LA RADIACIÓN DE SINCROTRÓN. PRINCIPIOS, INSTRUMENTACIÓN

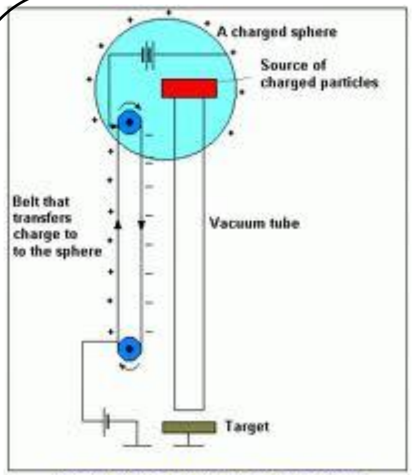
José Manuel Quesada Molina, Sevilla 2010

INDICE

1. HISTORIA

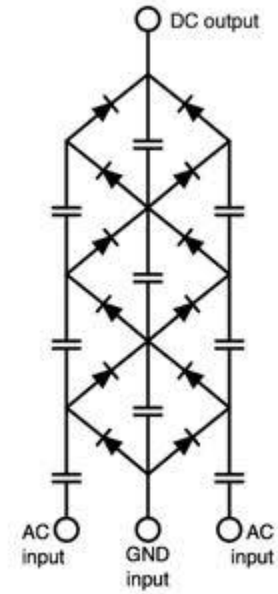
Los aceleradores de partículas

- Los primeros aceleradores fueron construidos por físicos de partículas en los años 30. El objetivo de estos era romper el núcleo del átomos usando la energía de colisión de las partículas. De estos experimentos pretendían obtener información básica sobre las leyes fundamentales de la física que gobiernan el comportamiento del universo.
- Lineales (electrostáticos):
  - Cockroft-Walton (Cavendish Laboratory, Cambridge 1932) : protones a 600 keV
  - Van de Graaff (MIT, Boston 1931): 1 MV
- Circulares :
  - Ciclotrón (Berkeley, California, E. O. Lawrence & M. S. Livingston, 1932): protones a 1.2 MeV
  - Betatrón (Illinois, 1940): electrones a 300 MeV
  - **Sincrotrón** (Idea**: McMillan ,** Berkeley Radiation Lab, California, 1945): electrones a varias decenas de MeV



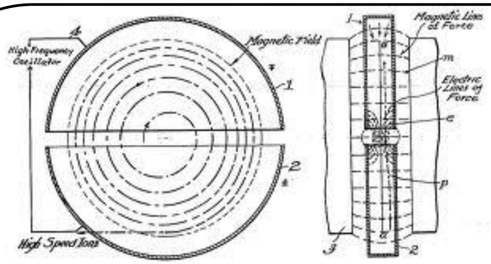
Section through the Van de Graaff generator.

