

Introducción a la física de aceleradores

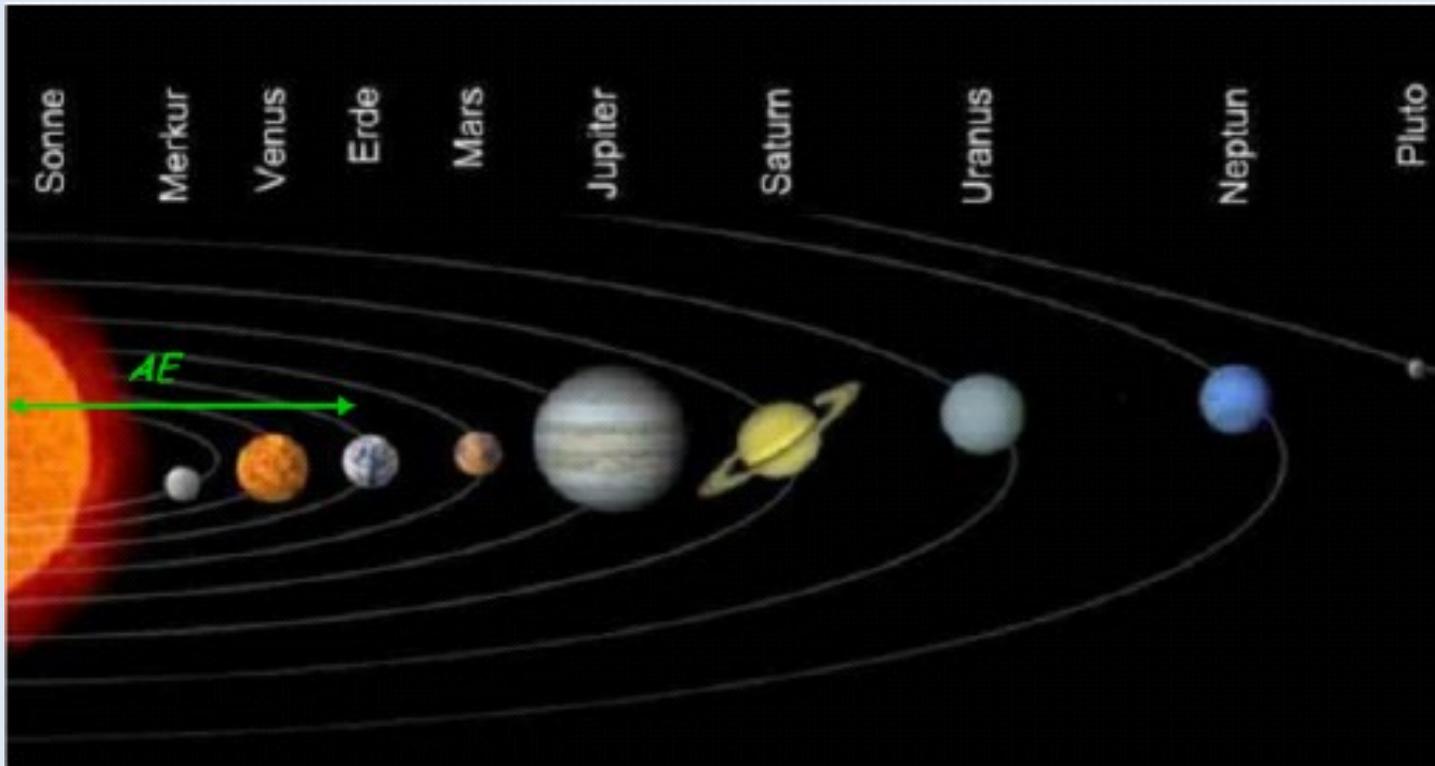
High School Teachers at CERN Program (HST)

Ginebra, 27 de Junio de 2010

Javier Barranco García (ABP/CC3)

¿Qué hace un acelerador de partículas?

Los actuales aceleradores de altas energías pueden acelerar partículas, manteniéndolas confinadas en milímetros alrededor de una trayectoria de referencia, transportándolas varias veces el tamaño del sistema solar.



Principio básico de funcionamiento de un acelerador de partículas

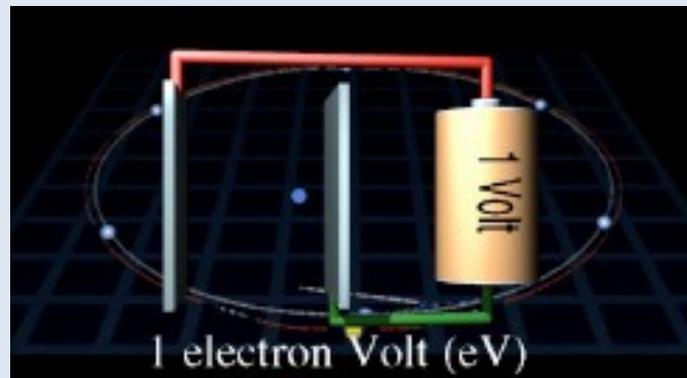
Las **dos** principales funciones de un acelerador son:

- **Incrementar** la energía de la partícula
- **Guiar** y **focalizar** las partículas a la largo de una trayectoria definida.

La ecuación de **Lorentz**,

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} = \vec{F}_E + \vec{F}_B$$

De la ecuación anterior se desprende que necesitamos un **campo eléctrico** para **acelerar** las partículas. La unidad de energía es electrón-voltio (1 eV es la energía ganada por un electrón al atravesar una diferencia de potencial de 1 voltio).

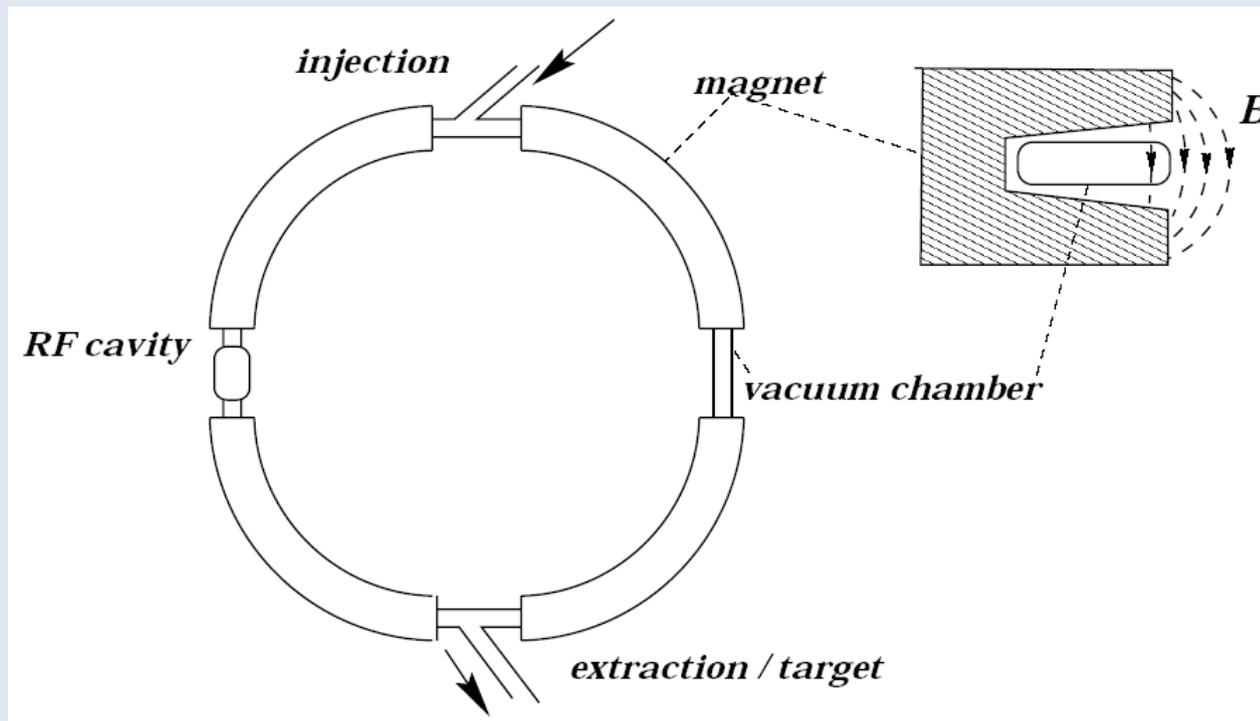


De la misma manera se puede concluir que el **campo magnético** es el encargado de **guiar** las partículas a lo largo del acelerador.

Esquema básico de un acelerador

A grandes rasgos un acelerador consta de:

- Elementos a través de los que **circulan** las partículas.(cámara de vacío)
- Elementos que **aceleran** las partículas (cavidades de radiofrecuencia)
- Elementos que **guían** las partículas (dipolos, cuadrupolos,etc.)
- Elementos que **miden** las partículas (monitores de posición, etc.)

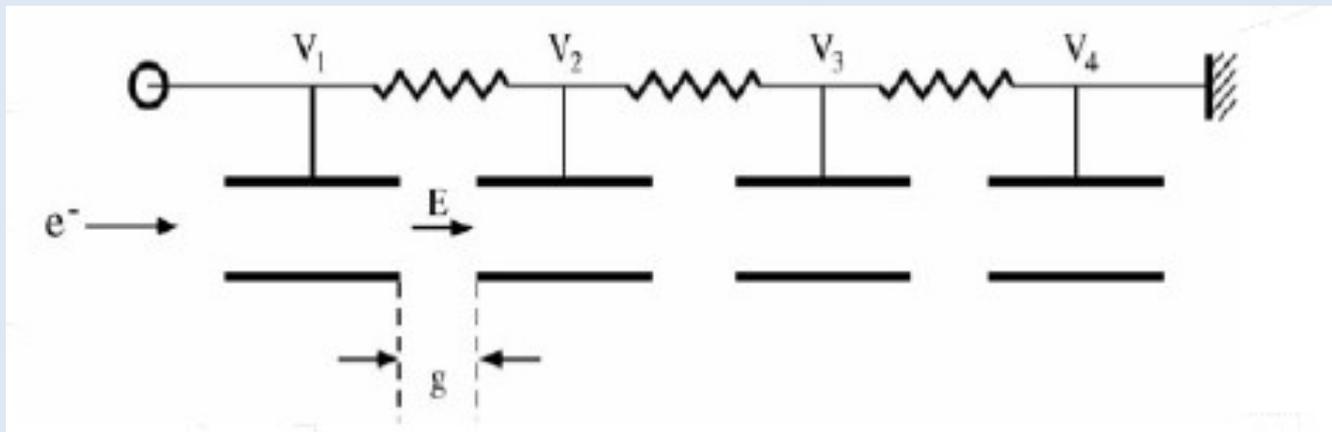


¿Cómo aceleramos? (1/4)

Como hemos visto las partículas se aceleran mediante campo eléctrico. Existen dos formas: corriente continua (DC) o corriente alterna (RF).

Corriente Continua

- Método más sencillo de aceleración.
- En cada pasaje la partícula incrementa su energía $\rightarrow \Delta E = qV$
- Es posible acelerar en varias etapas, aunque con limitación de "breakdown" en 10 MV.
- Este procedimiento es utilizado en las primeras etapas de la aceleración. (Fuente de iones).



Esquema de aceleración mediante corriente continua. La partícula es acelerada únicamente en los espacios entre tubos.

