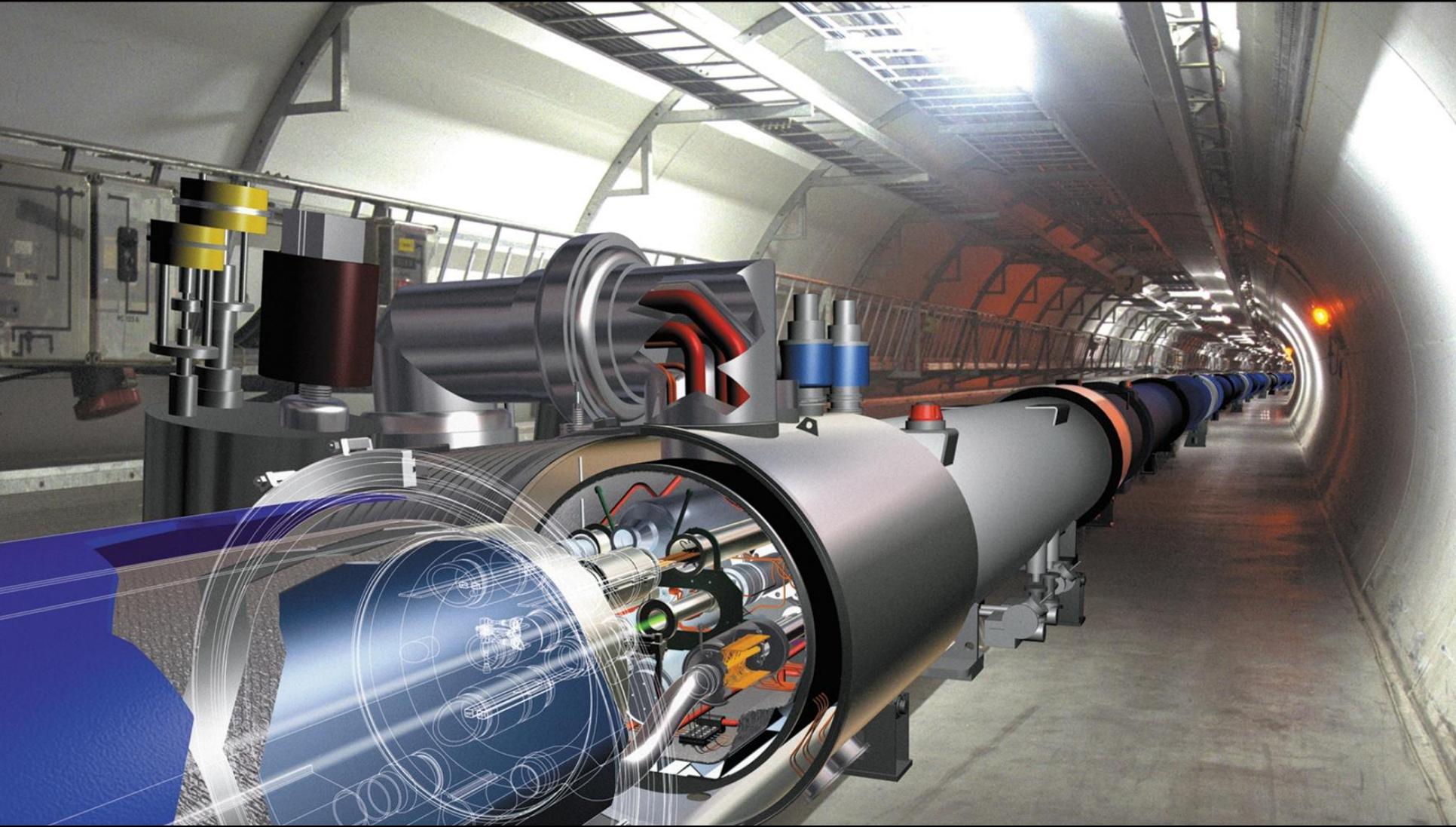


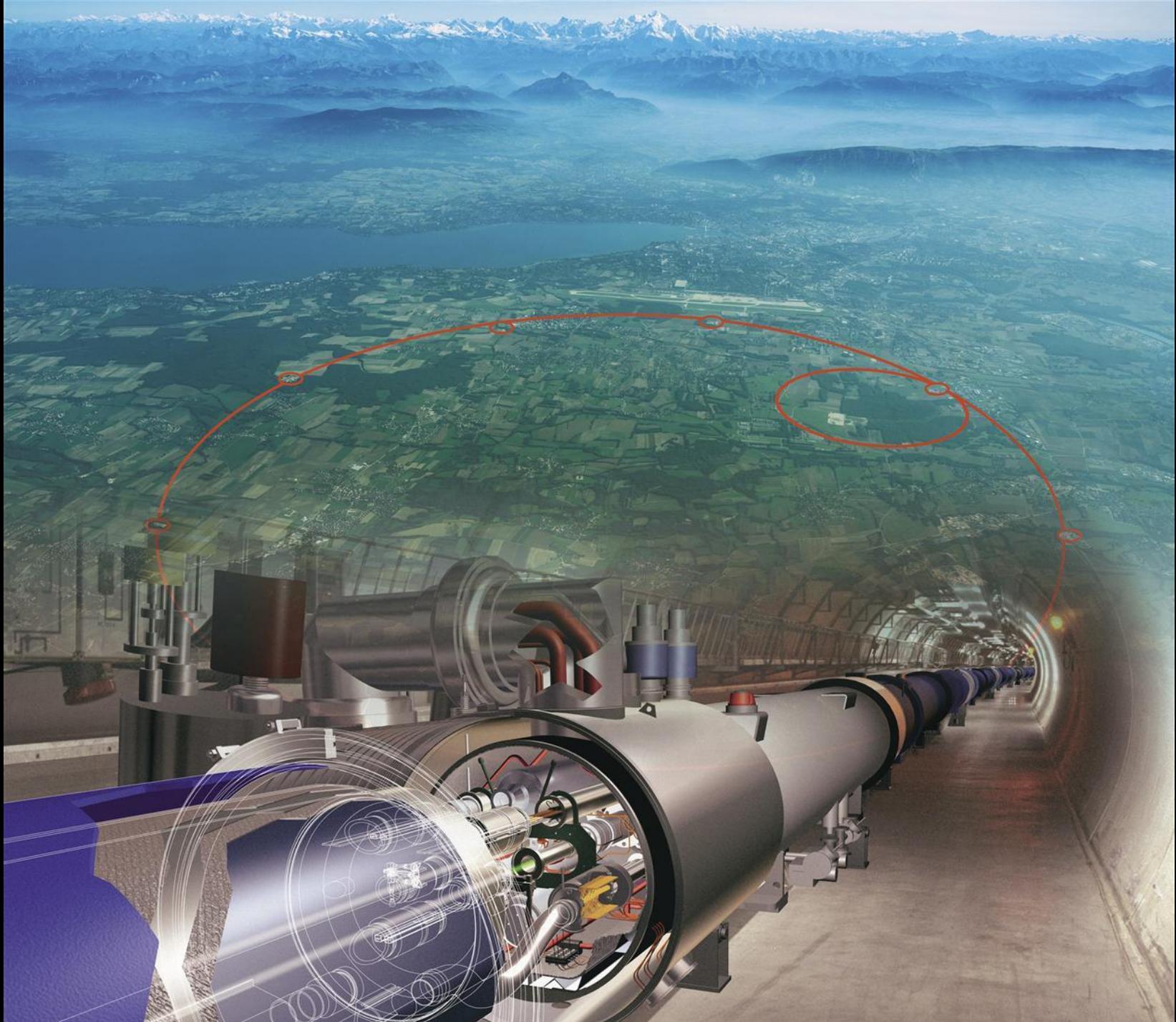
An aerial photograph of a landscape with a large yellow oval overlaid on it, representing the LHC tunnel. The landscape includes a large body of water, a city, and mountains in the background. The text "CERN - LHC Large Hadron Collider" is centered in the yellow oval.