Van de Graaff

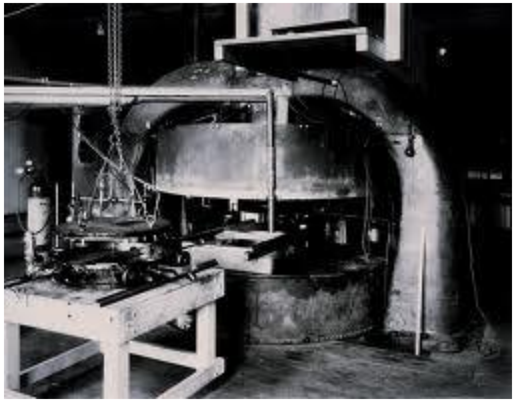


Cockroft-Walton

Imágenes



Ciclotrón



Betatrón

1. HISTORIA

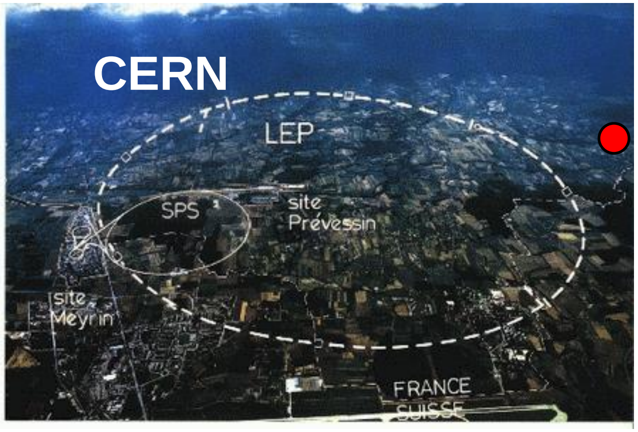
- Sincrotrones (focalización débil) :
  - **Bevatrón** (Lawrence Berkeley Lab, California, 1950): protones a 6.3 GeV
  - **Cosmotrón** (Brookhaven National Lab, New York 1953): protones a 3.3 GeV
- Sincrotrones (focalización fuerte: **gradientes alternos**) :
  - **CERN Proton Sincrotron** (1961, Ginebra, 1959): protones a 28 GeV
  - **SPS, 2x** (CERN, Ginebra, 1976): protones-antiprotones (300-450 GeV) , electrones-positrones (->LEP)
  - **Tevatron, 2x** (Fermilab, Chicago, 1983): protones a ~ 1TeV
  - **LEP, 2x** (CERN, Ginebra, 1989->2000): electrones-positrones a ~45 GeV
  - **LHC, 2x** (CERN, Ginebra, 2008): protones-protones a 7 TeV
  - **SPEAR 2x** (SLAC, 1972): electrones –positrones a 4 GeV (dedicada a partir de 1990)
  - **SOR-Ring** (Tokyo, 1974): electrones a 300 MeV (dedicada)
  - **ESRF** (Grenoble, 1994): electrones 6 GeV
  - **APS** (Argonne National Lab, Illinois, 1995) : electrones a 7 GeV
  - **Spring-8** (Hyogo, Japón, 1997):electrones 8 GeV
  - **ALBA** (Barcelona, 2010): electrones 3 GeV

Fuentes de sincrotrón

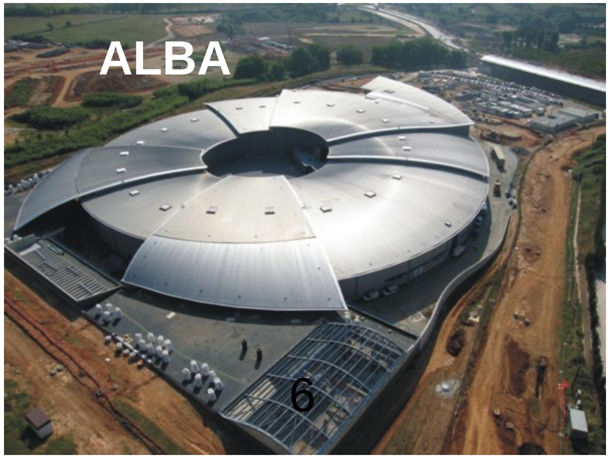

BEVATRON


TEVATRON


TUNEL LHC


CERN
LEP
SPS
site
Prévessin
site
Meyrin
FRANCE
SUISSE


ESRF


ALBA

1. HISTORIA

El origen de la luz de sincrotón

- La radiación sincrotón se observó por primera vez en los laboratorios de la compañía General Electric en EEUU en 1947 en el recién propuesto (McMillan, 1945) **sincrotrón**.

- Al principio de consideraba un efecto indeseable, pues las partículas perdían energía, pero en los años 60 fue reconocida por como una radiación con excelentes propiedades.

- Se comenzó a utilizar en modo *parásito* a la par que se realizaban experimentos en Física de Partículas (SPEAR) ← 1ª generación de fuentes de RS

- Pronto se desarrollaron las primeras máquinas dedicadas a la producción de RS (SOR-Ring) ← 2ª generación de fuentes de RS

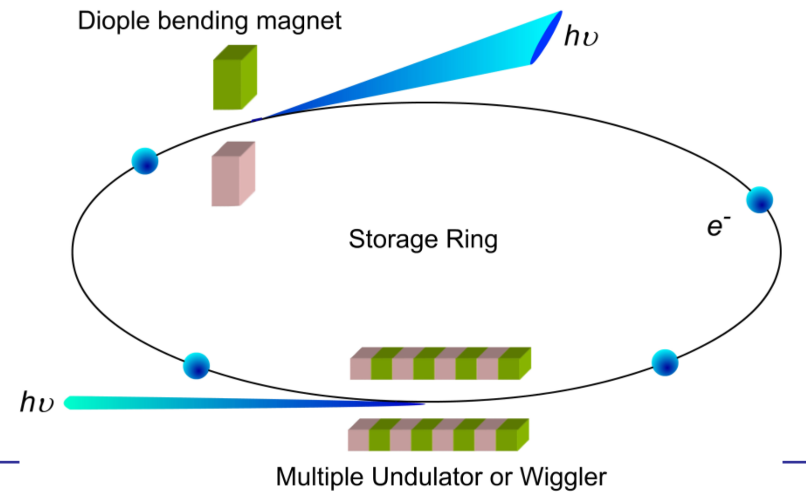
2. CONCEPTOS BASICOS

¿Qué es la radiación sincrotrón?