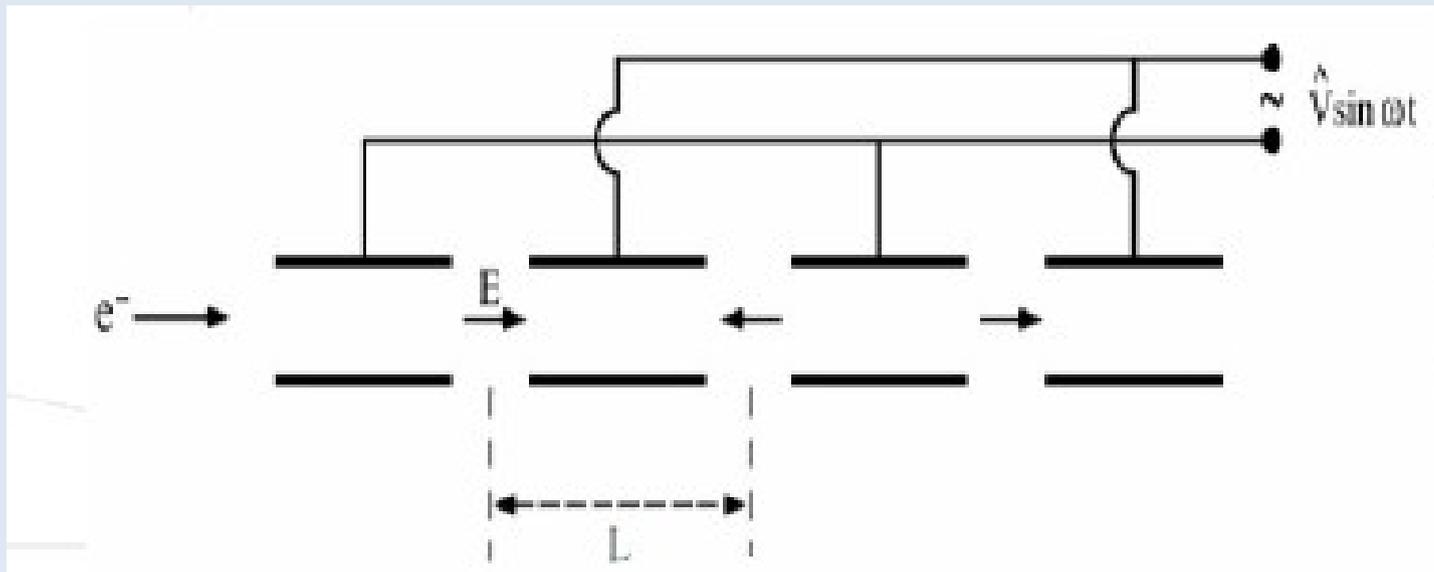
¿Cómo aceleramos? (2/4)

Corriente Alterna

- En este caso el campo eléctrico invierte la polaridad en cada semiperiodo.
- La partícula debe llegar en el momento en que el campo tiene el sentido correcto para la aceleración.
 - Esto implica que se debe cumplir la condición de sincronismo

$$T_{\text{part}} = \frac{1}{2} T_{\text{RF}}$$

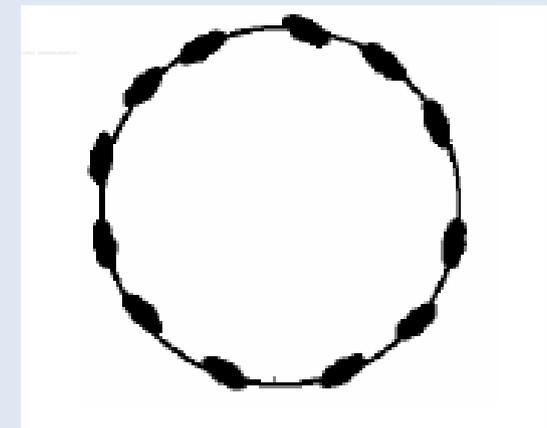
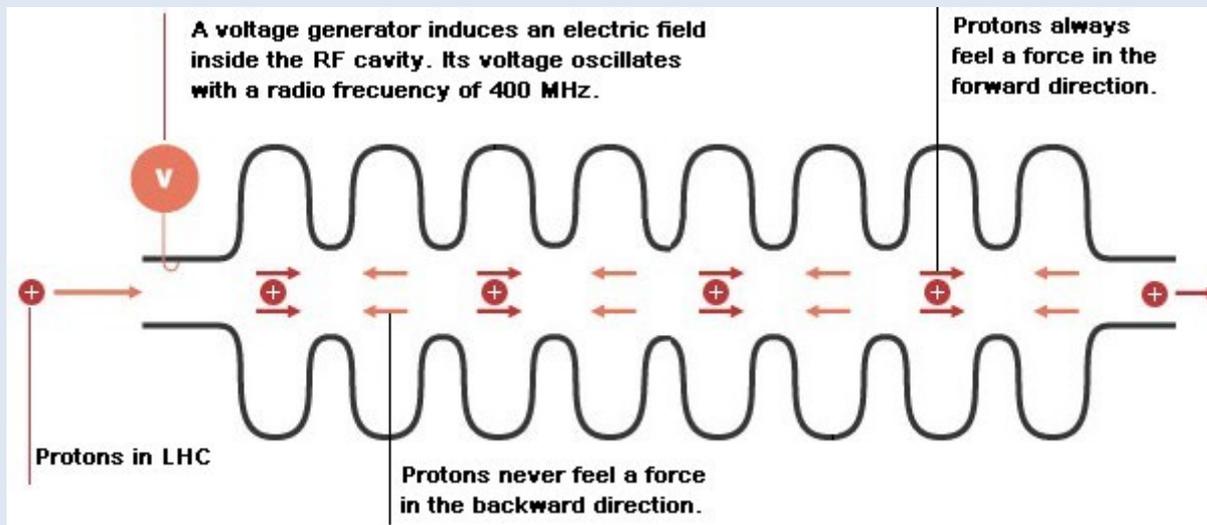
$$L = \frac{1}{2} v T$$



¿Cómo aceleramos? (3/4)

Cavidades de radio-frecuencia

- En este caso la energía queda almacenada resonando en la cavidad.
- La potencia es producida mediante generadores RF (“klystrons”) e inyectada en la cavidad. La frecuencia de resonancia variará en función de la energía del haz.
- En este caso es necesario que las partículas estén agrupadas en paquetes (“bunches”). El número armónico determina el número de paquetes.



Haz distribuidos en paquetes alrededor del acelerador.

Esquema de funcionamiento de una cavidad resonante

¿Cómo aceleramos? (4/4)



Módulo de una cavidad de RF del LHC

Cavidad de RF del ILC



El sincrotrón

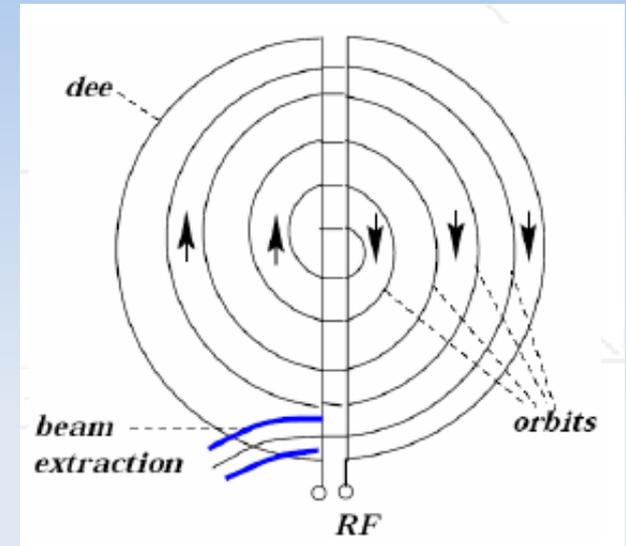
- Los Sincrotrones se utilizan en la mayoría de experimentos de física de altas energías (HEP). Ejemplos son LHC, Tevatron, HERA, LEP, SppS, CERN PS y también en fuentes de luz síncrotra.
- La aceleración se realiza mediante cavidades de radio-frecuencia.
- La frecuencia de las cavidades de RF debe seguir la frecuencia de la partícula a medida que se incrementa la energía.

Ejemplo condición de sincronismo

Otros aceleradores

Ciclotrón

- Campo magnético constante
- Constante RF en el espacio entre imanes para incrementar la energía.
- A velocidades relativistas, RF puede perder sincronismo.
- Más simple que el sincrotrón utilizado normalmente en aceleradores médico.



Sincro-ciclotrón

- Ciclotrón con RF fase variante.

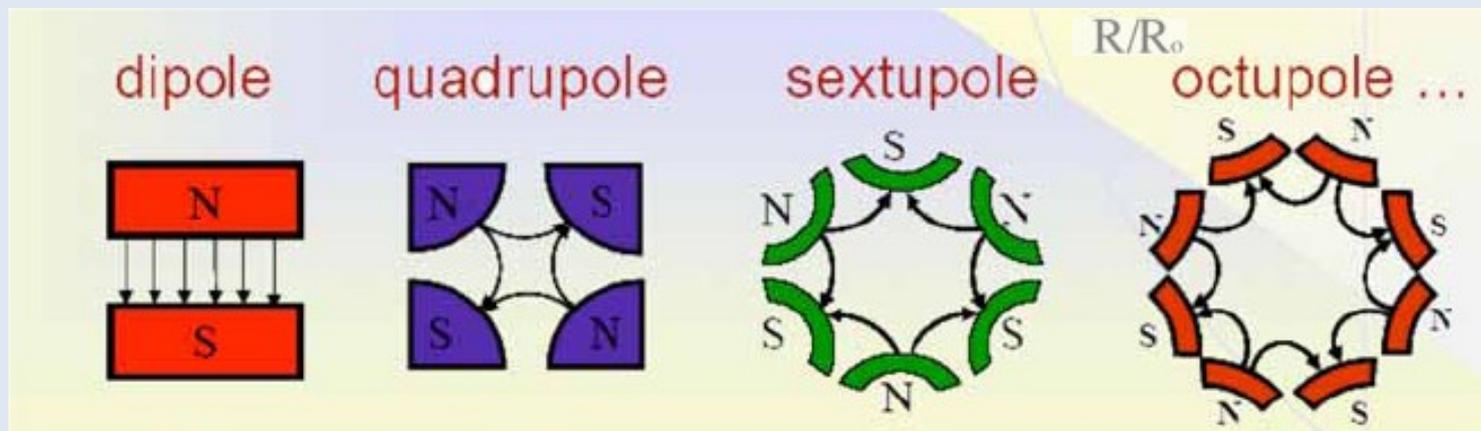
Betatron

- Aceleración mediante campo magnético dependiente del tiempo.

¿Cómo guiamos? (1/3)

Para guiar a las partículas nos valemos de **imanes**. Según el número de polos tendrán diferente función. Si consideramos que el número de polos viene dado por 2^n tenemos,

- $n = 1 \rightarrow$ **Dipolo**, cuya función es curvar la trayectoria en un plano determinado (normalmente horizontal)
- $n = 2 \rightarrow$ **Cuadrupolo**, cuya función es focalizar el haz y evitar que diverja.
- $n = 3 \rightarrow$ **Sextupolo**, cuya función corregir la cromaticidad, es decir corrige a las partículas con energías diferentes a la nominal.
- $n > 3 \rightarrow$ **Multipolos**, correcciones de la óptica no lineales.