CERN - LHC  
Large Hadron Collider

# CERN - LHC

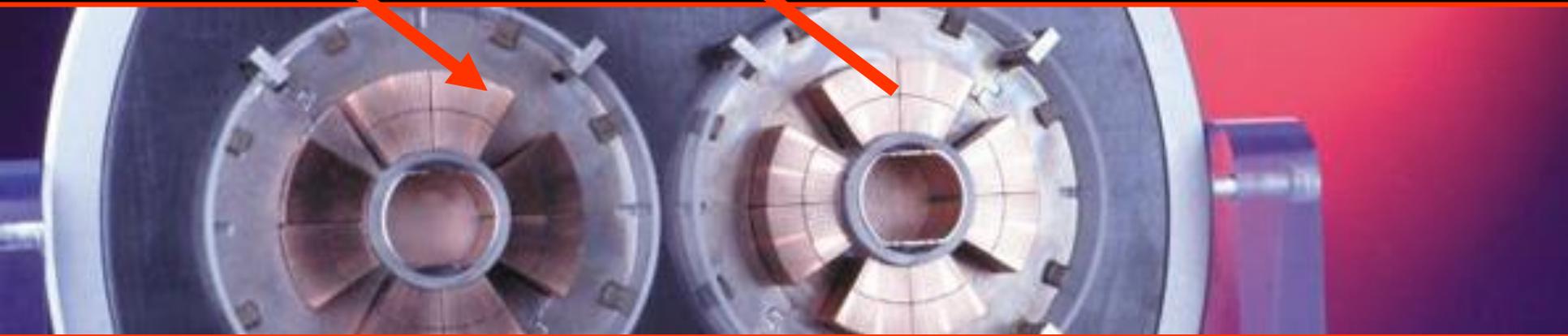
## Large Hadron Collider





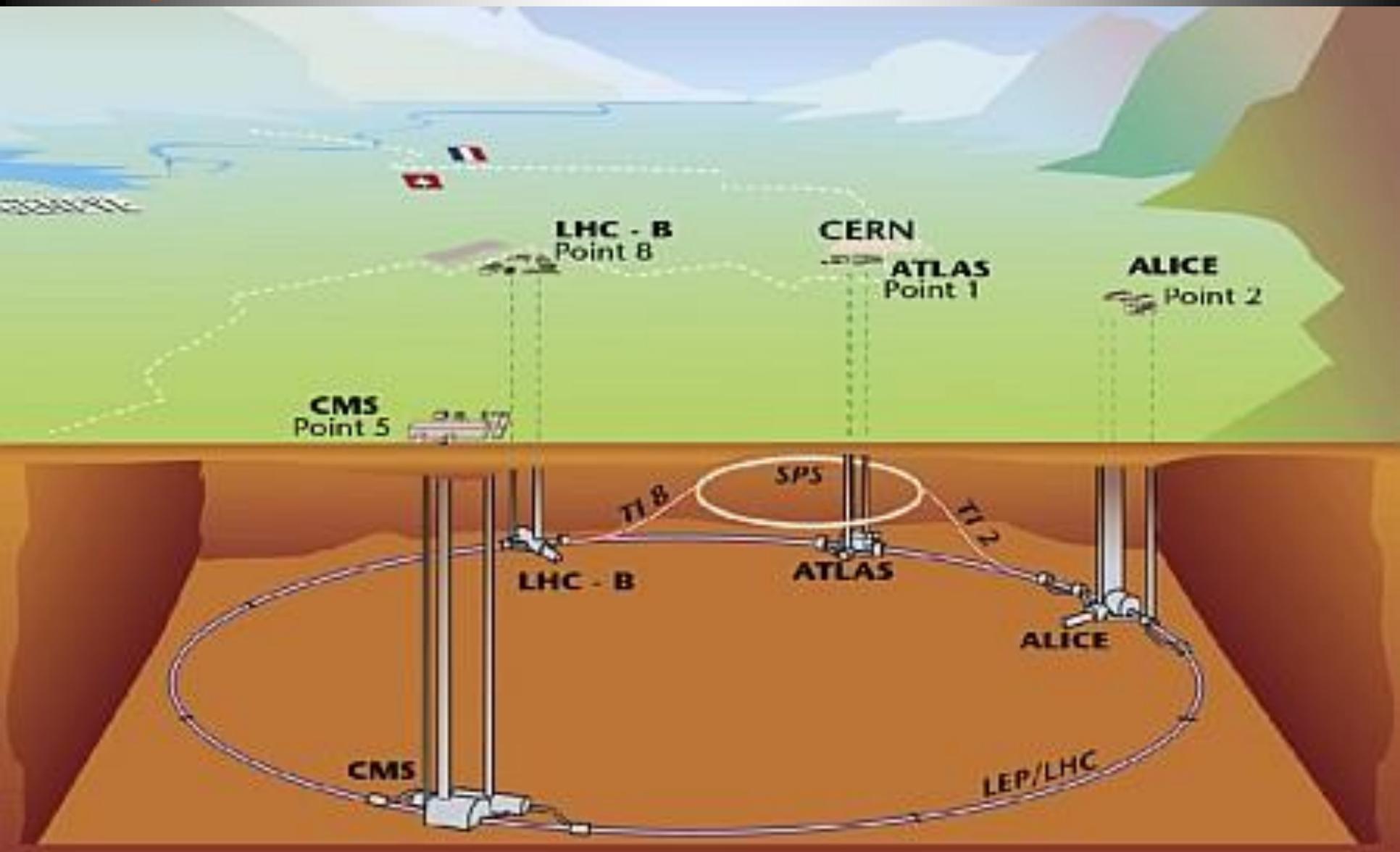
**7 TeV** **Protones**

**Protones** **7 TeV**



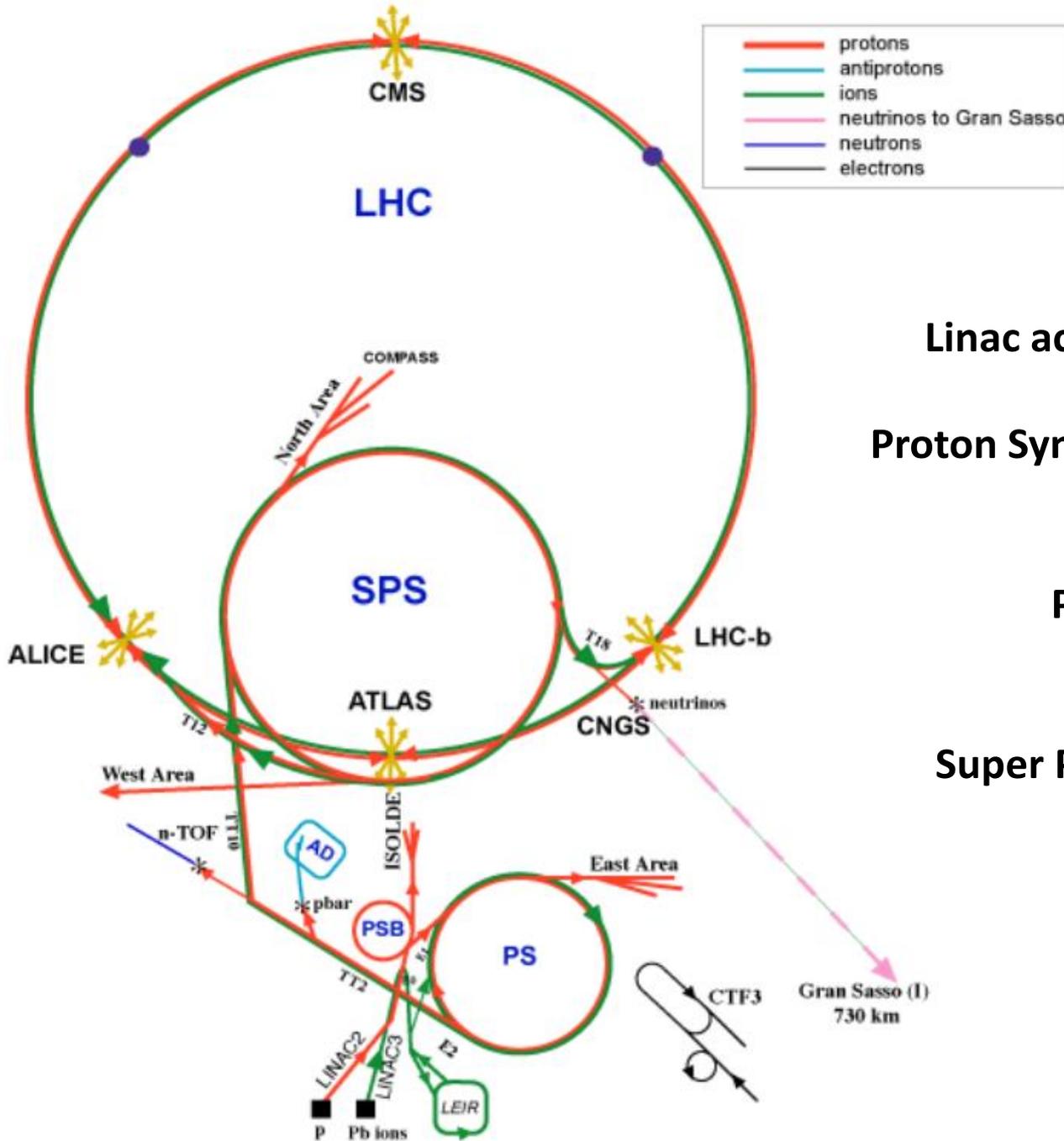
**CERN**  
**LHC**

# Experimentos del LHC



100 m bajo tierra

# LHC



Linac acelera  $H^-$  hasta **160 MeV**

Proton Synchrotron Booster (PSB)  
hasta **2 GeV**

Proton Synchrotron (PS)  
hasta **25 GeV**

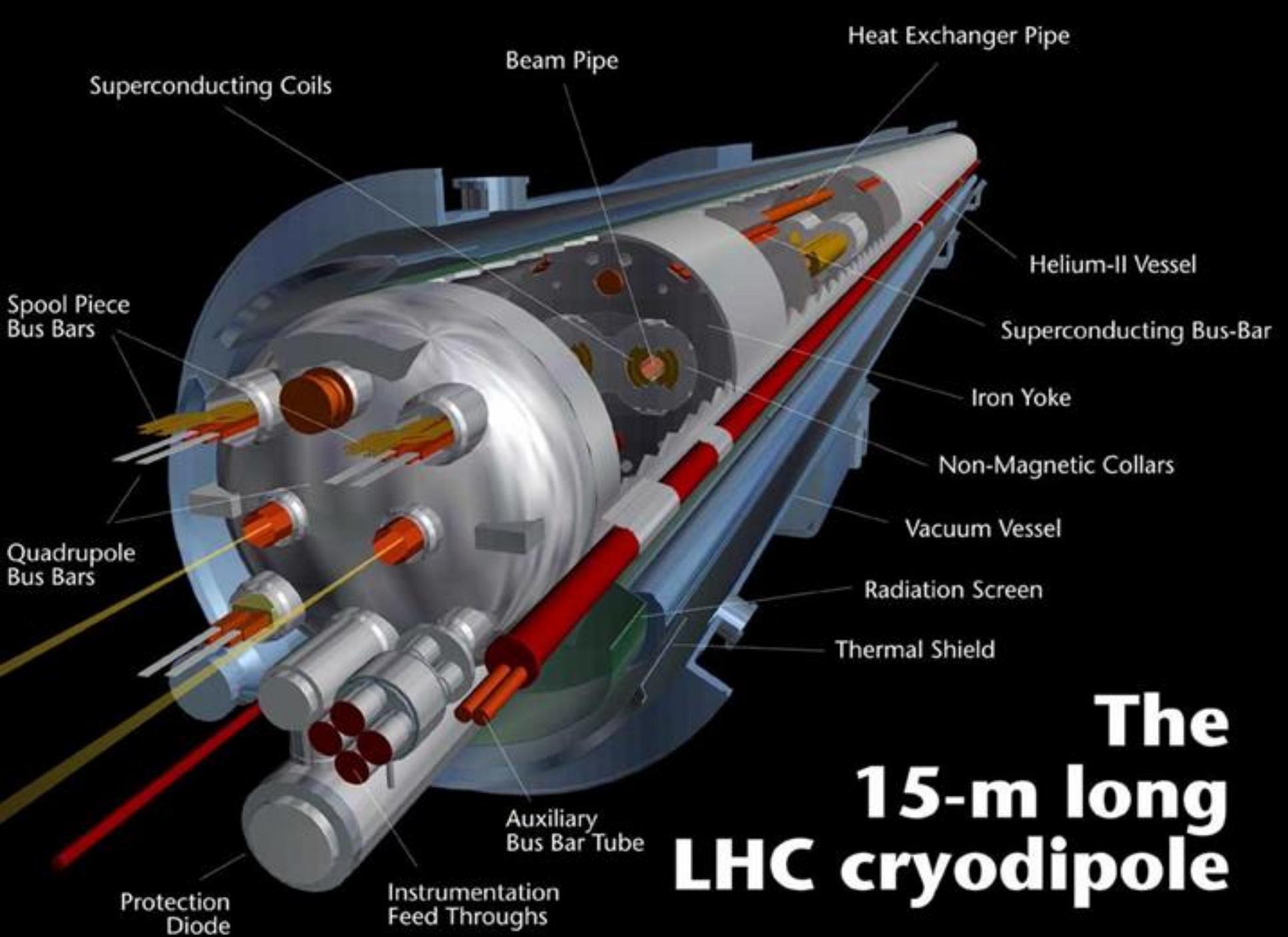
Super Proton Synchrotron (SPS)  
hasta **450 GeV**

# LHC

## Design parameters

## number

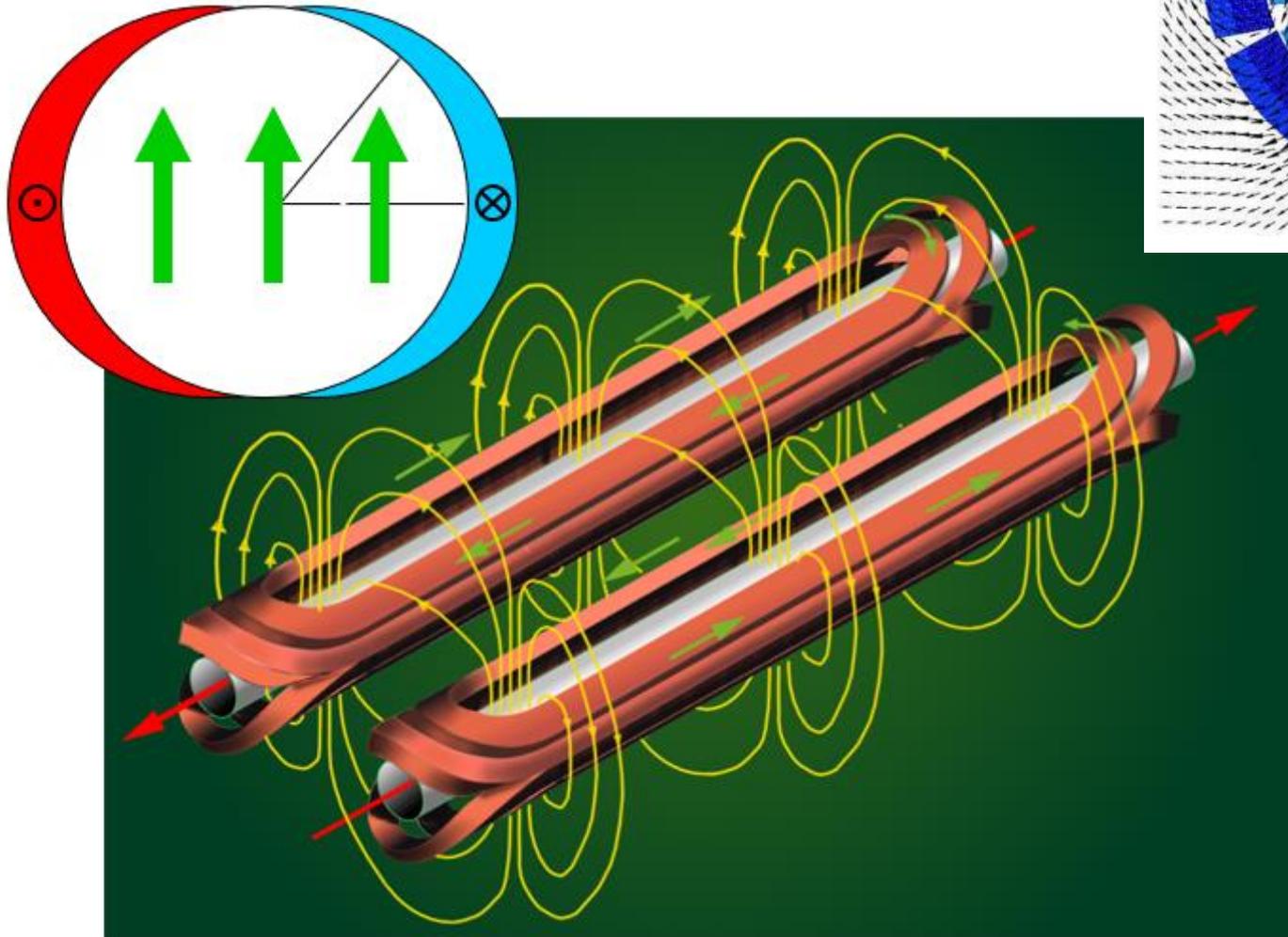
Circumference	26 659 m
Dipole operating temperature	1.9 K (-271.3 °C)
Number of magnets	9593
Number of main dipoles	1232
Number of main quadrupoles	392
Number of RF cavities	8 per direction
Energy, protons	7 TeV*
Energy, ions	2.76 TeV/u (**)
Peak magnetic dipole field	8.3 T
Distance between bunches	~7.5 m
Luminosity (protons)	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
No. of bunches per proton beam	2808
No. of protons per bunch	$1.1 \times 10^{11}$
Number of turns per second	11 245
Number of collisions per second	1 billion



# The 15-m long LHC cryodipole

# Embobinados en el LHC

en los electroimanes superconductores  
a lo largo de 27 km: **1232 Dipolos**



Hay además  
858 cuadrupolo  
para enfoque  
y  
7210 magnetos  
menores  
(sextupolos de  
"corrección")

En total 9300  
electroimanes.