- Radiación electromagnética emitida cuando partículas cargadas de muy alta energía se desplazan en trayectorias curvas.

¿Dónde se produce?

- Tangencialmente a la trayectoria del haz de electrones en los imanes dipolares de los anillos de almacenamiento.



¿Para qué sirven?

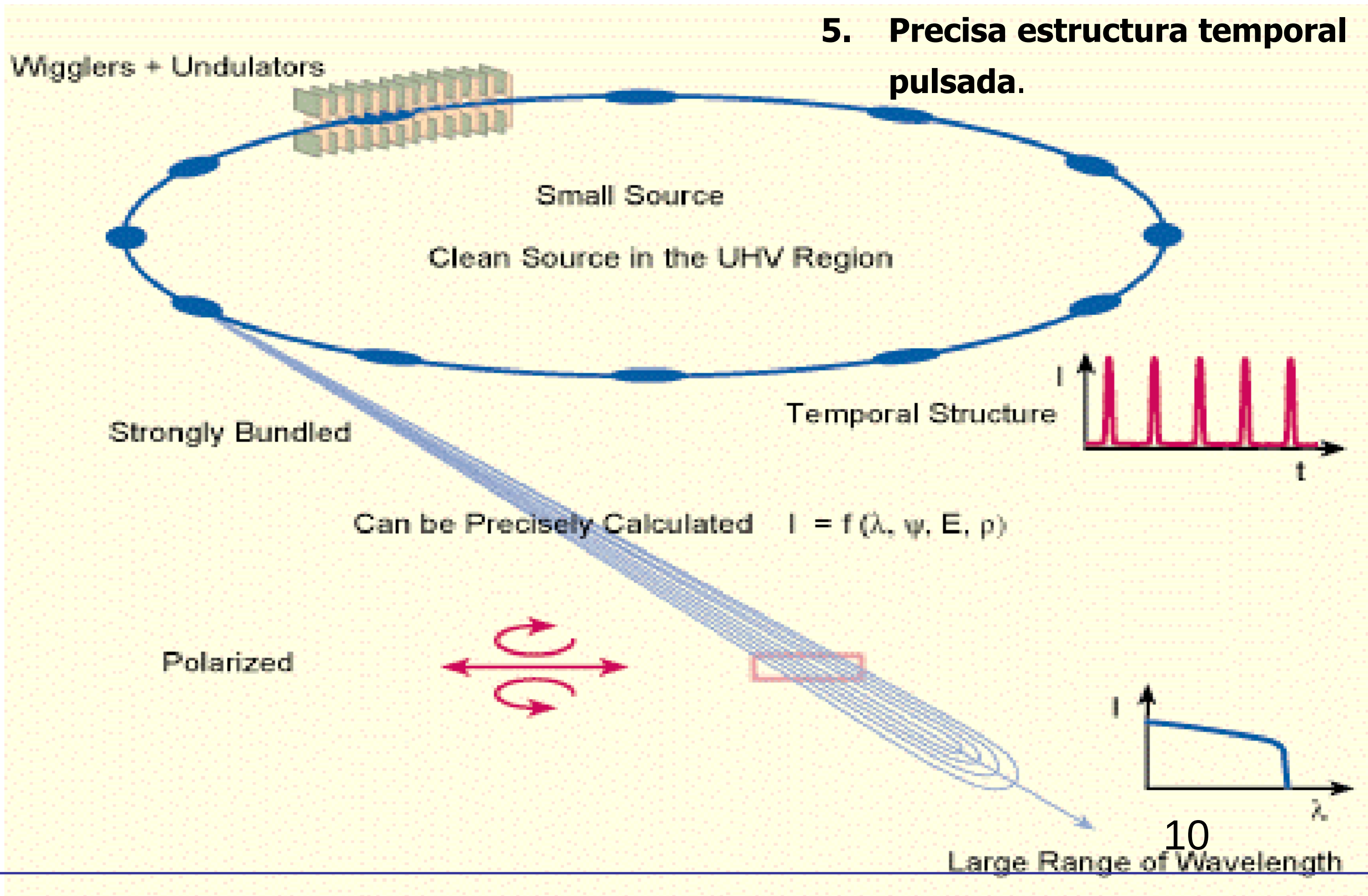
2. CONCEPTOS BASICOS

- ¿De qué están hechos los planetas?
- ¿en que procesos se sustenta la vida?
- ¿cómo podemos explicar las propiedades de la materia y desarrollar nuevos materiales?
- ¿será posible un día conquistar los virus, predecir las catástrofes naturales o eliminar la contaminación ambiental?