¿Cómo guiamos? (2/3)



Dipolo normal conductor $\rightarrow B_{\max} \sim 1.8 \text{ T}$



Cuadrupolo y cámara de vacío

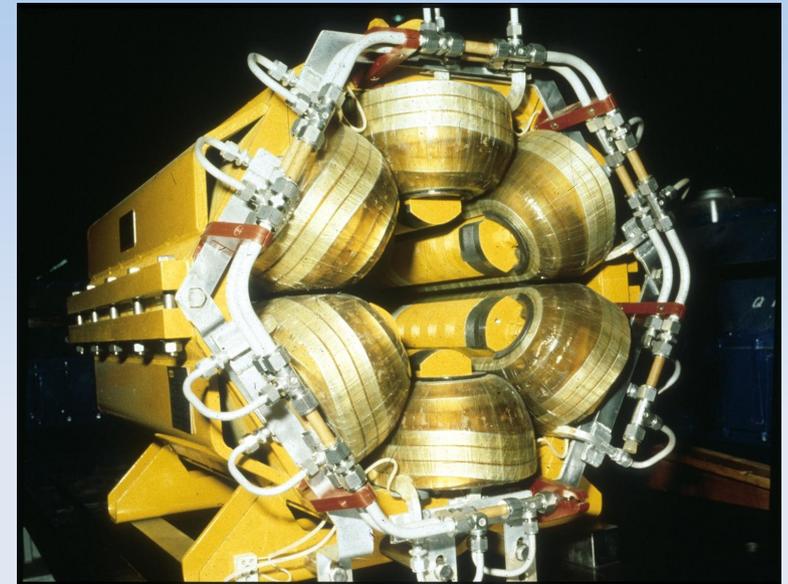
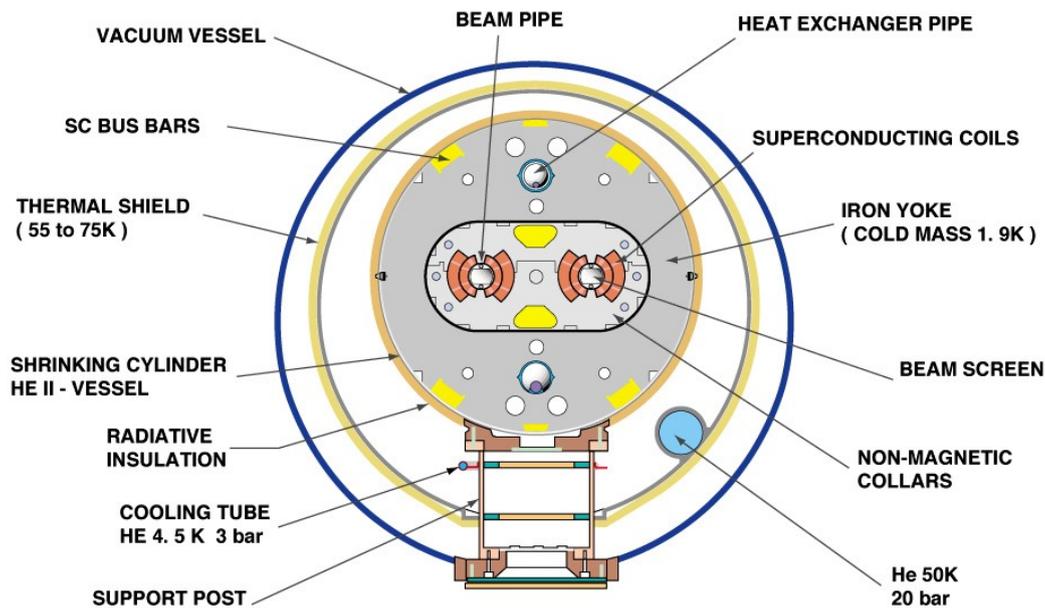


LHC Dipolo superconductor $\rightarrow B_{\max} \sim 8 \text{ T}$

¿Cómo guiamos? (3/3)

Sextupolo del LEP (Large Electron Positron Collider)

CROSS SECTION OF LHC DIPOLE

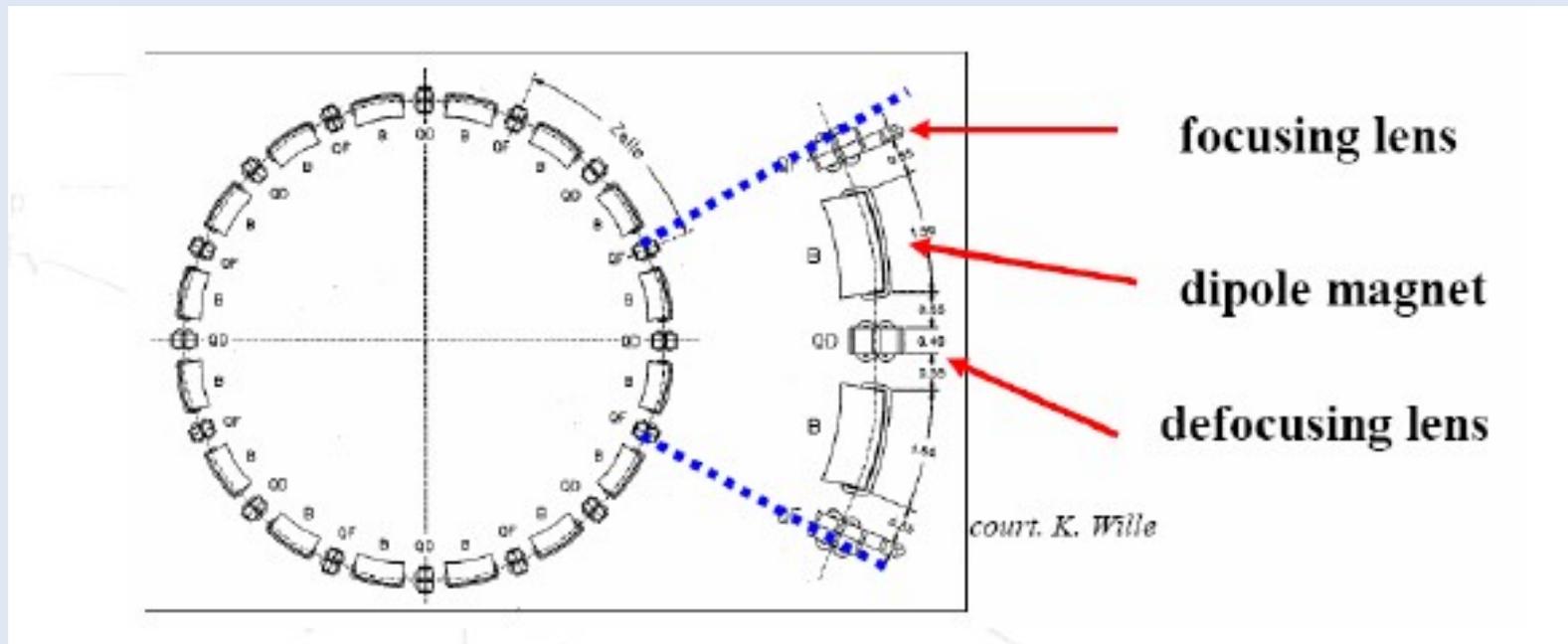


Esquema detallado de la sección transversal de un dipolo superconductor del LHC instalado en su correspondiente criostato.

Todo junto: El "lattice"

La configuración mas sencilla y estable está basada en celdas **FODO** (**F**ocalizador, **D**ipolo, **D**efocalizador, **D**ipolo).

La estructura formada por todos los imanes del acelerador es conocida como "lattice".



Esquema básico de un sincrotrón basado en celdas FODO

Ecuación de Hill

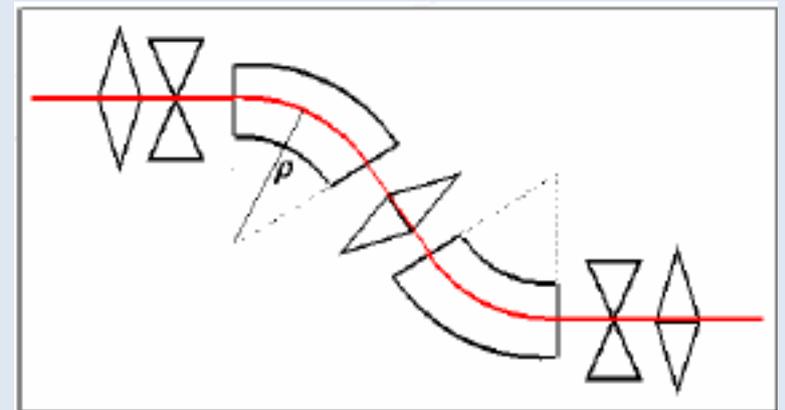
El movimiento de una partícula a través de los elementos del acelerador vienen descrita por la ecuación de Hill.

$$x'' + K(s)x = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{p_0}$$

Resolviendo para diferentes $K(s)$ se puede calcular la matrices de transferencia para cada elemento. El acelerador completo se calcula mediante el producto de las diferentes matrices de cada elemento.

$$M_{tot} = M_{dipole} M_D M_{dipole} M_D \dots$$

¿Qué forman tienen estas matrices?



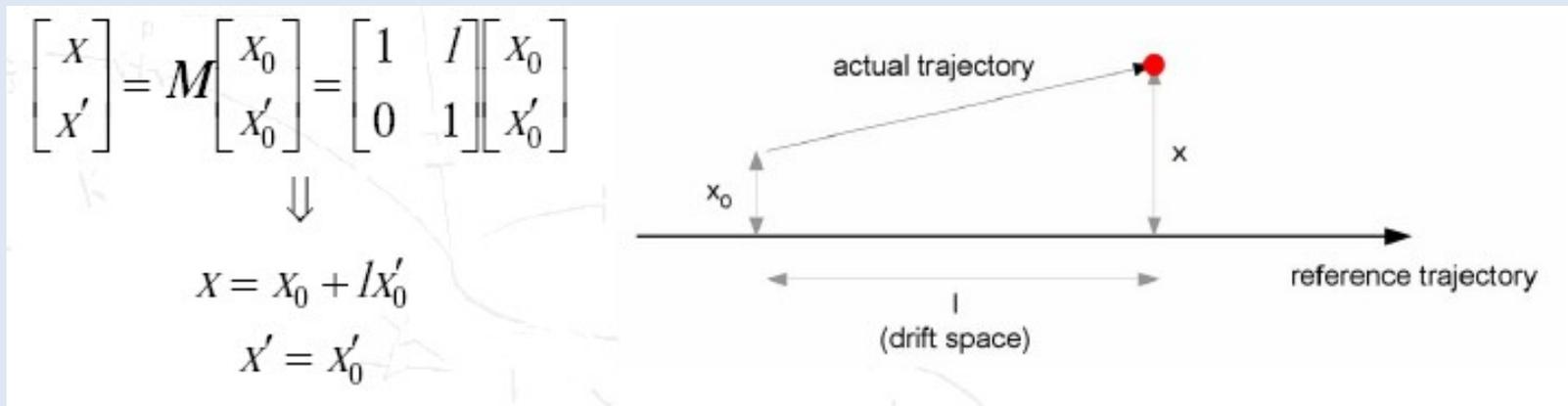
Espacio libre

La matriz de transferencia más simple es aquella que describe el movimiento de una partícula a través de un espacio libre de campo.