# CABLE superconductor:

FILAMENTOS hacen ALAMBRES.

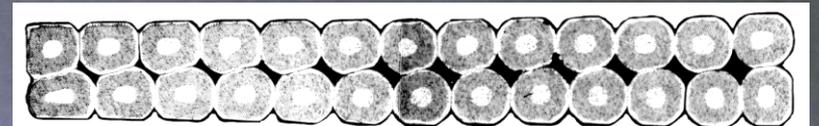
ALAMBRES hacen CABLES, así:

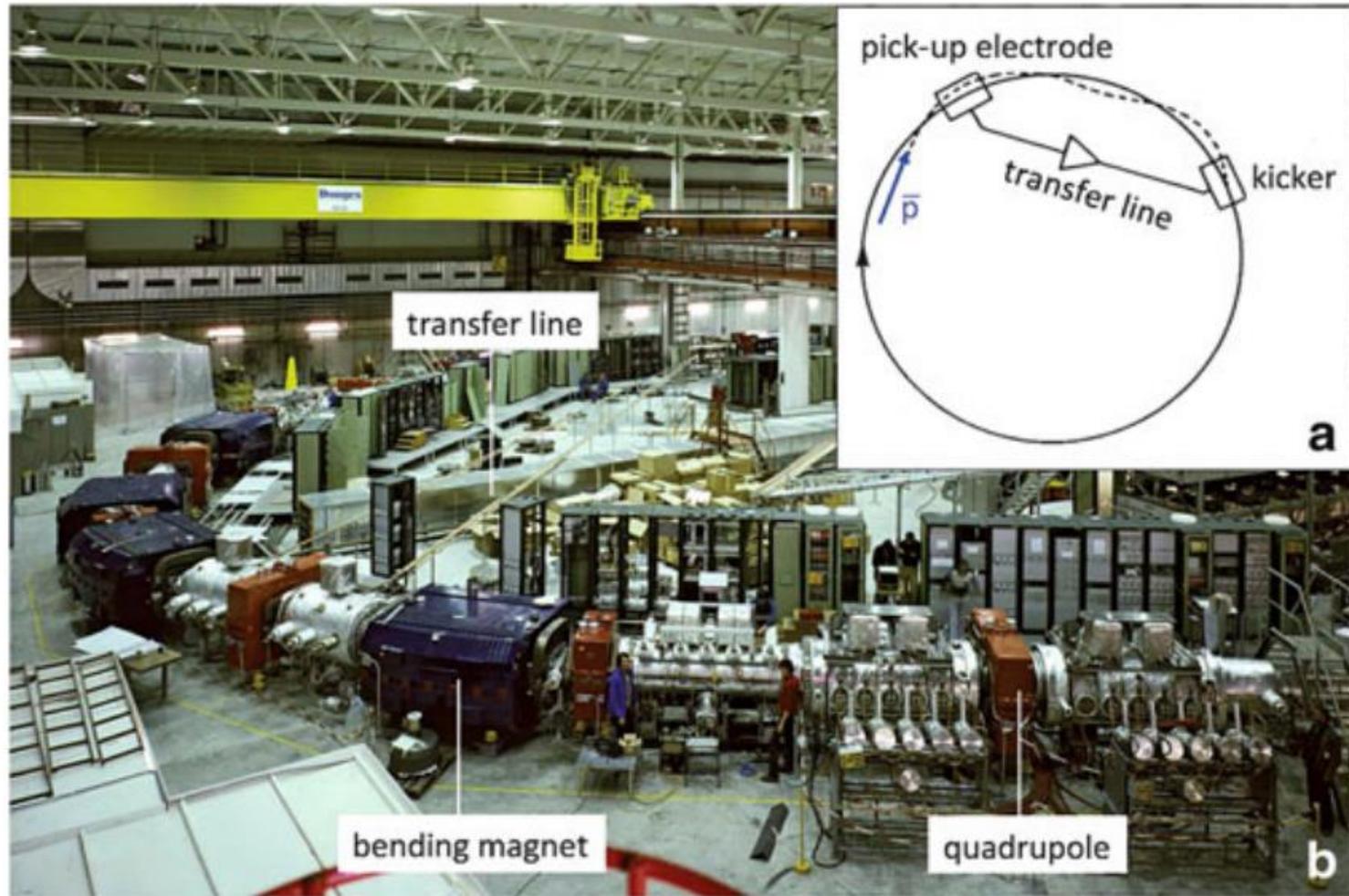
Un FILAMENTO sencillo de Niobio Titanio, más delgado que un cabello humano, en campo magnético de 6 Tesla lleva corriente de 50 mA.  
5.000 a 10.000 filamentos reunidos, hacen un ALAMBRE.

UN ALAMBRE lleva corriente eléctrica de 250 A hasta 500 A.  
Para 5.000 A hasta 10.000 A se reúnen 20 a 40 ALAMBRES  
Esto es un CABLE.



CABLE RUTHERFORD





**Fig. 3.6** (a) To reduce the radial dimensions of a bunch of particles circulating in a synchrotron, a signal is sent from a measuring device to a kicker that corrects the radial position of the particles. (b) To contain the wide antiproton bunches, the beam pipe is very broad, as shown by the dimensions of the bending magnets and quadrupoles (Courtesy CERN)

# Aceleradores Presente y Futuro



Fundamentos de  
Aceleradores y Colisionadores  
Hadrónicos y Leptónicos

Sincrotrón y  
Colisionadores Circulares

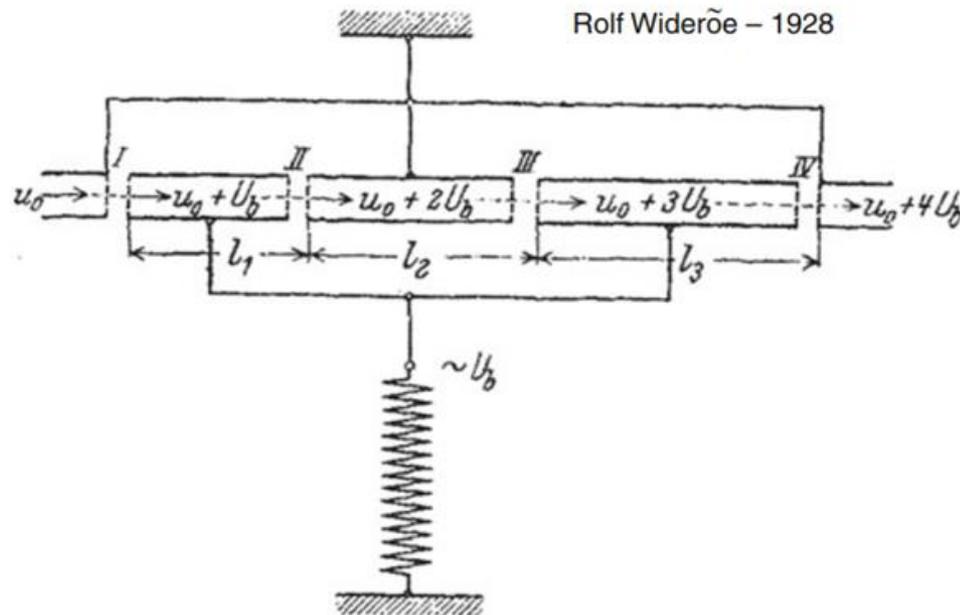
**Colisionadores Lineales**

Nuevos Desarrollos y  
proyectos futuros

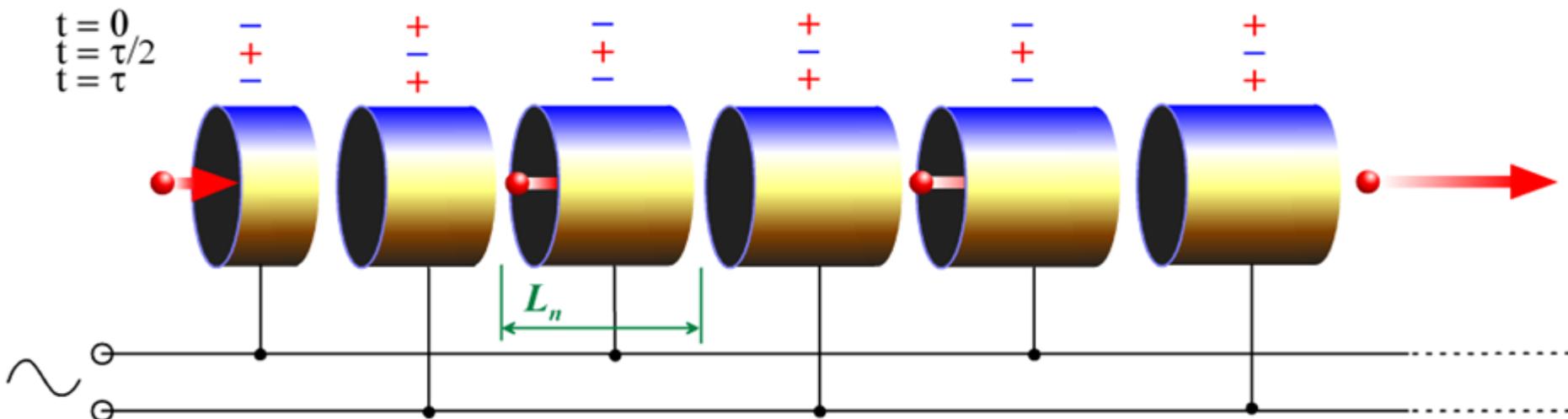
Conclusiones

Pasemos ahora a los...

# ACELERADORES Y COLISIONADORES LINEALES

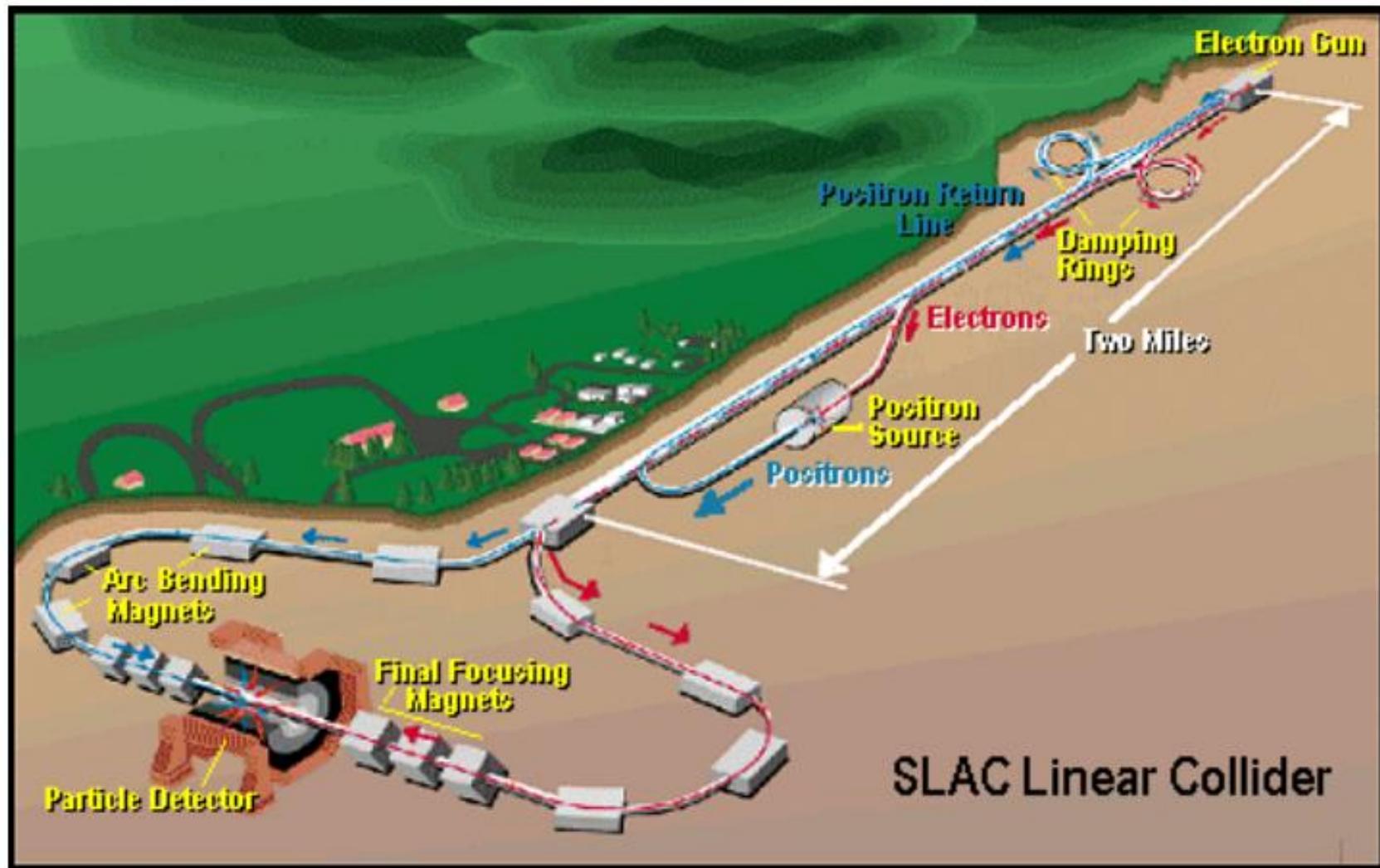


## Aceleración en cavidades RF



Exige resonancia entre frecuencia del movimiento de paso periódico entre cilindros y frecuencia del potencial eléctrico oscilante en ellos por fuente externa.