- Se necesita un profundo conocimiento de la estructura de la materia para contestar estas cuestiones.
- Las fuentes de radiación sincrotón pueden compararse con "supermicroscopios" capaces de revelar información útil en numerosos campos de investigación.
- Hay en torno a 50 sincrotrones en el mundo que son usados por un número creciente de científicos http://www.als.lbl.gov/als/synchrotron_sources.html

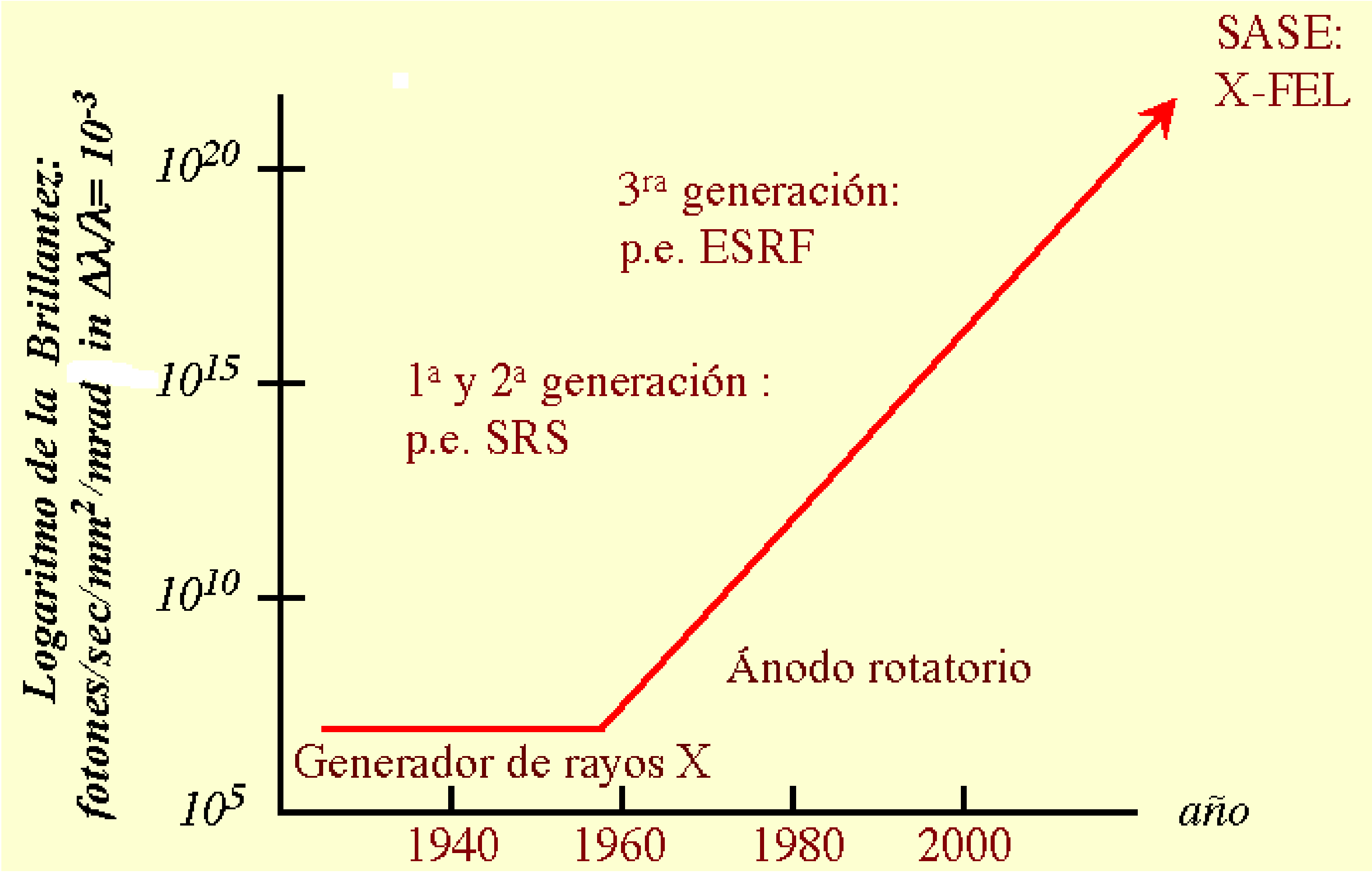
3. PROPIEDADES

1. **Alta intensidad, 10^3-10^6 superior a la de tubos de Rayos X**
2. **Amplio rango de longitudes de onda**
3. **Polarización lineal en el plano de la órbita (elíptica: con inserciones).**
4. **Alta colimación o pequeña divergencia**
5. **Precisa estructura temporal pulsada.**