Siendo $L = \text{Longitud del espacio}$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

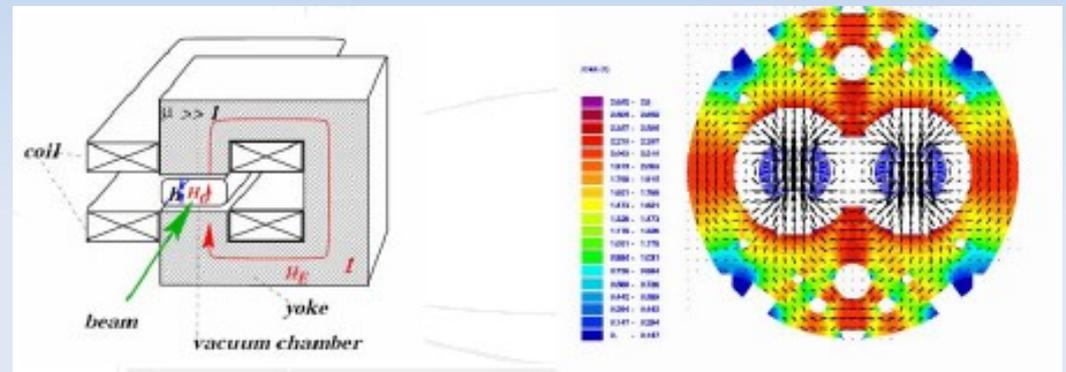
En este caso únicamente cambia la posición pero no la divergencia.



Dipolo

Los imanes dipolares proveen un campo vertical uniforme que curva la trayectoria.

En los imanes del LHC (2 en 1), cada haz verá el campo en un sentido diferente.



$$\frac{1}{\rho} = \frac{eB}{p} \Leftrightarrow \frac{1}{\rho} [m^{-1}] = 0.3 \frac{B[T]}{p[GeV/c]}$$

Dipolo sector

$$M = \begin{bmatrix} \cos \frac{l}{\rho} & \rho \sin \frac{l}{\rho} \\ \frac{1}{\rho} \sin \frac{l}{\rho} & \cos \frac{l}{\rho} \end{bmatrix}$$

Dipolo rectangular

$$M = \begin{bmatrix} 1 & \rho \sin \frac{l}{\rho} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Cuadrupolo

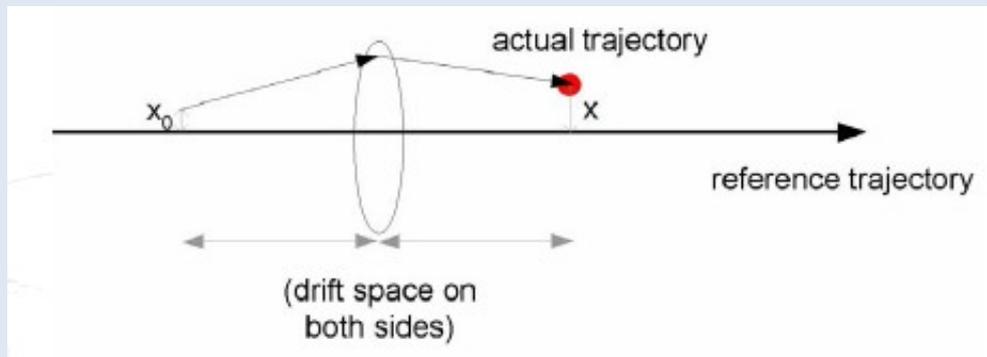
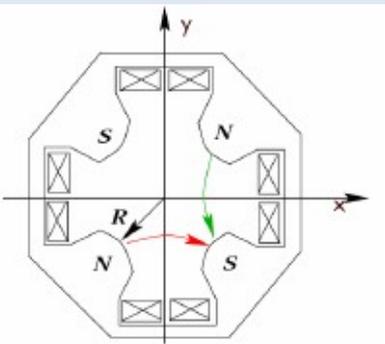
Matriz de transferencia de un cuadrupolo.

$$M = \begin{bmatrix} \cos(l\sqrt{k}) & \frac{1}{\sqrt{k}} \sin(l\sqrt{k}) \\ -\sqrt{k} \sin(l\sqrt{k}) & \cos(l\sqrt{k}) \end{bmatrix}$$

Matriz de transferencia en el caso de aproximación de lentes delgadas..

$1/f$ es la distancia focal. Si < 0 focaliza si > 0 defocaliza en el plano de estudio.

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$



$$X = X_0$$

$$X' = X'_0 - \frac{1}{f} X_0$$

Dinámica Transversal (1/2)

La solución general de la ecuación de Hill \rightarrow oscilador cuasi-harmónico

$$x'' + K(s)x = 0$$

\Downarrow

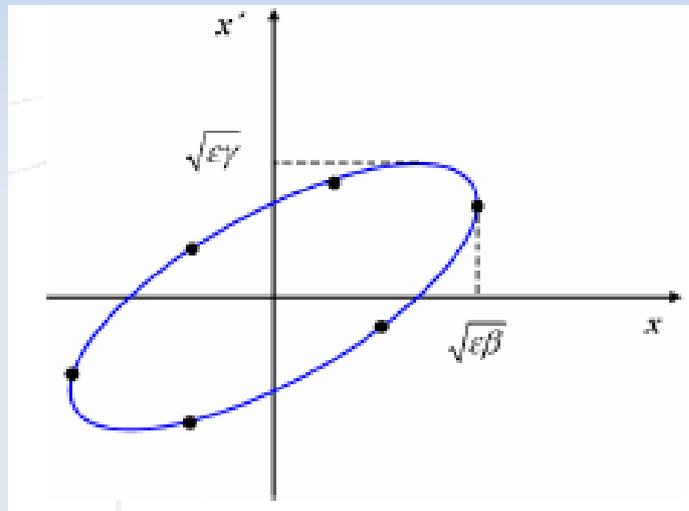
$$x(s) = \sqrt{\varepsilon\beta(s)} \sin(\phi(s) + \phi_0), \quad \phi(s) = \int_{s_0}^s \frac{dt}{\beta}$$

Para aceleradores circulares donde se cumplen condiciones periódicas es posible (**Teorema de Floquet**) definir los llamados "Parámetros Twiss",

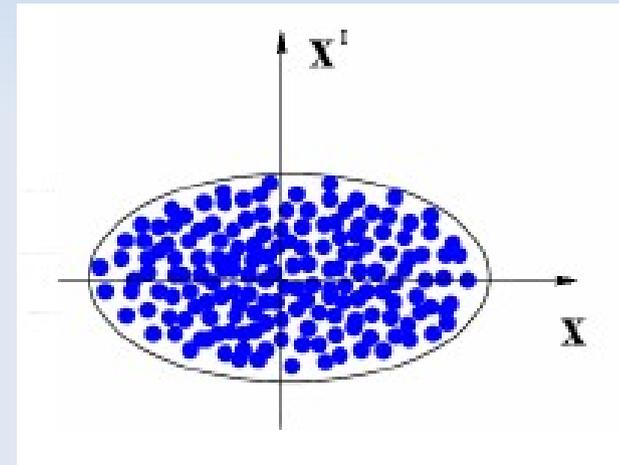
$$\mathbf{M}_s^{s+L}(s) = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cos \mu + \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ -\gamma & -\alpha \end{bmatrix} \sin \mu = \mathbf{I}(s) \cos \mu + \mathbf{J}(s) \sin \mu$$

Dinámica Transversal (2/2)

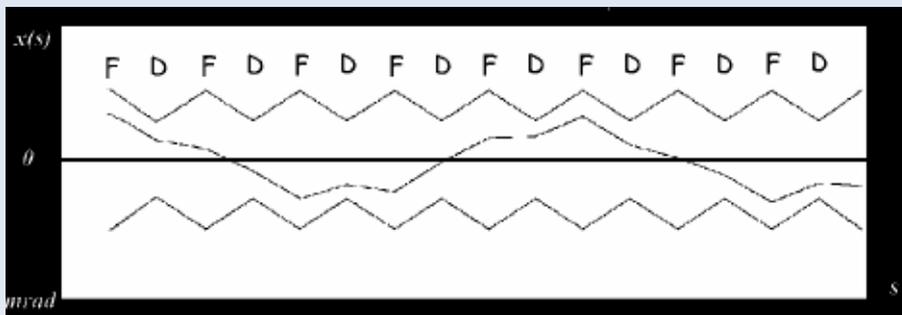
El movimiento de la partícula se estudia en el “*diagrama de estados de fase*” (eligiendo correctamente las variables aparecen invariantes, como el área de la **elipse descrita** o **emitancia**, que facilitan los cálculos)



$$\text{area} = \pi\epsilon = \text{constant}$$



Cada partícula describirá una elipse distinta dependiendo de su invariante o emitancia. La orientación de la elipse dependerá de cada elemento del lattice.

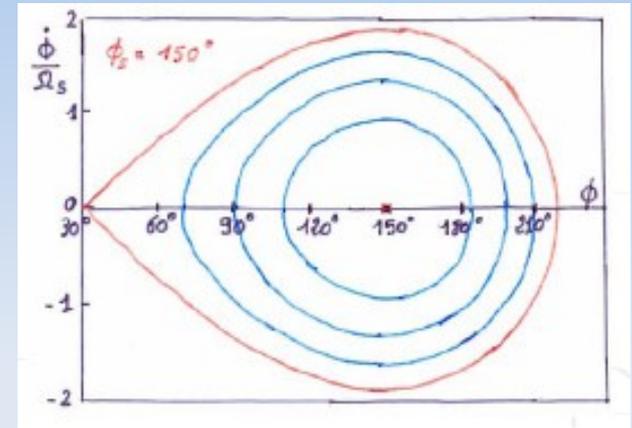


Dinámica Longitudinal

Se considera una partícula llamada "en sincronismo", alrededor de la cual el resto realiza oscilaciones llamadas "sincrotronas".