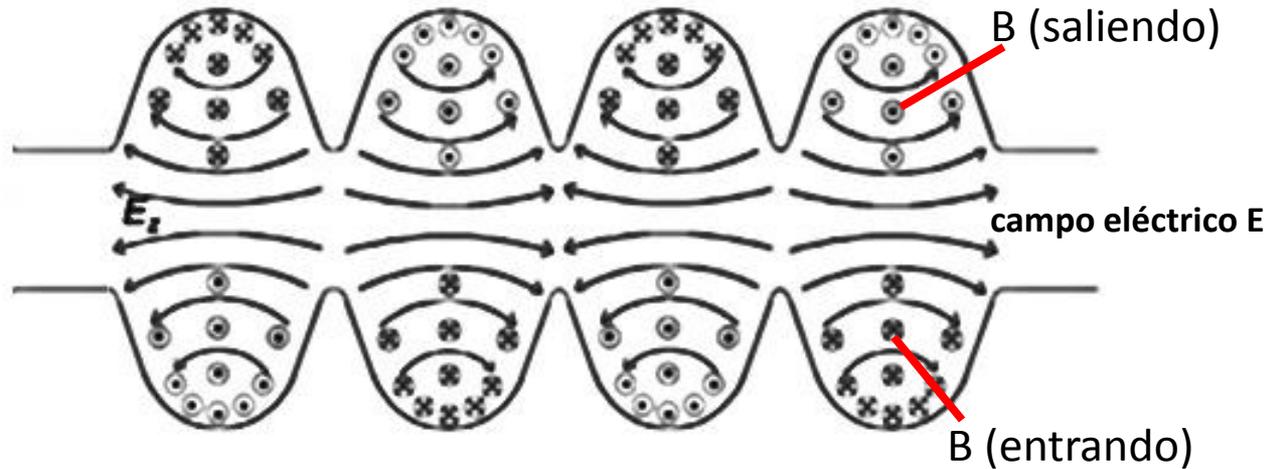
# SLAC



Stanford 100 GeV electron/positron linac collider **SLC**

*Desarrollos novedosos en*

## CAVIDADES DE RADIOFRECUENCIA RF



## Cavidades SUPERCONDUCTORAS de radiofrecuencia RF

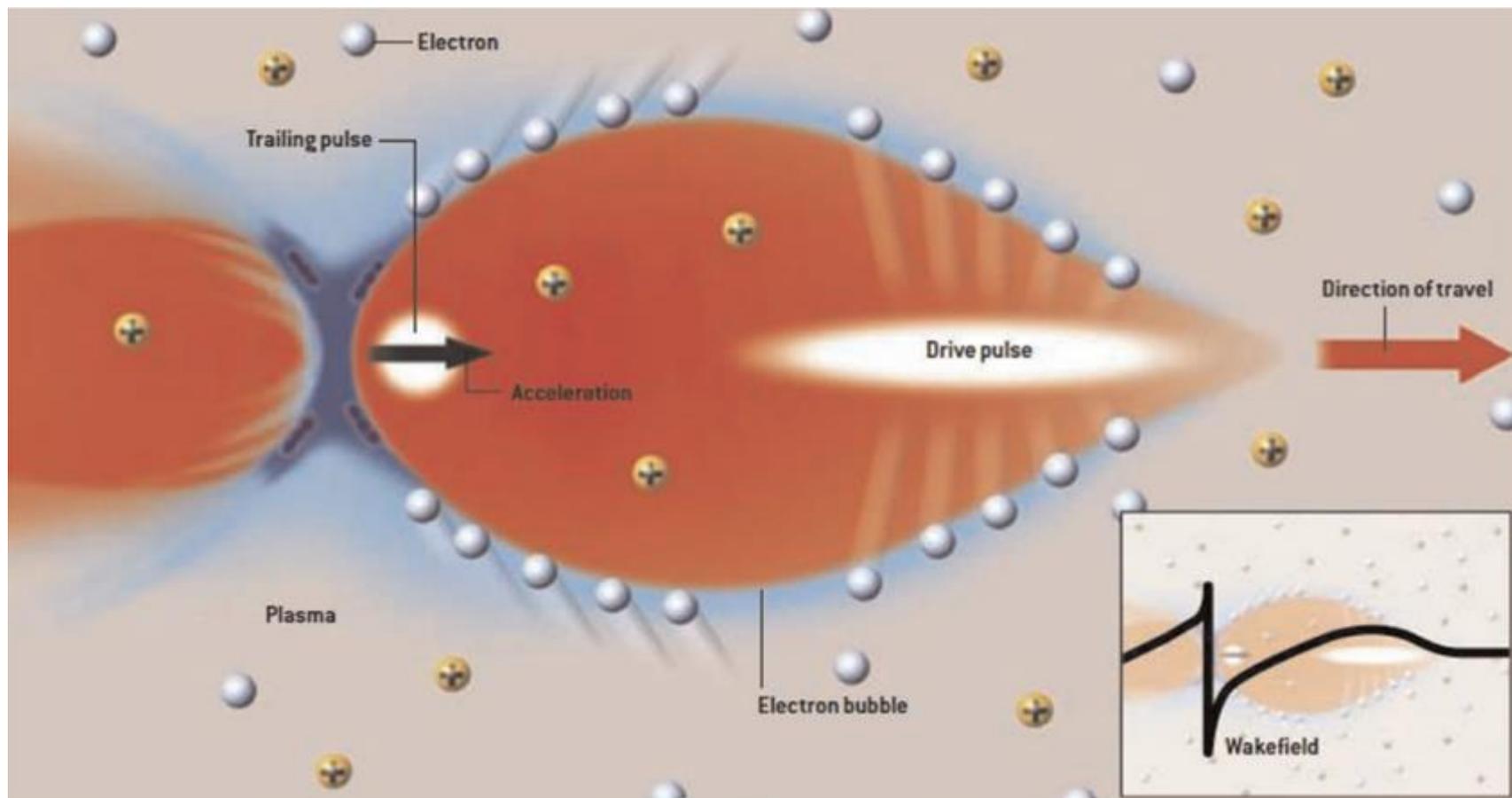


**Estructura para LINAC, superconductora, de NIOBIO puro.**

*Reto...*

Para campo eléctrico lograr **GRADIENTE** significativamente MAYOR:

$\frac{\Delta E}{\Delta x}$  ¿10 veces mayor?... ¡Por lo menos!



## Plasma Wakefield Acceleration

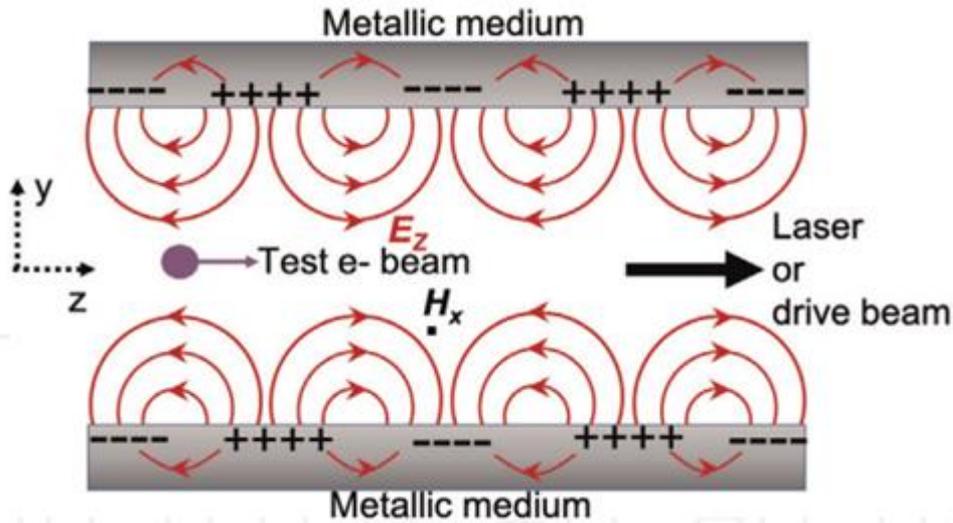
Reto...

Para campo eléctrico lograr **GRADIENTE** significativamente **MAYOR**:

$\frac{\Delta E}{\Delta x}$  ¿10 veces mayor?... ¡Por lo menos!

NOVEDOSO

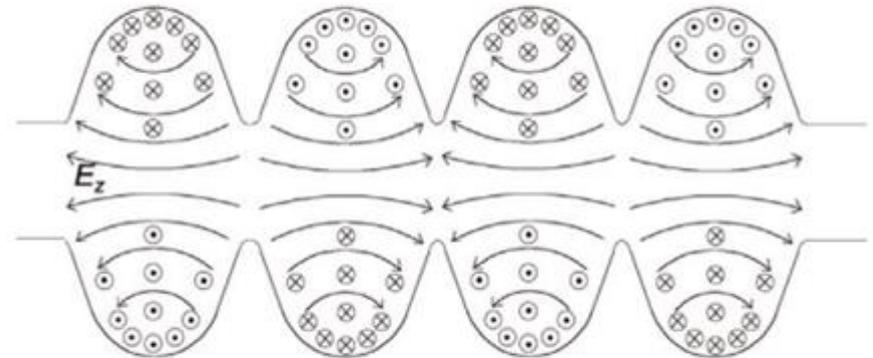
Estructura para LINAC en **PLASMA**



Longitud del orden de **1mm**

CONVENCIONAL

Estructura para LINAC en **VACÍO**



Longitud del orden de **1m**

Problema:

¿Cómo se aceleran los **POSITRONES** en el plasma?

# **Aceleradores Presente y Futuro**



**Fundamentos de  
Aceleradores y Colisionadores  
Hadrónicos y Leptónicos**

**Sincrotrón y  
Colisionadores Circulares**

**Colisionadores Lineales**

**Nuevos Desarrollos y  
proyectos futuros**

**Conclusiones**

# Proyectos en el futuro de los Colisionadores

## COLISIONADORES LINEALES:

- **ILC** (International Linear Collider):  $e^+e^-$ , energía cms de 500 GeV cms, no hay decision, Japón postpone decision.
- **CLIC** (Compact Linear Collider):  $e^+e^-$ , energía cms de 380 GeV - 3TeV, colaboración y desarrollo localizado en CERN.

## COLISIONADORES CIRCULARES:

- **FCC** (Future Circular Collider)
  - FCC-hh: 100TeV proton-proton cms energy, ion operation possible
  - FCC-ee: Potential intermediate step 90-350 GeV lepton collider
  - FCC-he: Lepton-hadron option

## NUEVOS DESARROLLOS:

- **Muon Collider**, idea de colisionador de muones desde Fermilab, hoy como proyecto de muy baja prioridad.
- **Plasma Wakefield Acceleration** en colisionadores lineales desarrollos importantes para el futuro.



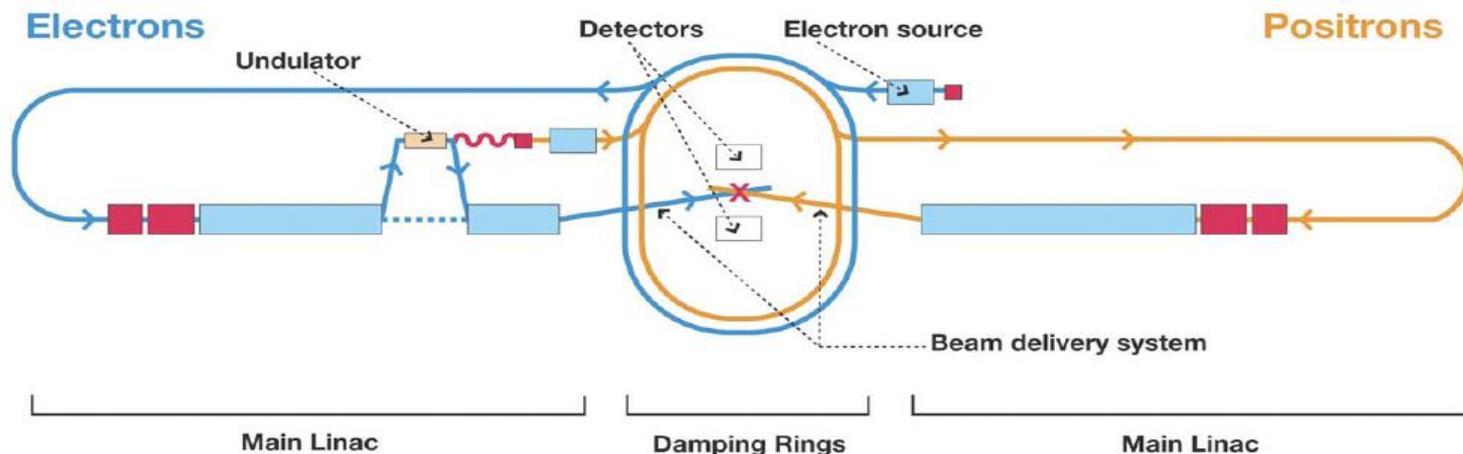
# *International Linear Collider*

Proyecto mundial  
(Asia, Norteamérica  
y Europa)  
de colisionador  
Electrón – Positrón.