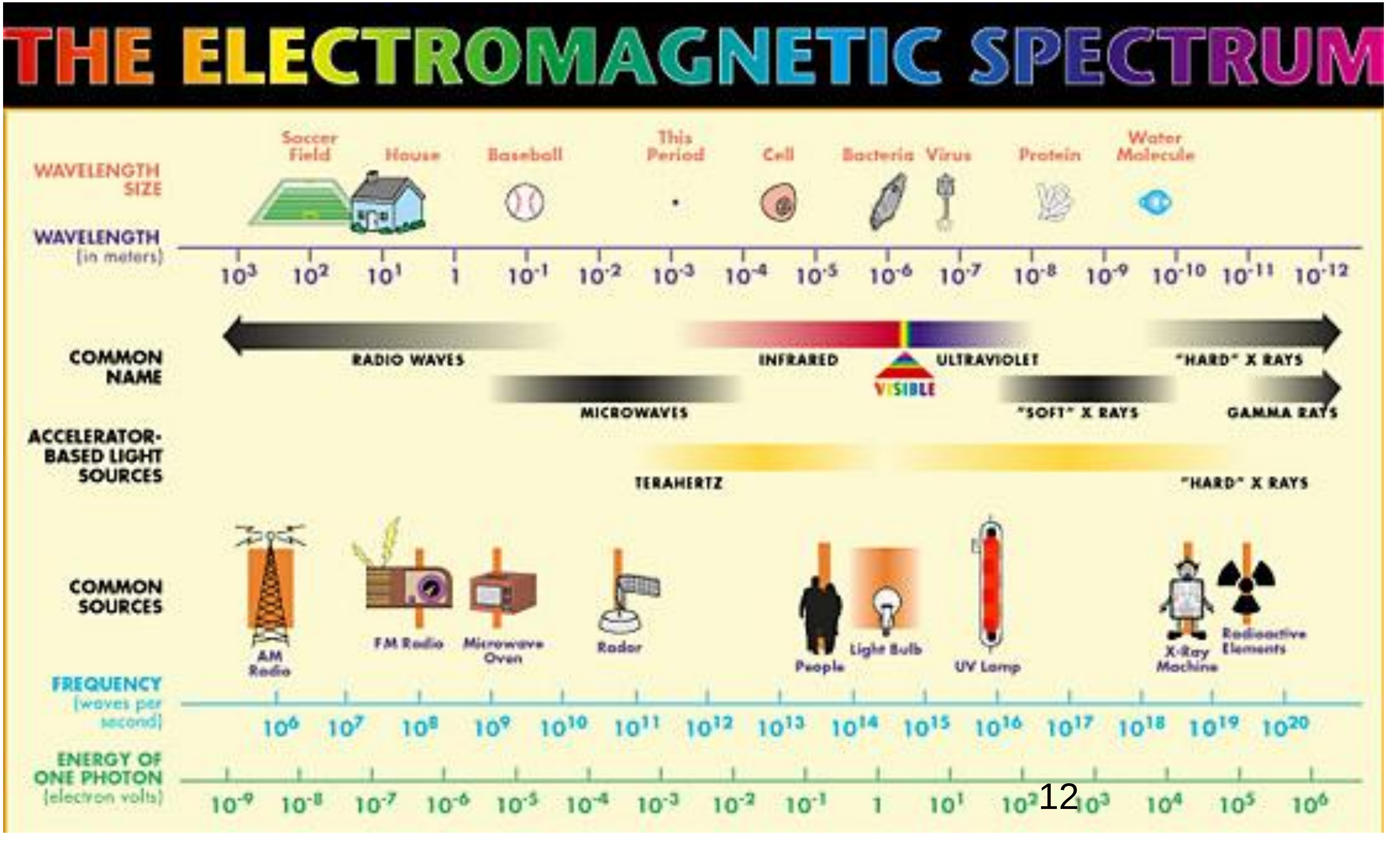
3. PROPIEDADES

1. **Alta intensidad, 10^3-10^6 superior a la de tubos de Rayos X**



3. PROPIEDADES

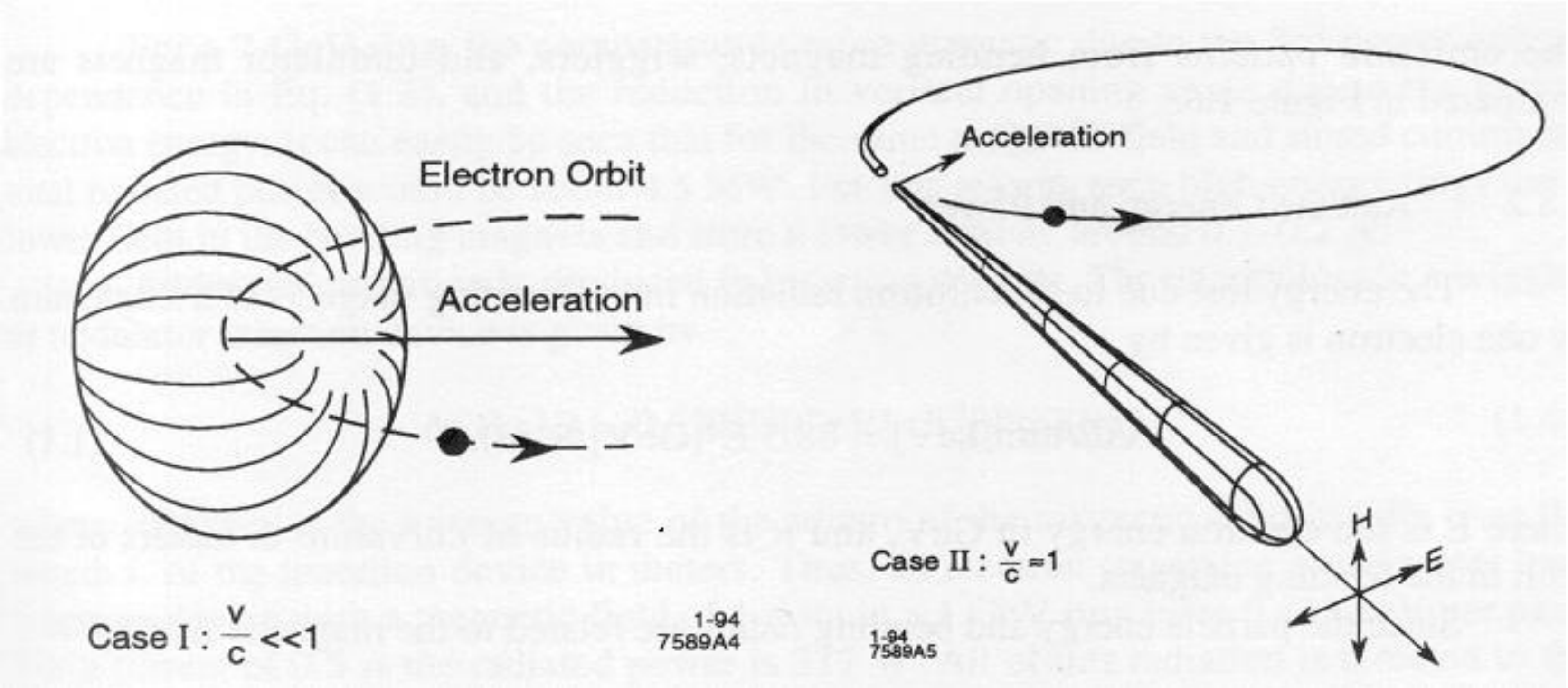