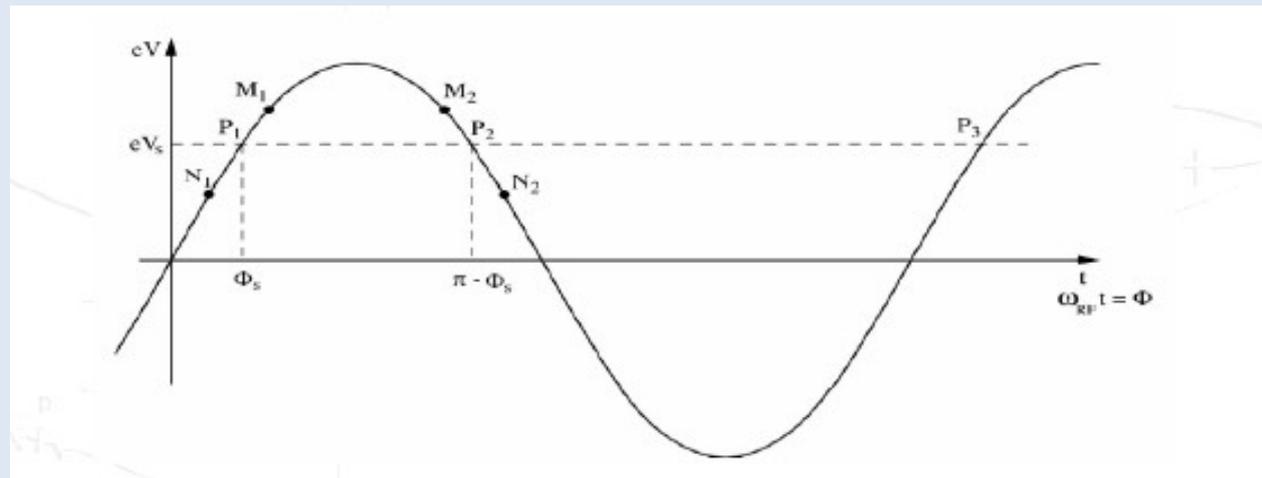
- Encima de transición
- Debajo de transición

Concepto muy importante en sincrotrones donde las partículas se encuentran agrupadas en paquetes donde siempre existen partículas diferentes energías.



$$\ddot{\phi} + \Omega_s^2 (\phi - \phi_s) = 0,$$

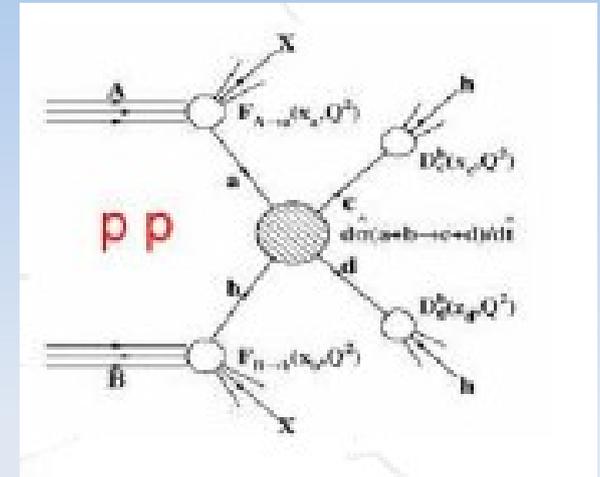
$$\Omega_s^2 = \frac{h\eta\omega_{rs} e\hat{V} \cos \phi_s}{2\pi R_s p_s}$$



¿Qué partículas colisionar? (1/2)

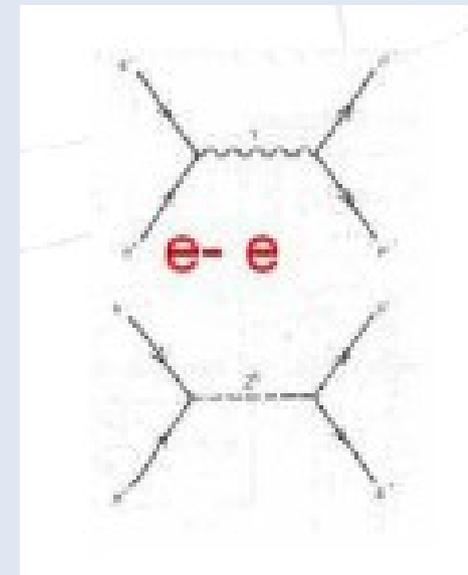
Colisiones de Hadrones (partículas compuestas)

- Mezcla de quarks, anti-quarks, gluones (diferentes procesos)
- Espectro de energías mayor
- Rango mayor de posibles descubrimientos
- Aceleradores circulares (LHC)



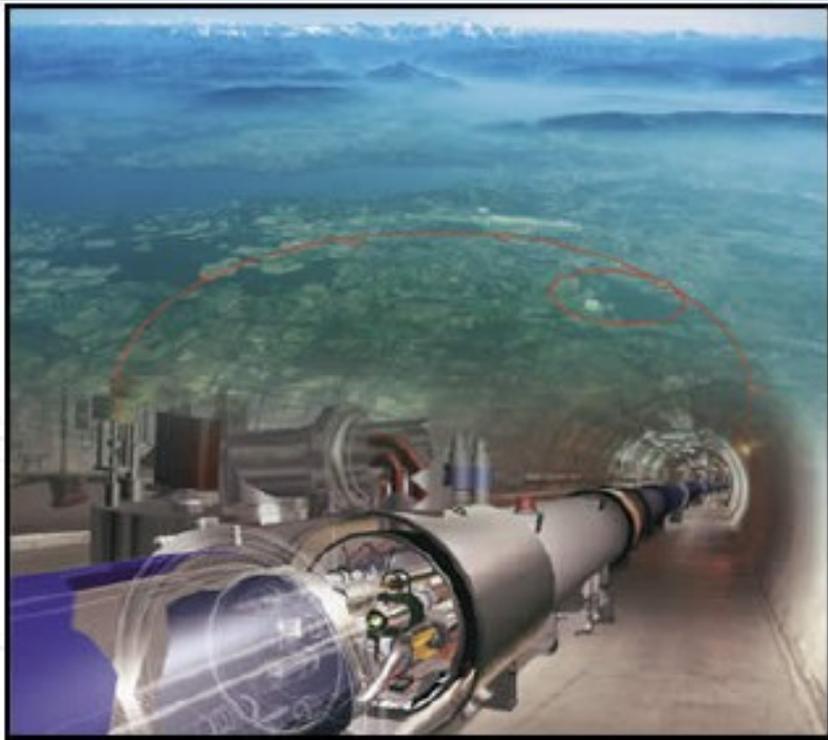
Colisiones de Leptones (partículas elementales)

- Procesos bien conocidos
- Energía del proceso bien definida
- Permiten búsquedas mas precisas
- Aceleradores lineales (CLIC, ILC)



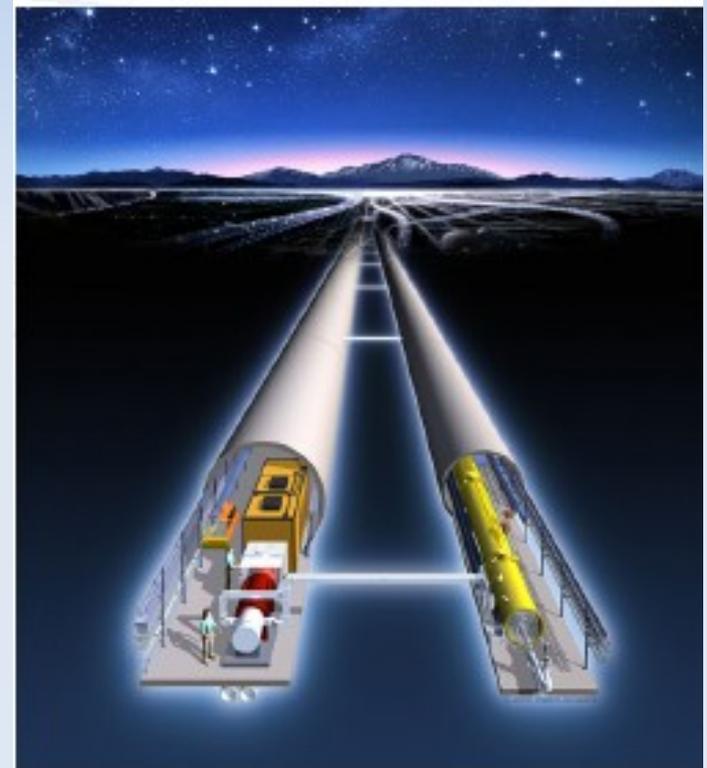
¿Qué partículas colisionar? (2/2)

Descubrimiento



SppS/LHC

Precisión



LEP/ILC/CLIC

Algunos hitos de la historia de los Colisionadores

- **CERN ISR:** **protón-protón** a 64 GeV (1971-1984)

Primer colisionador de hadrones

- **CERN SppS:** **protón-antiprotón** a 620 GeV (1981-1990)

Descubrimiento de los bosones W (81 GeV) y Z(91 GeV)

- **Fermilab Tevatron:** **protón-antiprotón** a 1.96 TeV (1987-actualidad)

Descubrimiento del Top Quark (172 GeV)

- **CERN LHC:** **protón-protón** 7 TeV inicial, 14 TeV diseño (2009-actualidad)

Entre otros descubrimiento del bosón de Higgs, Supersimetría, Dimensiones extras, ...

Una lista más completa, incluyendo no sólo sincrotrones puede encontrarse en,

http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_accelerators_in_particle_physics

Complejo de aceleradores del CERN

CERN

Lago Lemán

Jura

LHC

CMS

SPS

LHCb

ALICE

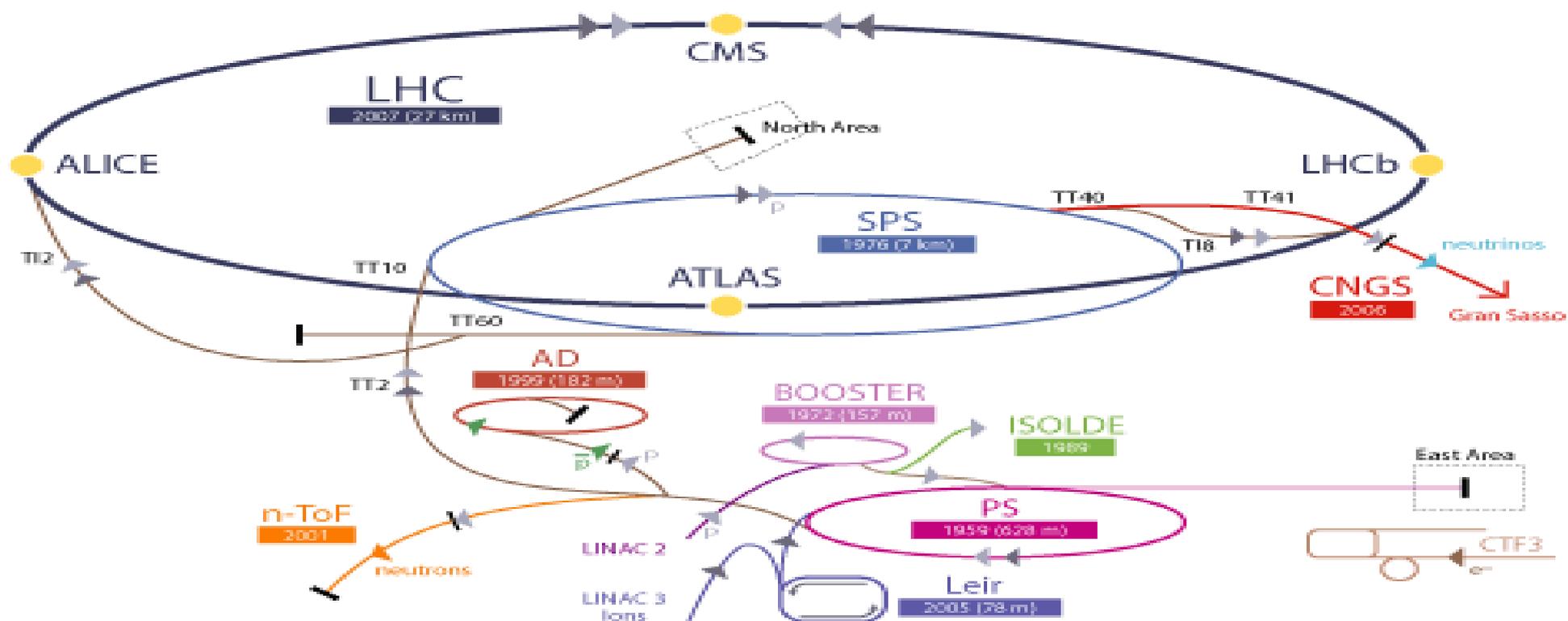
ATLAS

PS



Complejo de aceleradores en el CERN (1/2)