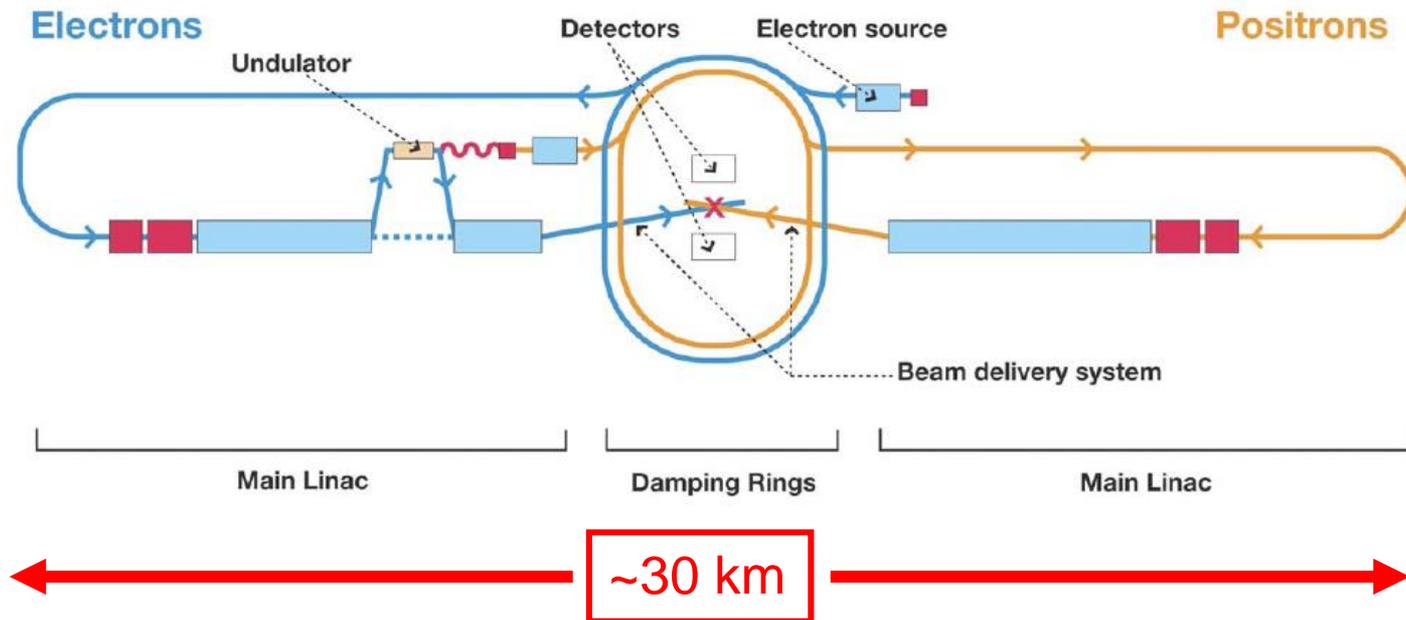
# Concepto básico del ILC

- El ILC emplea dos aceleradores lineales de 250 GeV frente a frente para producir colisiones  $e^+e^-$  casi frontales.
  - Tiene una sola región de colisión con ángulo de cruce de los rayos de 14 mrad.
- Tiene un solo inyector central
  - Anillos de enfriamiento circulares de 6.7 km para  $e^+$  y  $e^-$ .
  - Fuente de positrones basada en “ondulador”.
- Configuración de túnel dual para seguridad y suministros.

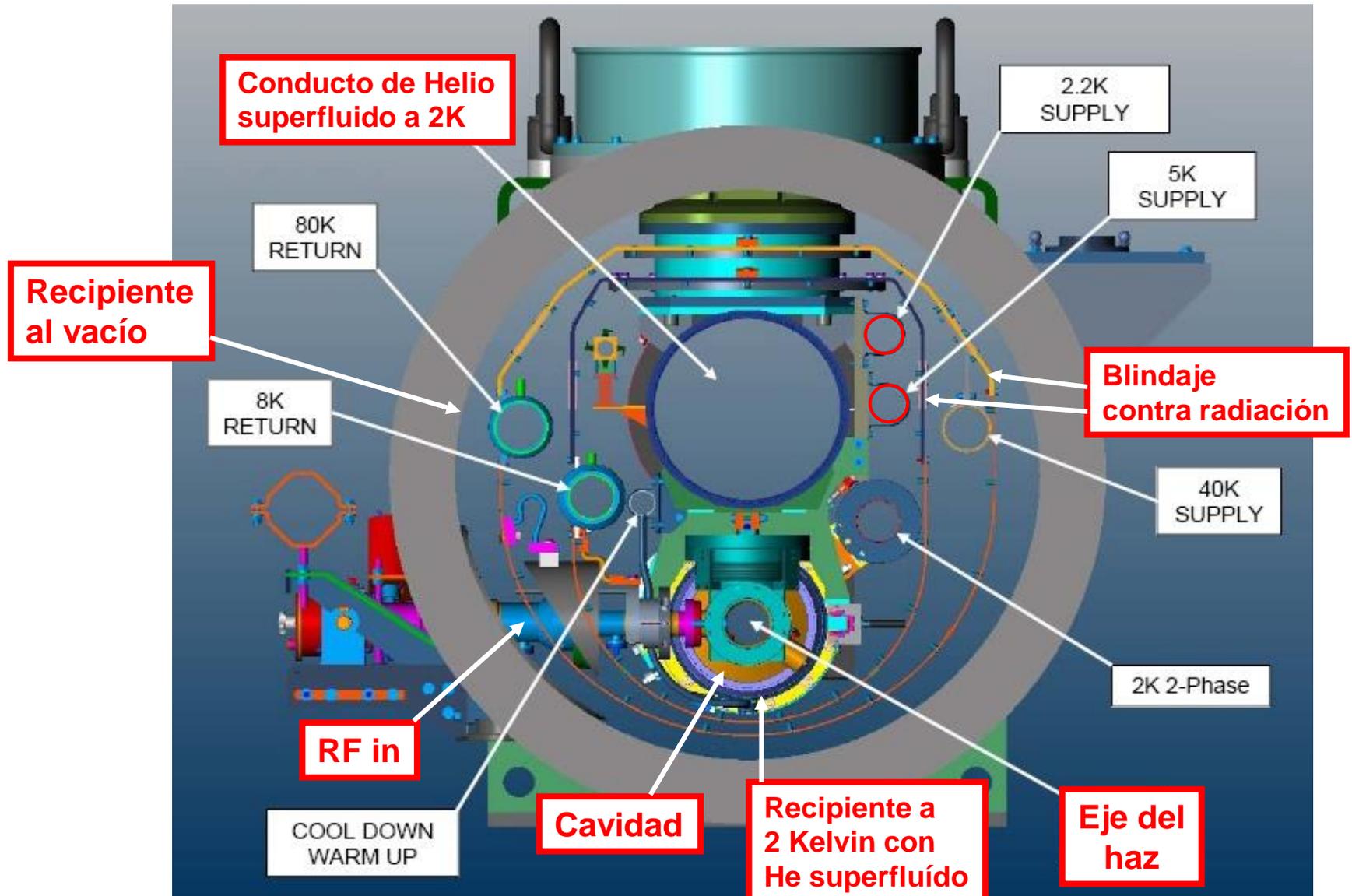


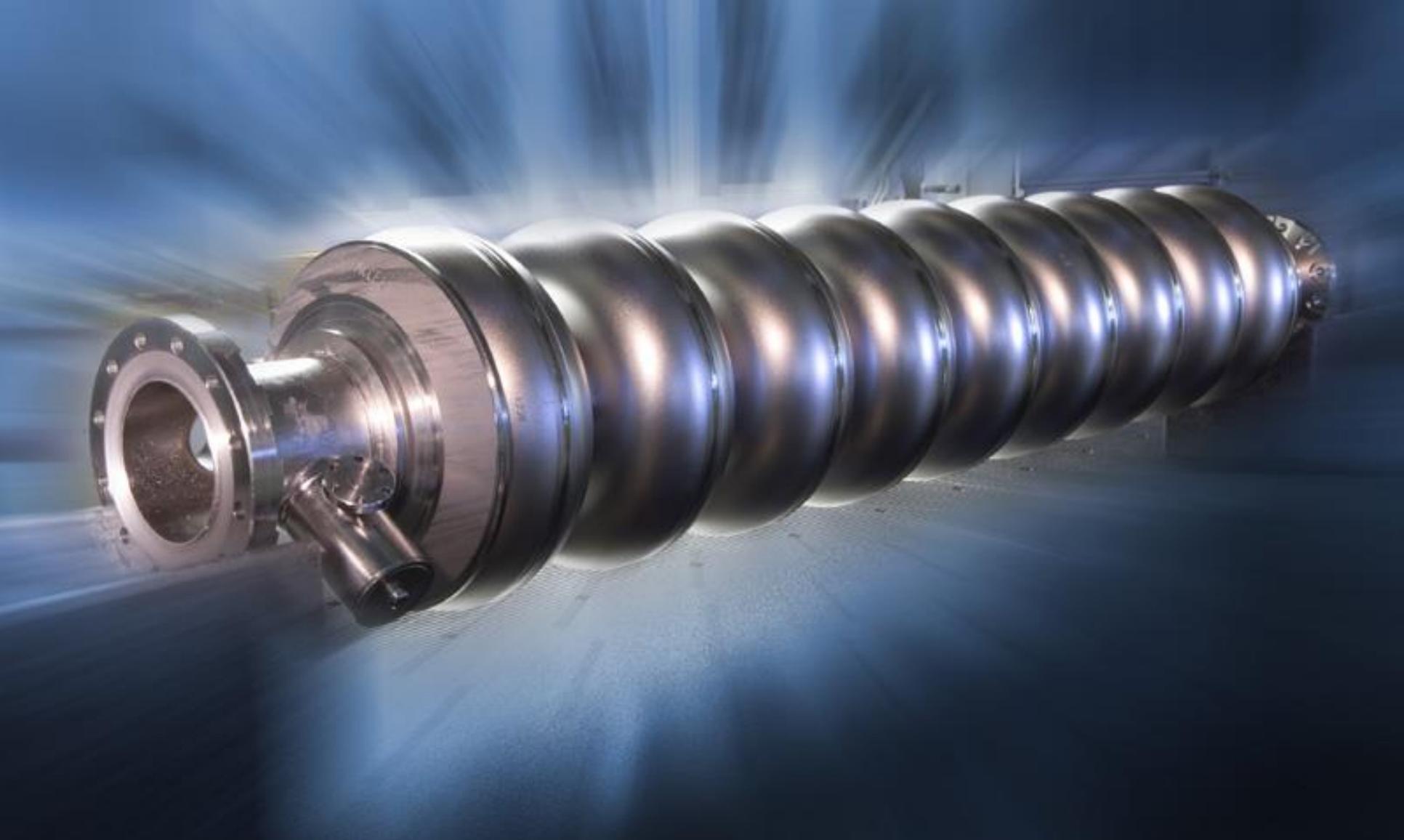
# Acelerador LINAC principal

- El acelerador colisionador ILC se basa en dos LINACS frente a frente, uno para electrones, otro para positrones,
- linacs de cavidades superconductoras de radiofrecuencia,
- longitud total (2 linacs) de 23 km,
- 1680 módulos criogénicos,
- 14 560 cavidades superconductoras de radiofrecuencia, que ofrecen un gradiente de 31.5 MegaVoltios / metro.