2. Amplio rango de longitudes de onda



3. PROPIEDADES

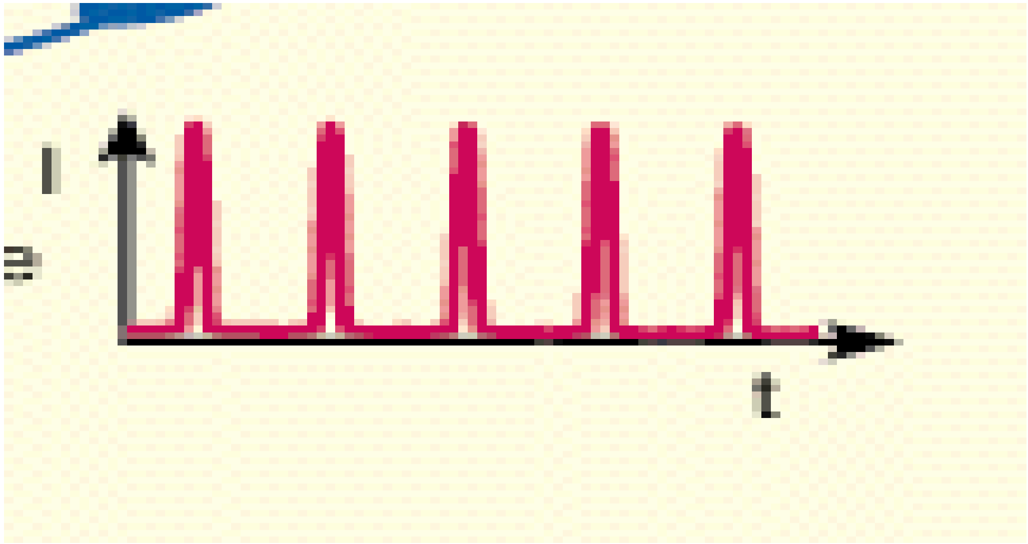
3. Fuerte polarización en el plano de la órbita.