CERN Accelerator Complex



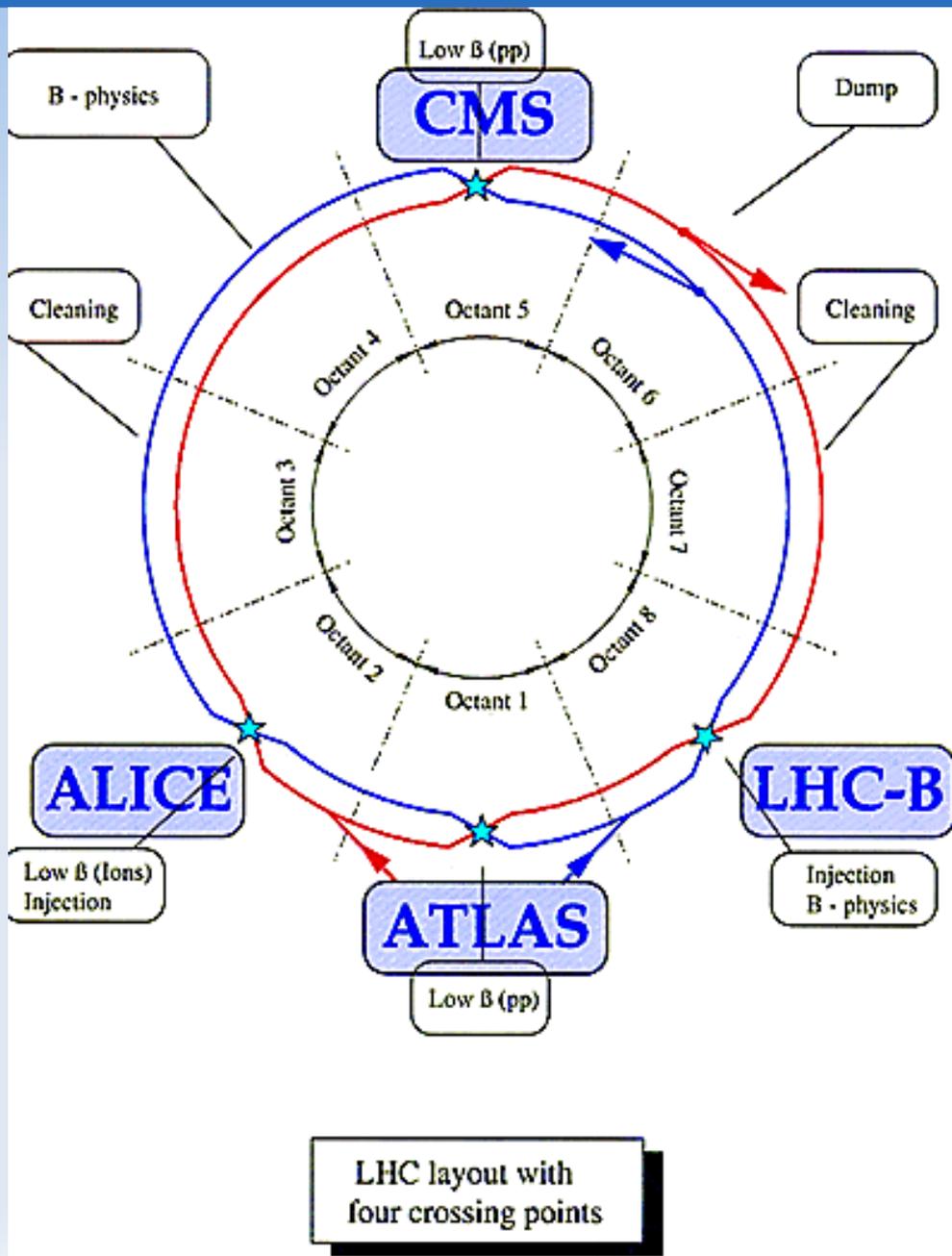
▶ p (proton) ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} (antiproton) ▶ neutrinos ▶ electron
 ⇄⇄⇄ proton/antiproton conversion

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility
 CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

Complejo de aceleradores en el CERN (2/2)

Video Complejo de Aceleradores del CERN

Esquema del LHC



LHC está dividido en 8 zonas (octantes)

- 4 puntos de colisión (**1,2,5,8**)
- 2 zonas para "limpiar" el haz de partículas (**3,7**)
- 1 zona para acelerar las partículas (**4**)
- 1 zona para extraer las partículas (**6**)

Parámetros de funcionamiento de un Colisionador

- El funcionamiento de un colisionador de altas energías se mide mediante la **energía** a las que se producen las colisiones y la **luminosidad**. El segundo depende entre otros parámetros en número de partículas, tamaño del haz, etc.

$$L = \frac{N_b^2 n_b f \gamma}{4 \pi \epsilon_n \beta}$$

La luminosidad nominal para el LHC es,

$$L_{nominal} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

- Para seguir en directo una estimación real del número de colisiones que ocurren en cada experimento podeis ir a este link,

<http://lhc-webcast.web.cern.ch/lhc-webcast/>

PROTON PHYSICS: STABLE BEAMS

Energy:

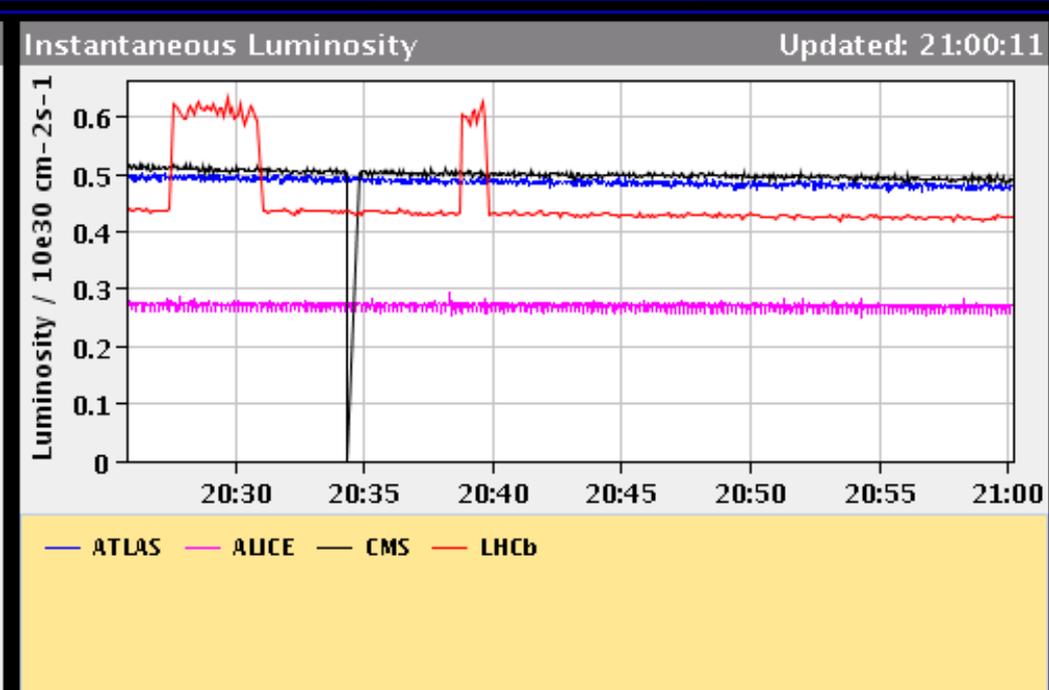
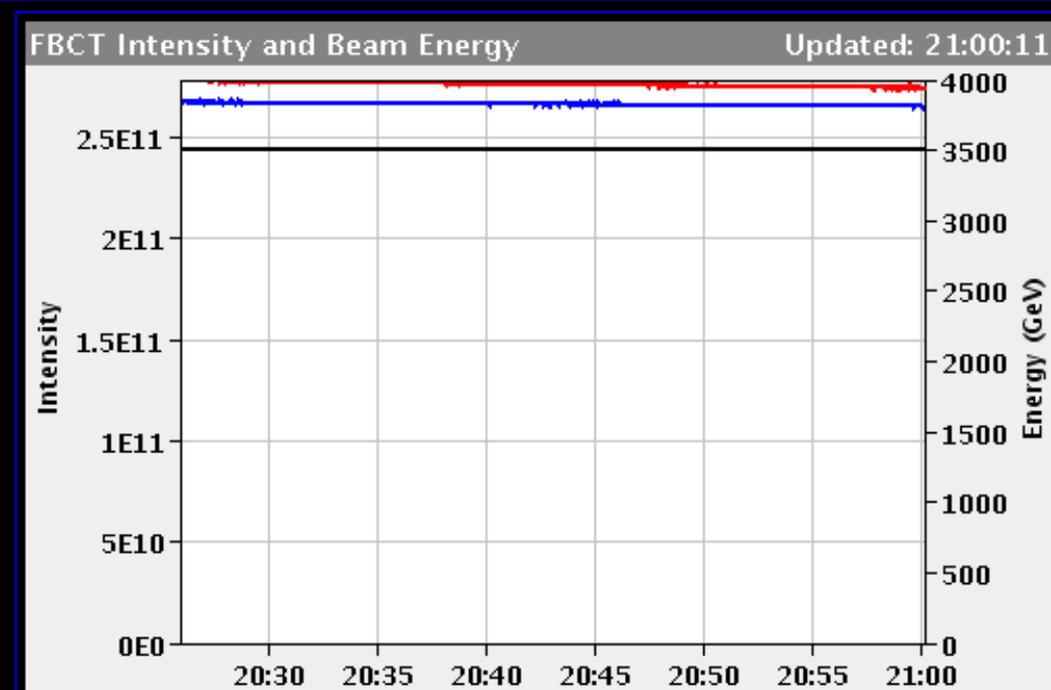
3500 GeV

I(B1):

2.56e+11

I(B2):

2.81e+11



Comments 26-06-2010 19:54:38 :

STABLE BEAMS

Lumi-scans over for all IPs

Filling scheme:

B1: 1, 8941, 17851

B2: 1, 8911, 17851

BIS status and SMP flags

Link Status of Beam Permits

B1

B2

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

LHC Operation in CCC : 77600, 70480

PM Status B1

ENABLED

PM Status B2

ENABLED

¿Y después del LHC?