# Módulo criogénico



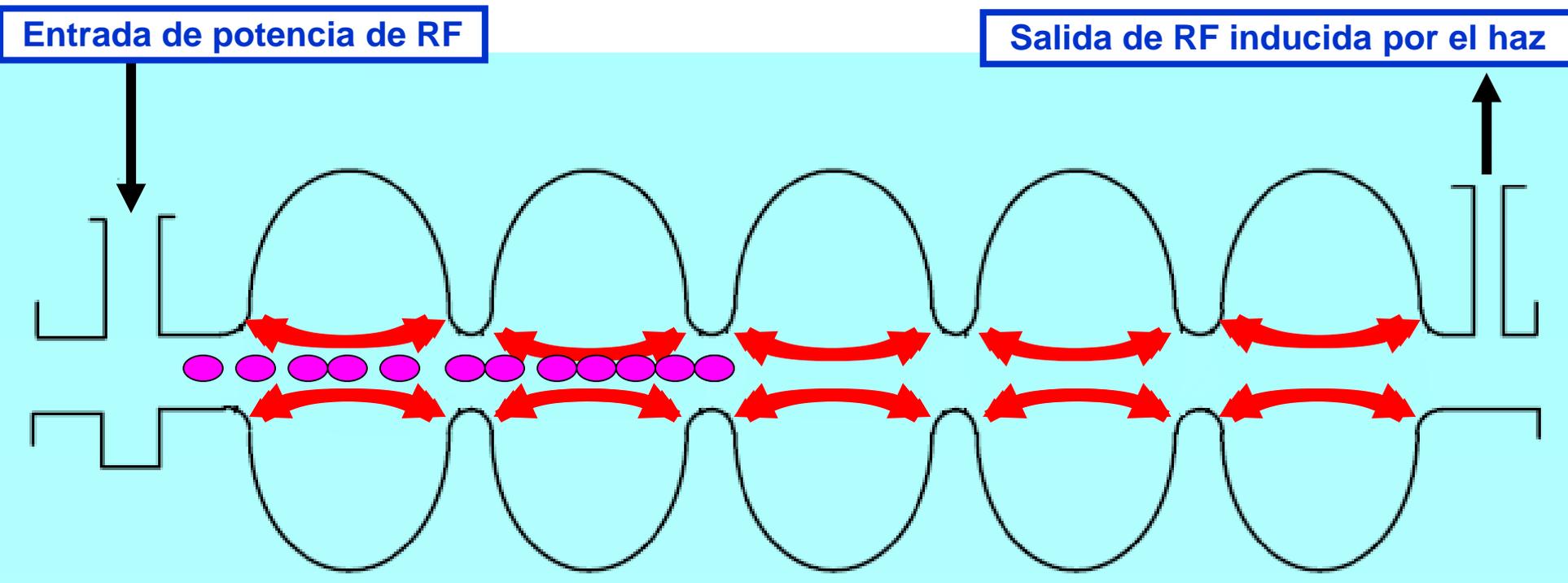


Cavidad superconductora RF  
de 9 células

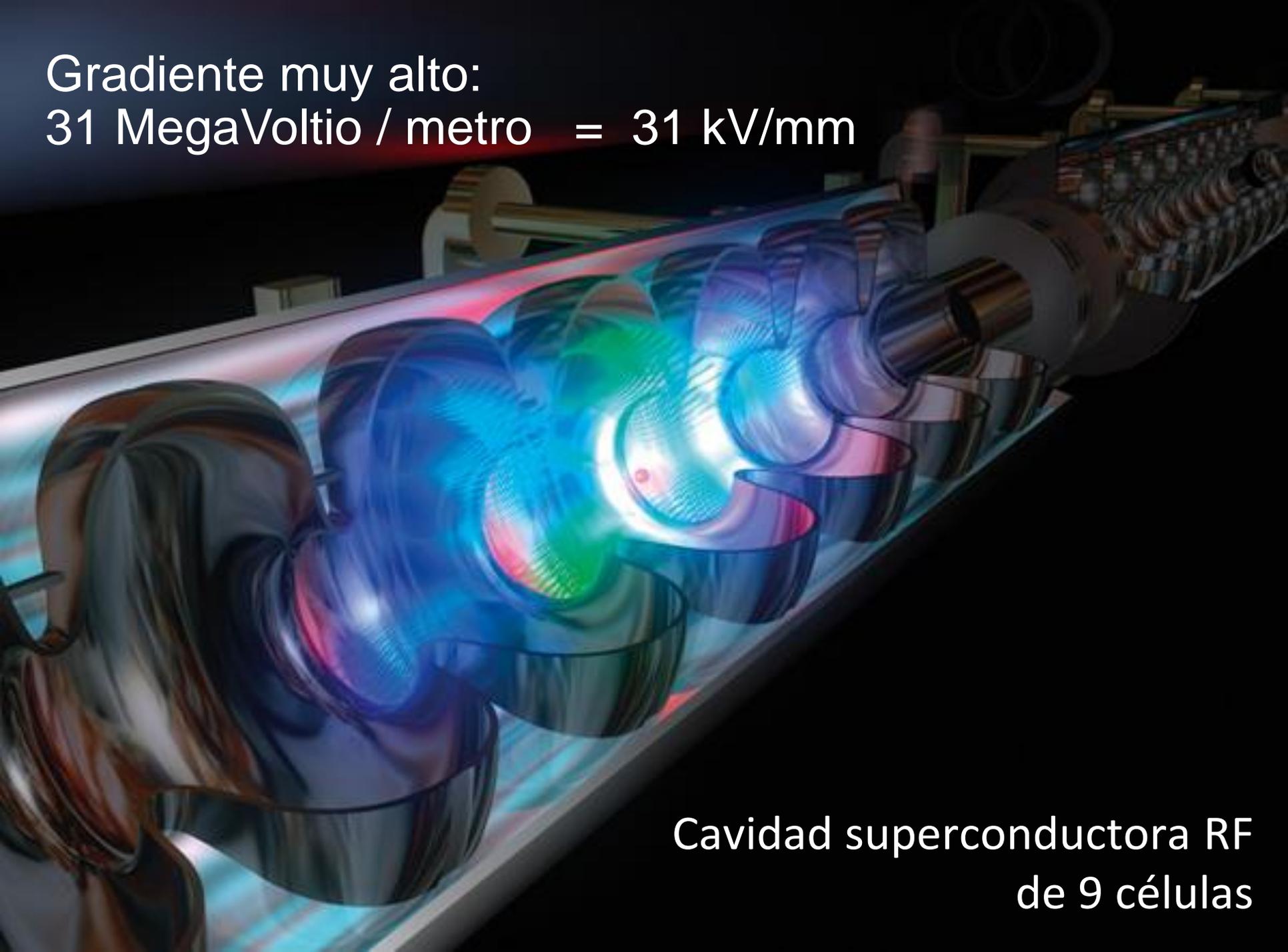


# Cavidades superconductoras de RF

- Campo eléctrico oscila con frecuencia natural de la cavidad.
- Dirección del campo eléctrico alterna de una célula a la siguiente.



Gradiente muy alto:  
31 MegaVoltio / metro = 31 kV/mm



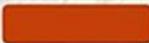
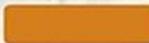
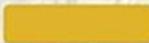
Cavidad superconductora RF  
de 9 células

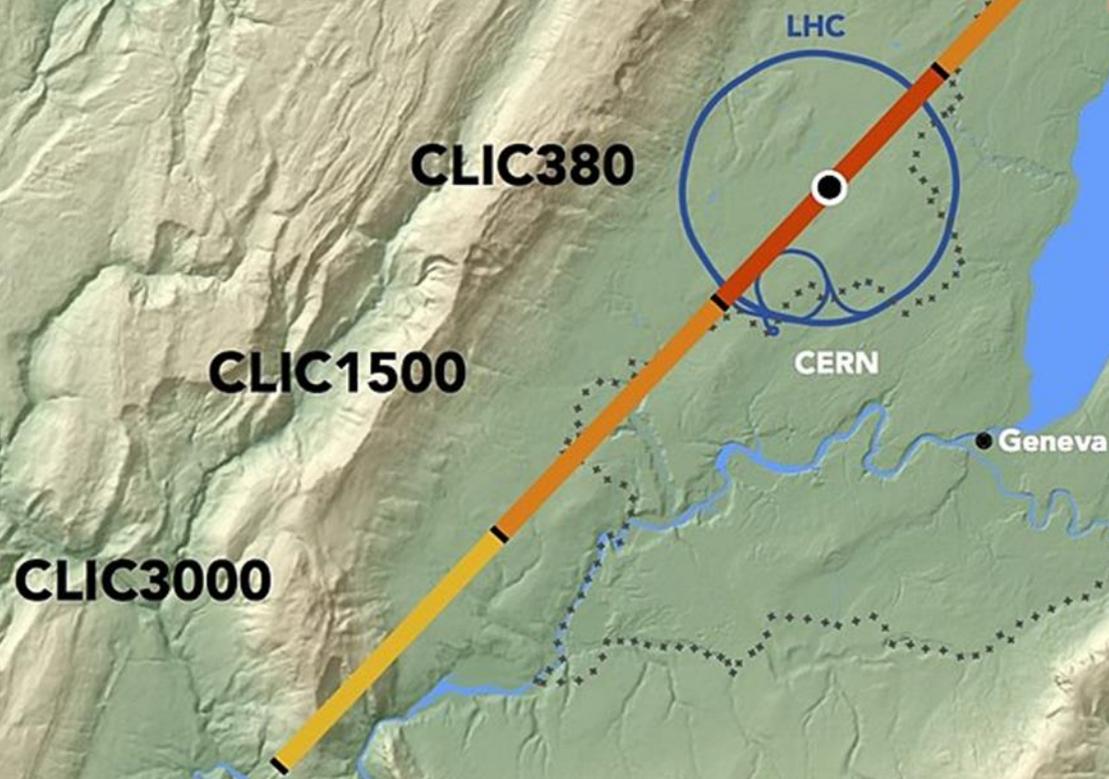
# Cavidades superconductoras

## Características:

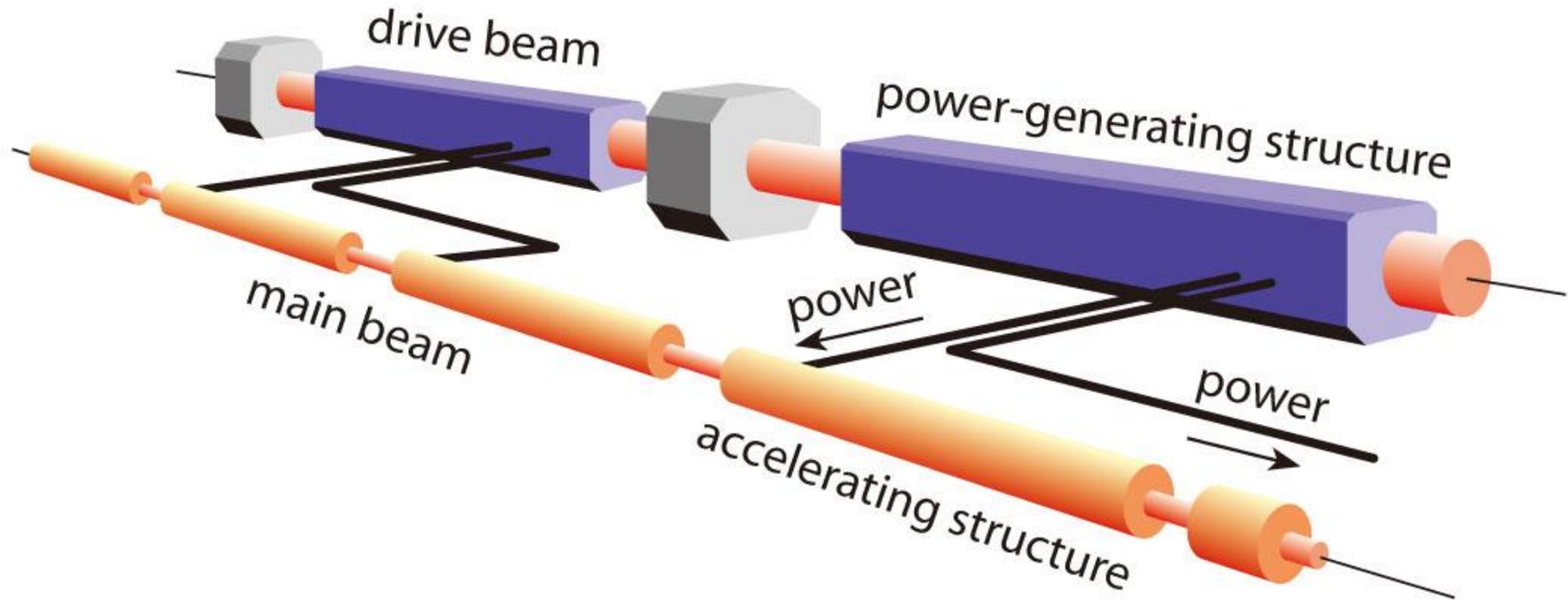
- Cavidades operan inmersas en He superfluido
- Cavidades se fabrican de Niobio (Nb) puro
- Las superficies de las cavidades tienen que ser perfectamente lisas y libres de contaminación
- El factor de calidad  $Q_0$  de estas cavidades es  $\sim 10^{10}$ 
  - Razón de energía almacenada / pérdida de energía por ciclo
  - Una campana de iglesia con  $Q_0 \sim 10^{10}$  continuaría sonando meses después de golpeada.
- La pérdida de energía de RF tan pequeña es lo que permite a las cavidades suministrar al haz de partículas la mayor parte (casi la totalidad) de la energía RF recibida.
  - En cavidades RF convencionales la mayor parte de la potencia RF recibida calienta el cobre de las paredes.