4. Alta colimación o pequeña divergencia



3. PROPIEDADES

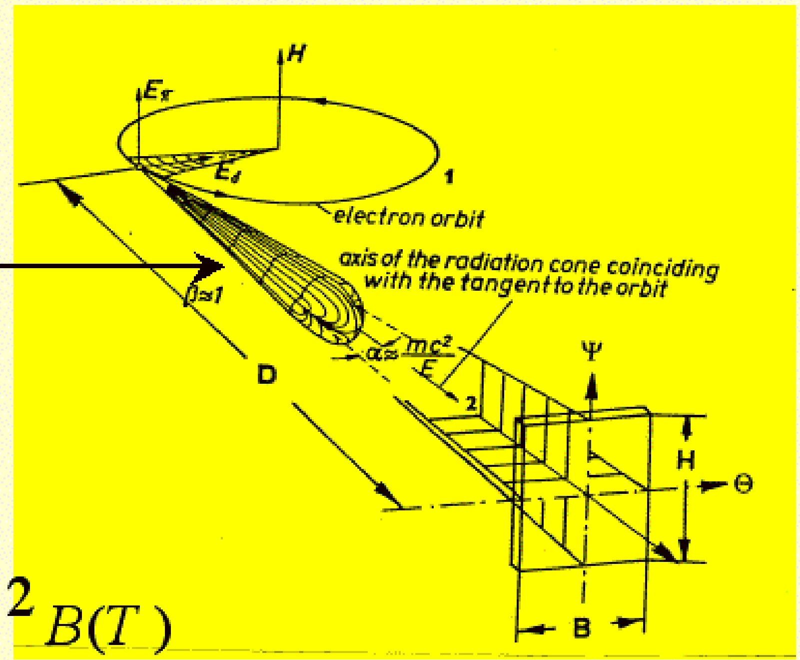
5. Precisa estructura temporal pulsada, en la escala de los femto o pico segundos



4. PATRONES DE EMISIÓN

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{E_e}{m_o c^2} \qquad \beta = \frac{v}{c}$$

Colimación de la LS: $1/\gamma$



Energía Crítica

$$E_c(keV) = 0.665 E_e(GeV)^2 B(T)$$

4. PATRONES DE EMISIÓN

Ángulo de apertura del cono:

$$\mathbf{1/\gamma = Mc^2/E}$$

Mc^2 = 0.511 MeV, si E = 6 GeV,

⬇

$(1/\gamma)$ = (0.511MeV)/(6 GeV) = 0.08 mrad = 0.004º

ESTRUCTURA TEMPORAL (RF)