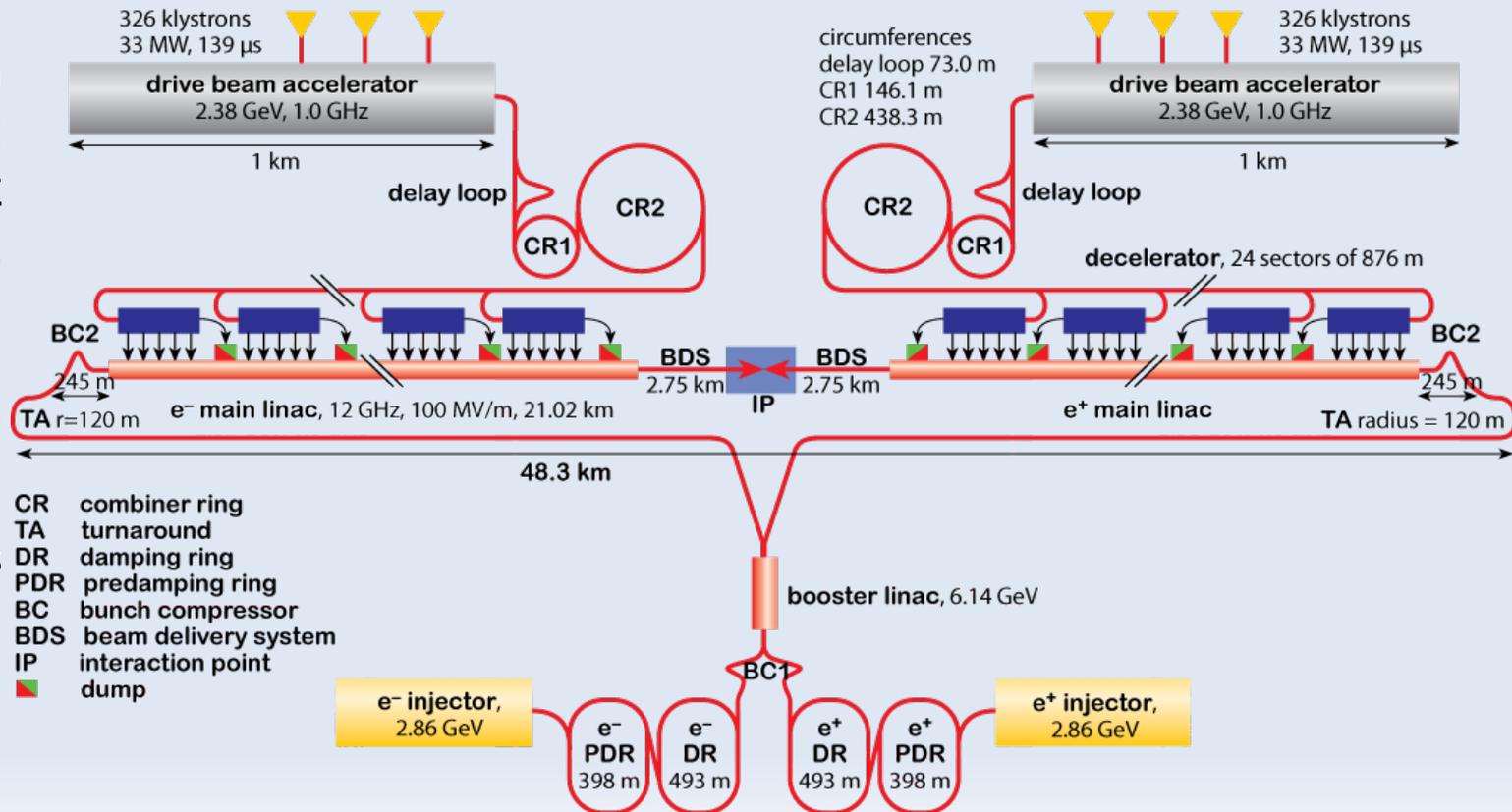
LEP (Gran Electrón-Positrón Colisionador), antecesor del LHC, se encontraba en el límite de la máxima energía alcanzable debido a emisión de luz de sincrotrón ($P \sim \gamma^4$) en el caso de electrones (debido a su reducida masa) al curvar su trayectoria.

Por tanto el siguiente gran colisionador e^+e^- será lineal.

$$P = \frac{2 K e^2 \gamma^4 v^4}{3 c^3 r^2}$$

Principal problema en un acelerador lineal: sólo se pasa una vez por cada elemento. Esto implica:

- Mayor tamaño, más caro.
- Diseño más preciso.



Otras aplicaciones de los aceleradores de partículas

Aceleradores con aplicación médica

Dos aplicaciones principales

- **Terapia**
 - ♦ En las últimas décadas se han utilizado aceleradores de electrones (convertidos en rayos-X) en terapias contra el cáncer de manera exitosa.
 - ♦ Actualmente se ha cambiado a protones e iones (hadrón terapia) ya que la deposición de energía puede ser controlada de forma más precisa. Inconveniente: diseño más exigente.
- **Imagen**
 - ♦ Producción de isótopos para PET escaners (ciclotrones).



Ventajas de protón/ion terapia

Protons and ions spare healthy tissues

200 MeV - 1 nA
protons

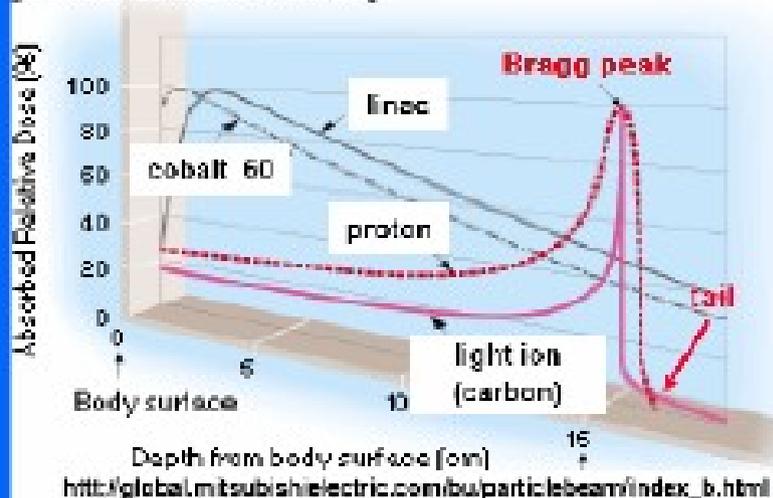
4800 MeV - 0.1 nA
carbon ions
which can control
radioresistant
tumours

charged hadron beam
that loses energy in matter

26 cm

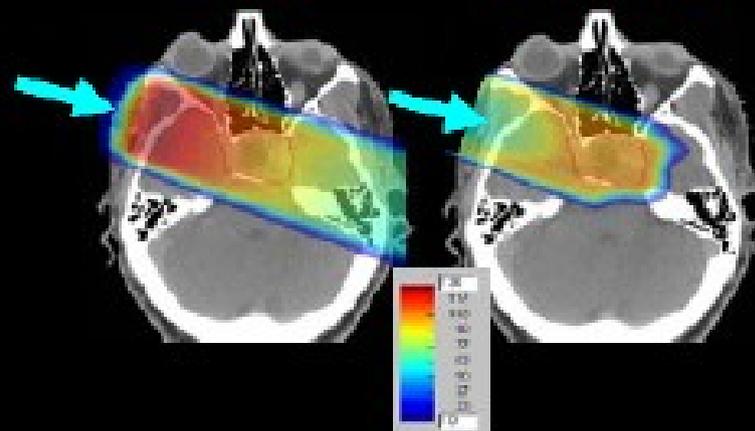
tumour
target

[Dose Distribution Curve]