# Compact Linear Collider (CLIC)

-  380 GeV - 11.4 km (CLIC380)
-  1.5 TeV - 29.0 km (CLIC1500)
-  3.0 TeV - 50.1 km (CLIC3000)



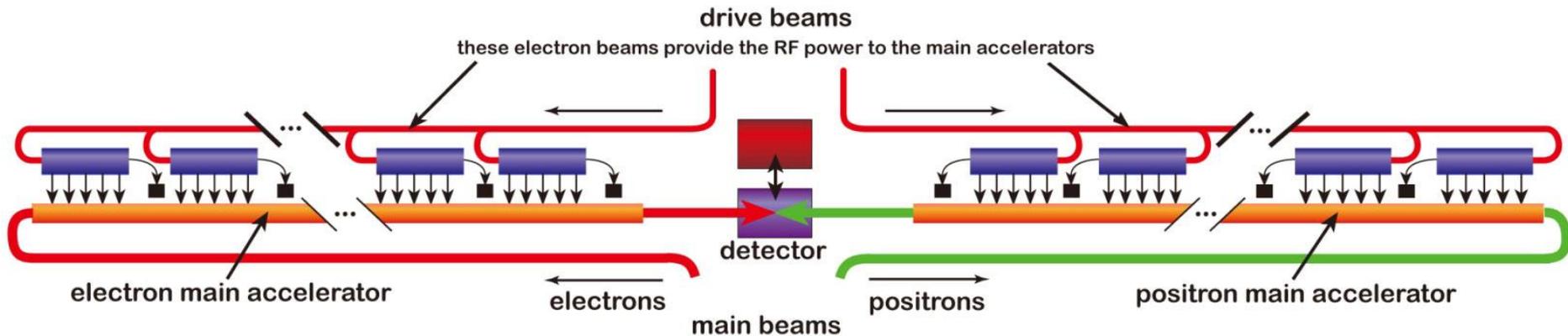
# CLIC – Compact Linear Collider –



El gradiente debe ser muy alto:

El reto... Lograr en CLIC gradiente de CLIC 100 MV/m, 20 veces mayor que con el LHC.

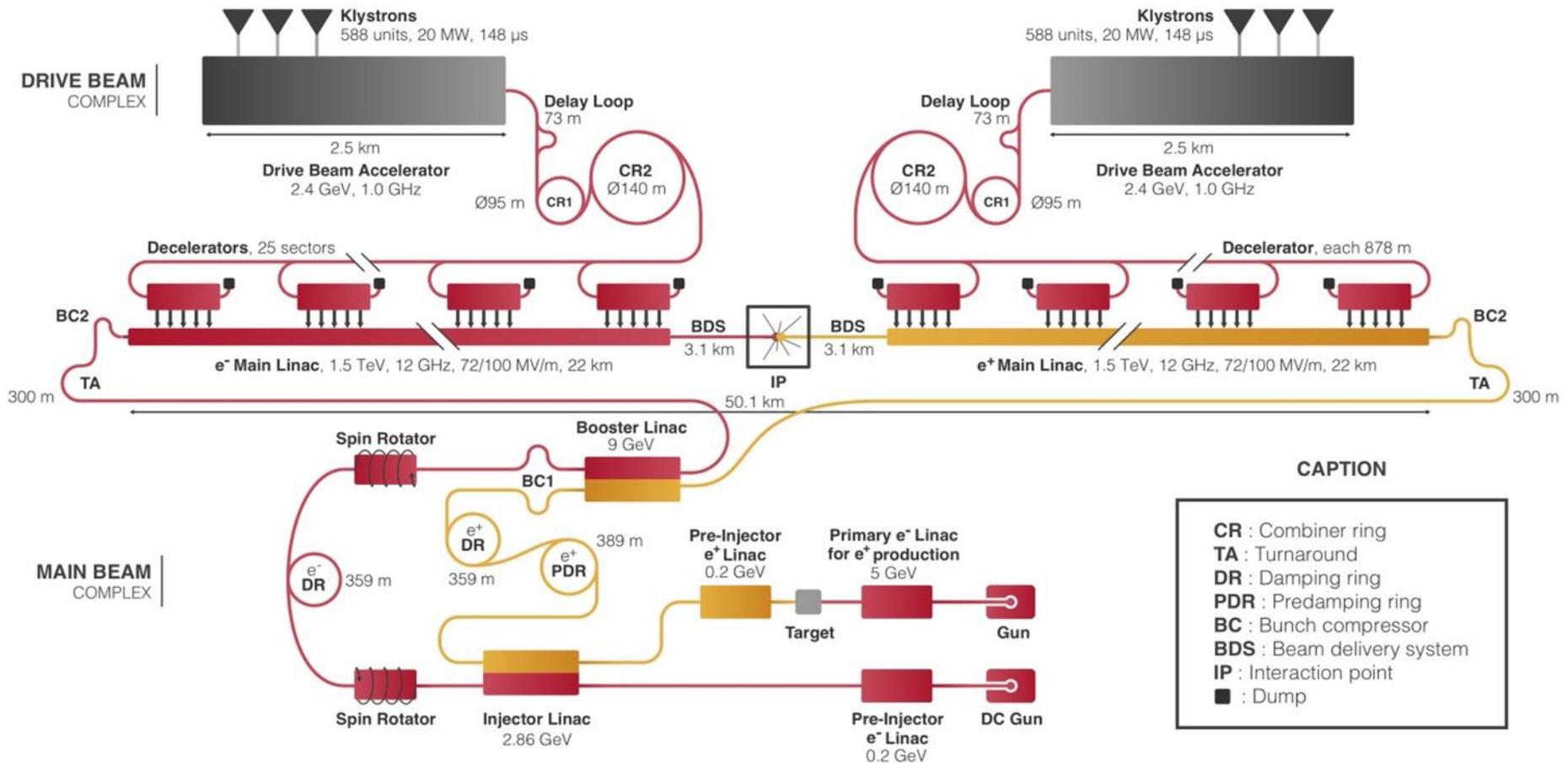
# CLIC – Compact Linear Collider –



El haz impulsor se desacelera en estructuras especiales de transferencia y extracción de energía (PETS), y la potencia de RF generada se transfiere al haz principal.

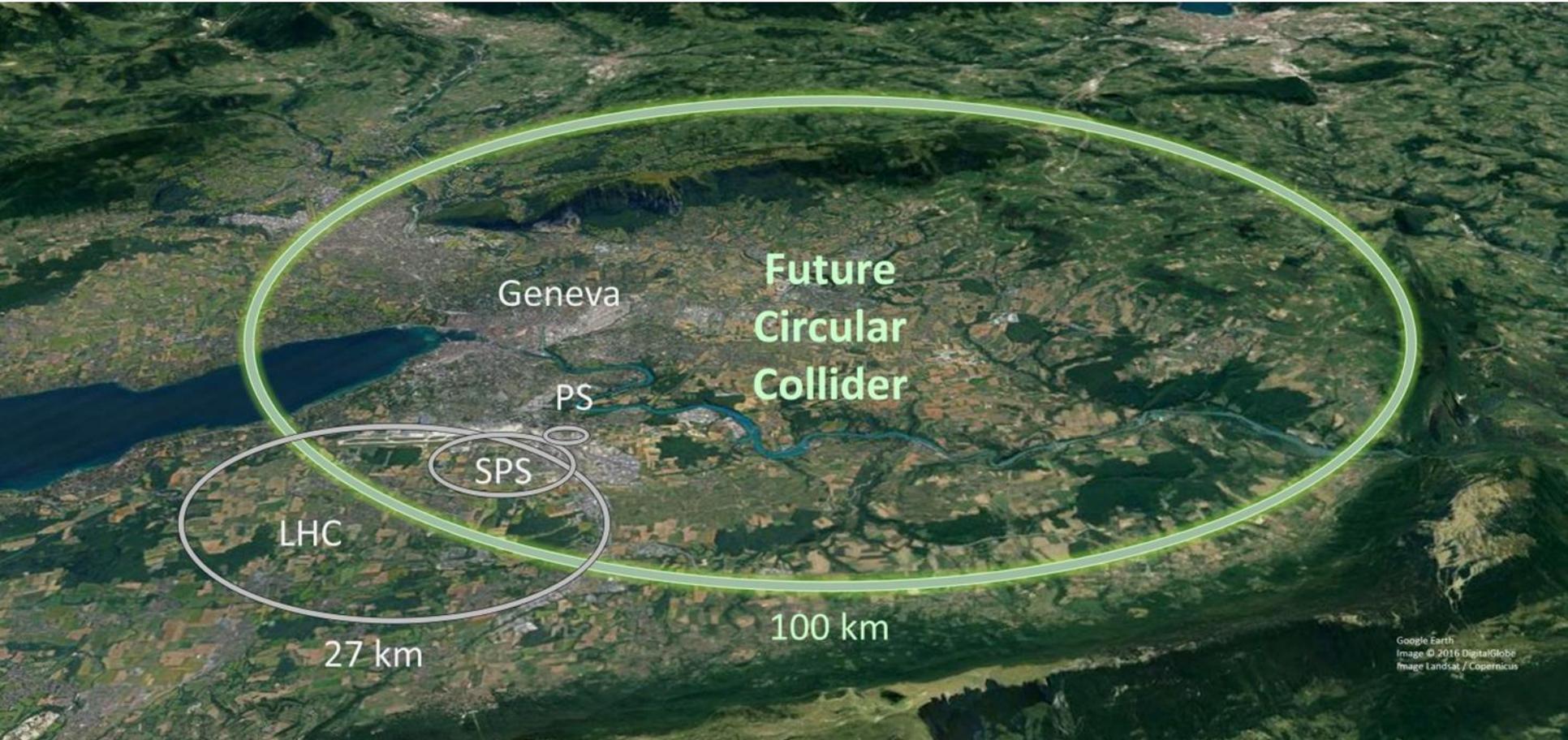
Esto conduce a un diseño de túnel muy simple sin ningún componente de RF activo (es decir, sin klystrons).