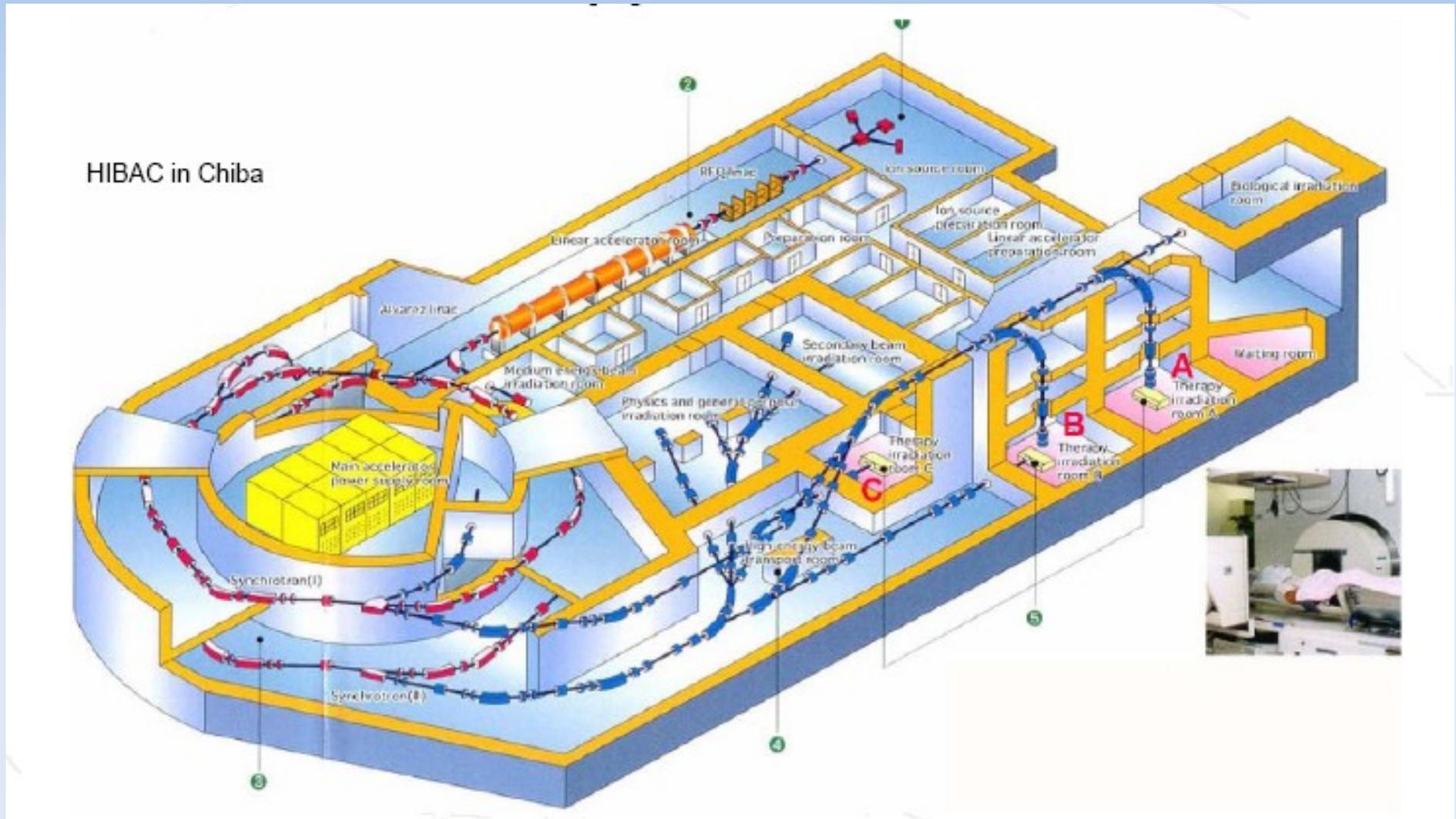


X rays

protons or
carbon ions



Centro de protonterapia



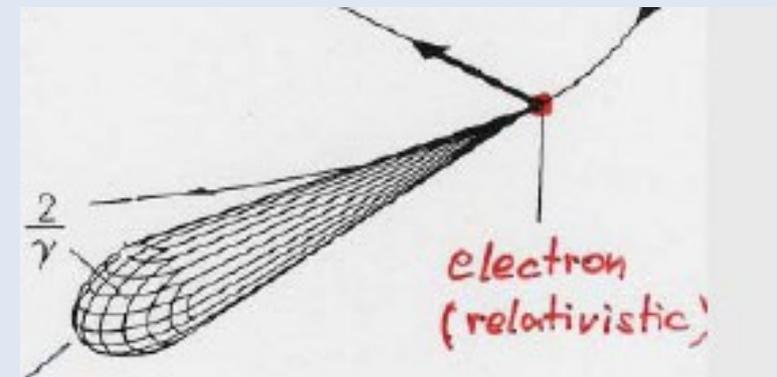
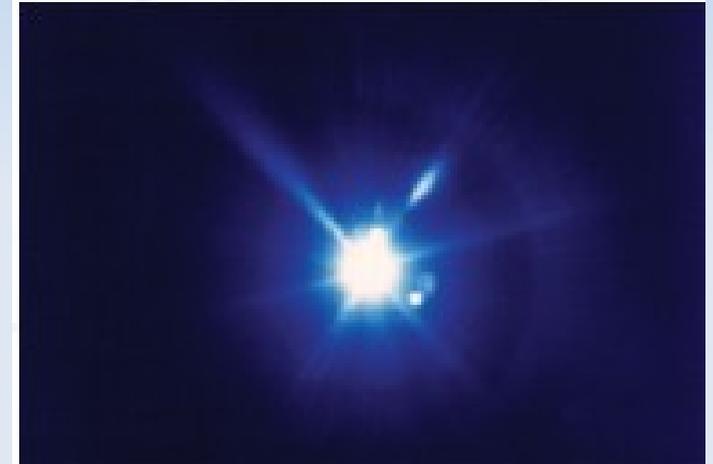
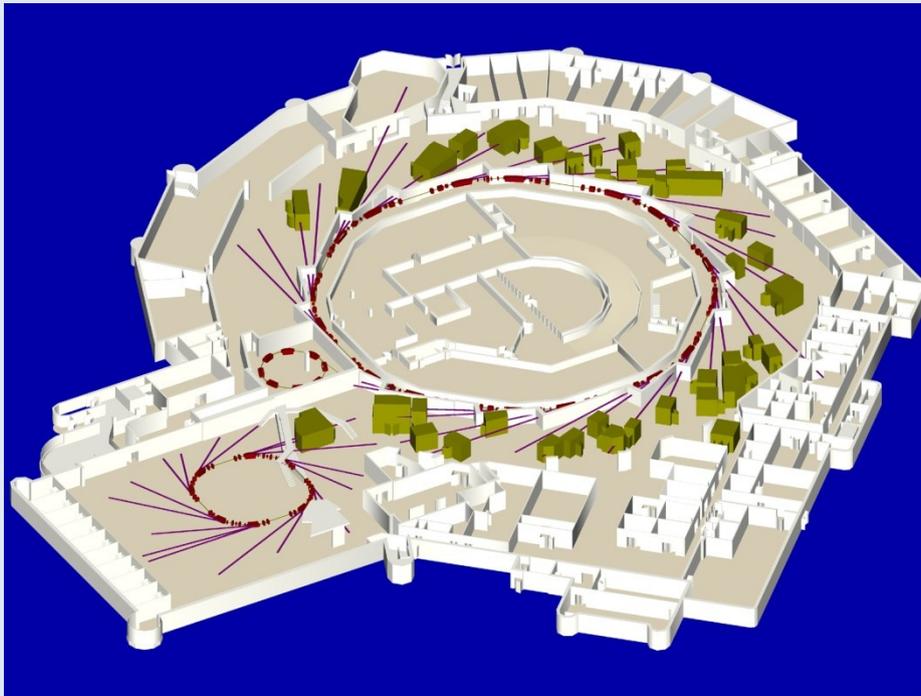
Centros de hadronterapia en hospitales



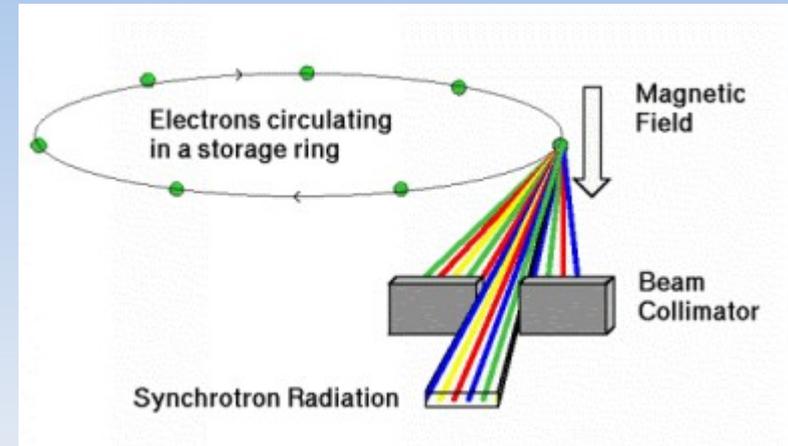
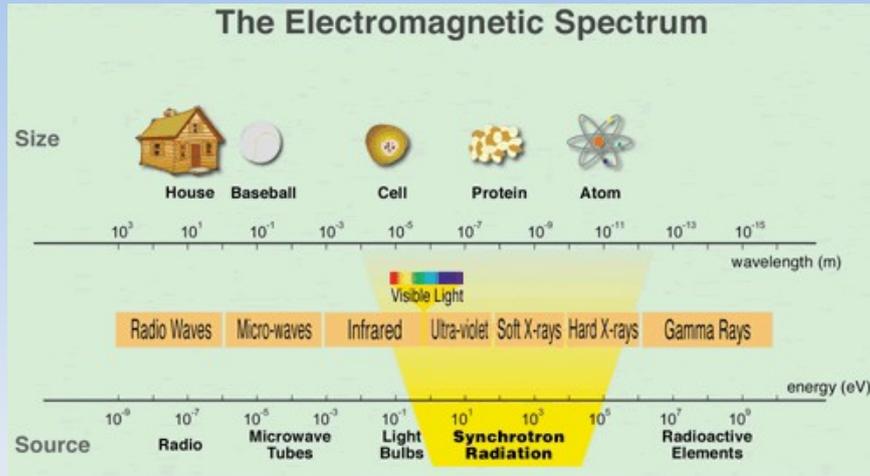
Fuentes de radiación de sincrotrón (1/3)

En las últimas dos décadas ha aumentado significativamente los centros que utilizan la radiación emitida (i.e. luz intensa) por los electrones para hacer gran variedad experimentos (composición de cremas, ciencia de materiales, etc.)

El rango frecuencias es muy amplio (visible o no).



Fuentes de radiación de sincrotrón (2/3)



Cerca de Barcelona, en Bellaterra se inauguró la primera fuente de luz sincrotrona de España el 22 de Marzo de 2010. <http://www.cells.es/>



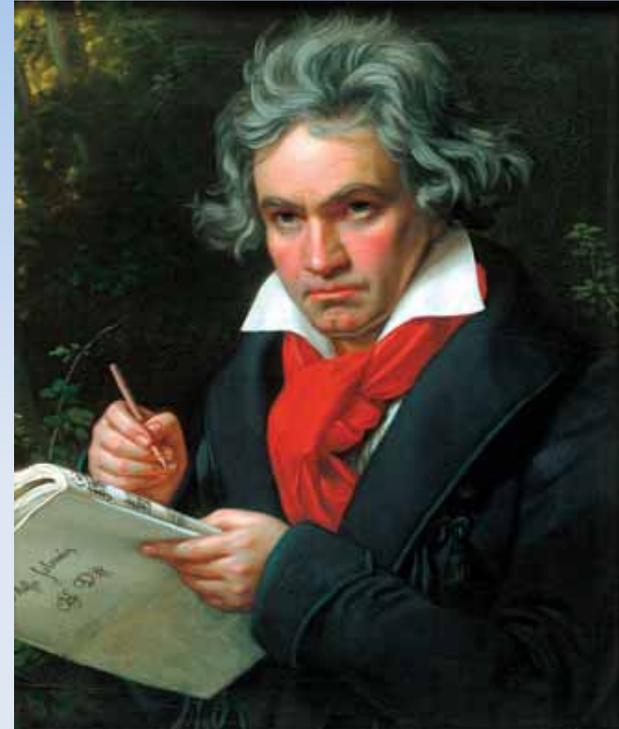
Ejemplos de uso de radiación de sincrotrón

Napoleón



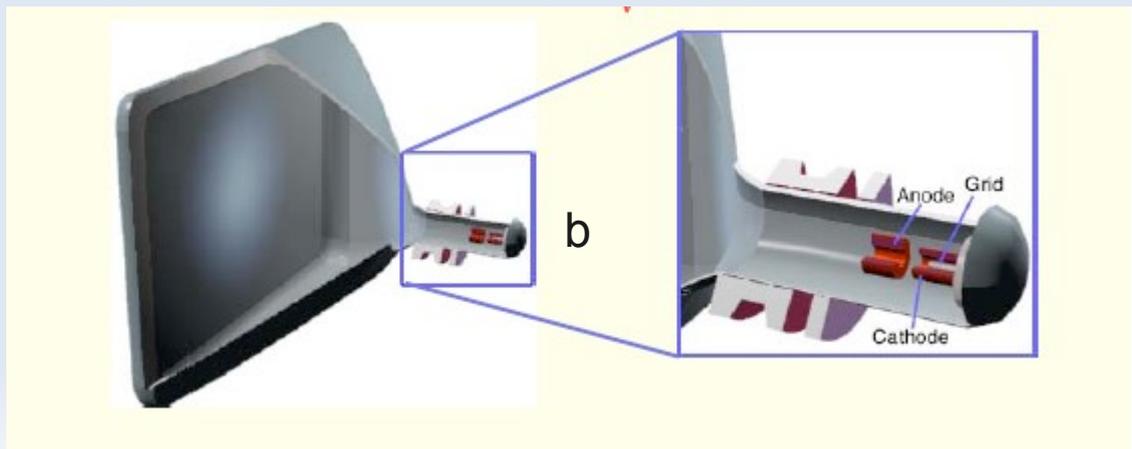
En junio de 2001, estudios con luz de sincrotrón confirmaron un contenido de arsénico 38 veces mayor que lo normal en cabello tomados después de su muerte (1821). No contentos con el resultado, la revista *Science et Vie* comisionó a un grupo de expertos para realizar las pruebas en cabello de Napoleón de 1805, 1814 y 1821. En todas estas muestras se encontraron niveles de arsénico muy altos (entre 15 y 100 partes por millón, mientras en condiciones normales el promedio es 0.8). Estos resultados sugirieron que el envenenamiento no fue la causa de su muerte.

Beethoven



En 2000, físicos del Laboratorio Nacional de Luz de Sincrotrón de Argonne (Chicago), realizaron un experimento no destructivo en seis cabellos de Beethoven. Se encontraron elevados niveles de plomo, de hasta 60 partes por millón, lo que es más de 100 veces mayor a los niveles normales de la actualidad. Aunque no sabe con seguridad de donde provenía el plomo, su presencia es consistente con la sintomatología de calambres, fiebre, abscesos y dolor en los ojos. El padecimiento le ocasionó sordera y debió haber impactado en su personalidad.

El acelerador más importante!!



Bibliografía

Referencias utilizadas en esta presentación:

- CAS 1992. 5º Curso General de Física de Aceleradores, Septiembre 1992.
- Informe de diseño del LHC
- “The physics of particle accelerators”, K. Willie.
- USPAS página web, A. Chao, Enero 1997.
- O. Brüning, CERN Cursos de Verano.
- ”Curso de dinámica transversal en aceleradores”, N. Pichoff, JUAS Enero 2004.
- U. Amaldi, Presentación de hadron-terapia en el CERN 2006.
- ”An Introduction to particle accelerators”, E. Adli, CERN 2007.