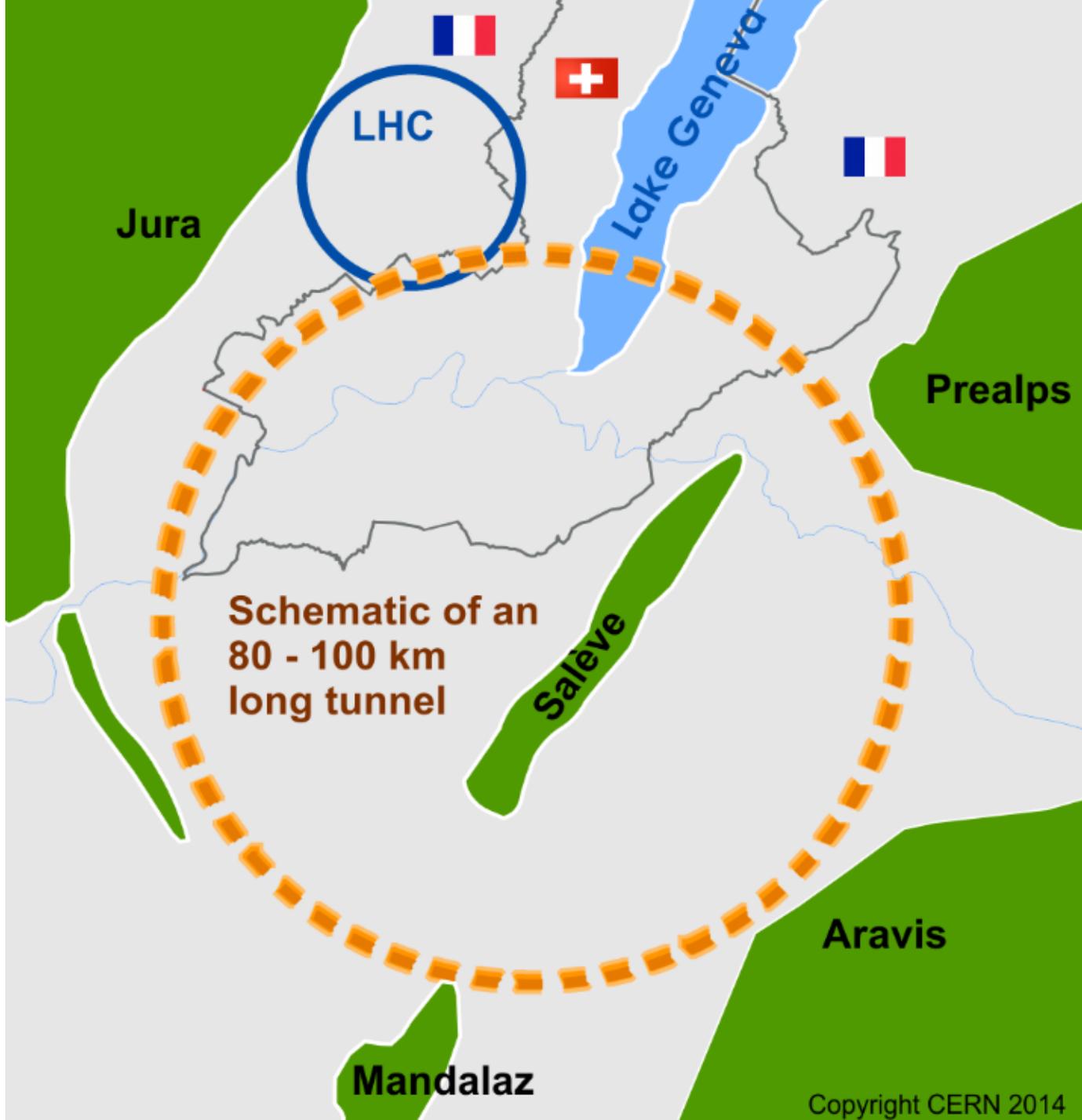
# CLIC – Compact Linear Collider –



*Nuevo proyecto:* Del CERN para el mundo

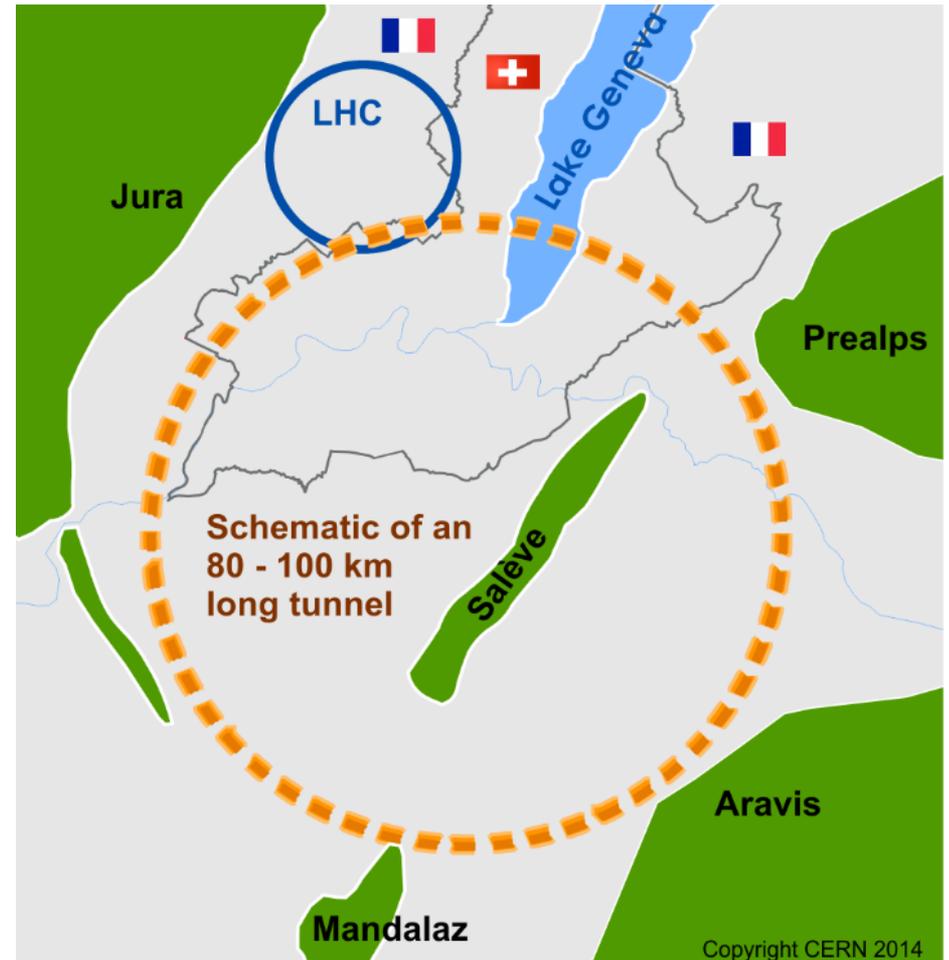
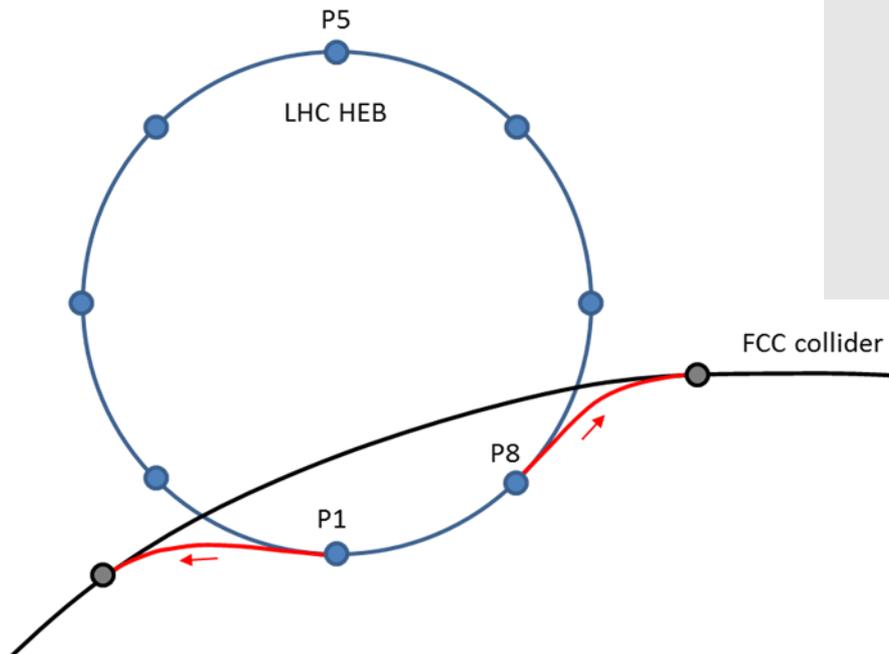
# Future Circular Collider





# Future Circular Collider

El LHC sería  
inyector para el FCC



# **Aceleradores Presente y Futuro**



**Fundamentos de  
Aceleradores y Colisionadores  
Hadrónicos y Leptónicos**

**Sincrotrón y  
Colisionadores Circulares**

**Colisionadores Lineales**

**Nuevos Desarrollos y  
proyectos futuros**

**Conclusiones**

# Proyectos en el futuro de los Colisionadores

## COLISIONADORES LINEALES:

- **ILC** (International Linear Collider):  $e^+e^-$ , energía cms de 500 GeV cms, no hay decision, Japón postpone decision.
- **CLIC** (Compact Linear Collider):  $e^+e^-$ , energía cms de 380 GeV - 3TeV, colaboración y desarrollo localizado en CERN.

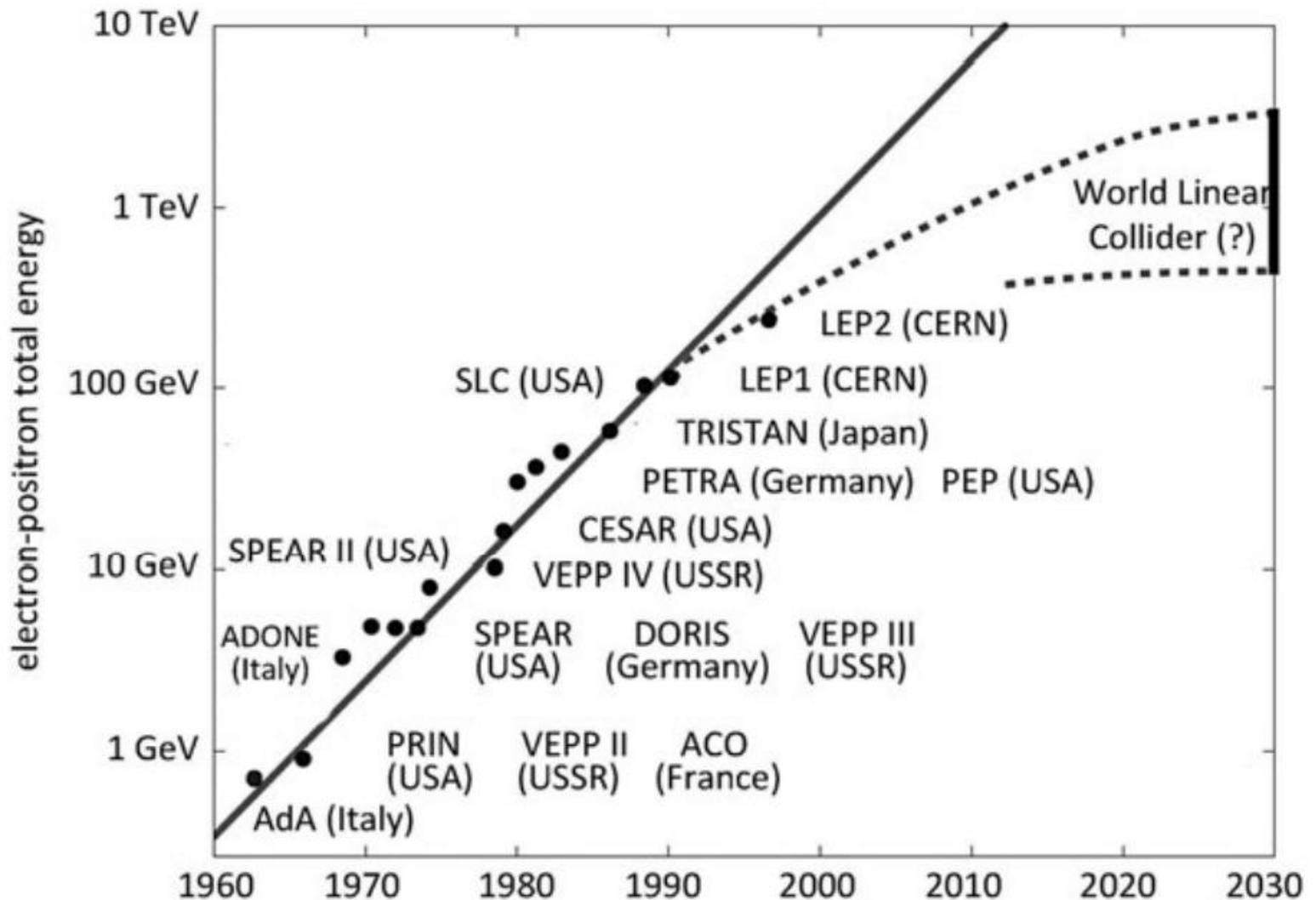
## COLISIONADORES CIRCULARES:

- **FCC** (Future Circular Collider)
  - FCC-hh: 100TeV proton-proton cms energy, ion operation possible
  - FCC-ee: Potential intermediate step 90-350 GeV lepton collider
  - FCC-he: Lepton-hadron option

## NUEVOS DESARROLLOS:

- **Muon Collider**, idea de colisionador de muones desde Fermilab, hoy como proyecto de muy baja prioridad.
- **Plasma Wakefield Acceleration** en colisionadores lineales desarrollos importantes para el futuro.

# Plot de Livingston para colisionadores leptónicos



## Pensamiento de **Victor Weisskopf**

Director General de CERN (1961 – 1965)

*“There are three kinds of physicists, namely the machine builders, the experimental physicists, and the theoretical physicists. The machine builders are the most important ones, because if they were not there, we would not get into this small-scale region of space. If we compare this with the discovery of America, the machine builders correspond to captains and ship builders who really developed the techniques at that time. The experimentalists were those fellows on the ships who sailed to the other side of the world and then landed on the new islands and wrote down what they saw. The theoretical physicists are those who stayed behind in Madrid and told Columbus that he was going to land in India.”*

---

# Bibliografía para consulta

**Klaus Wille**, “The Physics of Particle Accelerators”, Oxford University Press, Oxford, 2005. ISBN 0-19-850549-3.

**Edmund Wilson**, “An Introduction to Particle Accelerators”, Oxford University Press, Oxford, 2006. ISBN 0-19-850829-8.

**CERN Accelerator School:**

<http://www.cern.ch/Schools/CAS/>

**USPAS – US Particle Accelerator School 2018,**

<http://uspas.fnal.gov/materials/materials-books.shtml>

**CERN COURIER: ACCELERATORS –**

Reporting on particle accelerators: development and applications.

<https://cerncourier.com/accelerators/>

**Accelerators and Beams – Tools of Discovery and Innovation**, Division of Physics of Beams of the American Physical Society, APS. <https://www.aps.org/units/dpb/>

**Accelerators and Detectors – Physics World**, a collection of online, digital and print information services for the global scientific community, IOP.

<https://physicsworld.com/c/particle-nuclear/accelerators-detectors/>



**¡Gracias  
por su atención!**