- Haz: paquetes de electrones
- Anchura: *Paquete de ~3 cm a v =c*

⬇

pulso de ~100 picosegundos

POLARIZACIÓN

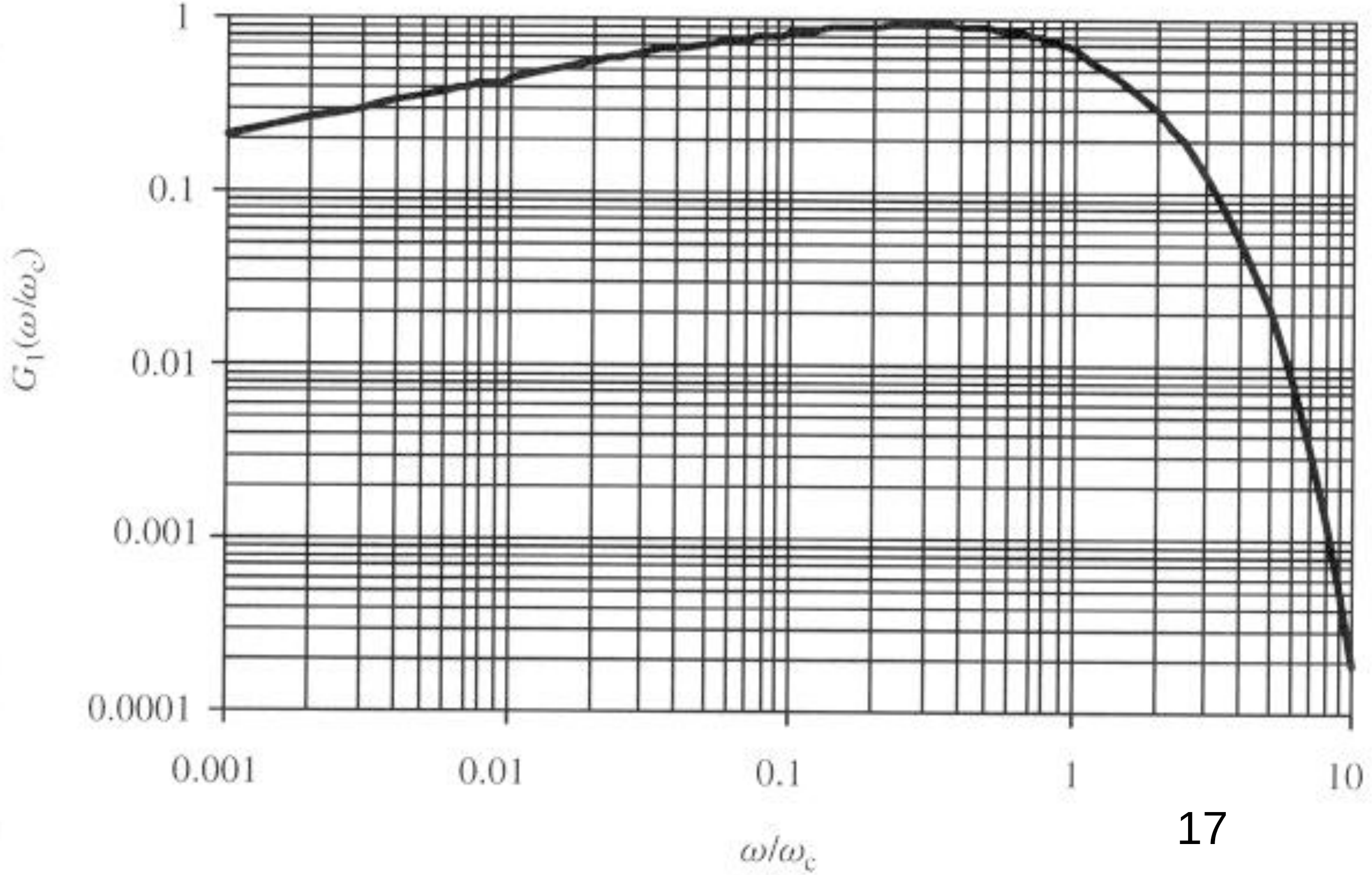
- Electrón dipolo eléctrico oscilante en plano de la orbita
- Radiación polarizada casi al 100%

4. PATRONES DE EMISIÓN

El flujo de fotones, F, emitido por la fuente es función de la energa de las partículas E, de la energía crítica, ϵ_c, y de la intensidad de corriente, I, que circula por el anillo:

$$F[fotones/s/mrad/0.1\%BW] = 2.457\ 10^{10}\ E[GeV]\ I[mA]\ G(\frac{\omega}{\omega_c})$$

ωc =frecuencia crítica



4. PATRONES DE EMISIÓN

La potencia emitida por unidad de intervalo de frecuencia (ω) viene dada por:

$$\frac{dP_\gamma}{d\omega} = \frac{P_\gamma}{\omega_c} S(\frac{\omega}{\omega_c})$$

donde la *función universal* S viene dada por:

$$S(\frac{\omega}{\omega_c}) = \frac{9\sqrt{3}}{8\pi}(\frac{\omega}{\omega_c}) \int_{\frac{\omega}{\omega_c}}^{\infty} K_{5/3}(\frac{\omega}{\omega_c}) d(\frac{\omega}{\omega_c})$$

y la *frecuencia crítica* ω_c:

$$\omega_c = \frac{3}{2}\frac{c\gamma^3}{\rho}$$

Obviamente se cumple :

$$\int_0^{\infty} S(\frac{\omega}{\omega_c}) d(\frac{\omega}{\omega_c}) = 1$$

La energía de cada fotón emitido es:

$$\epsilon = \hbar\omega$$

si definimos $n(\epsilon)d\epsilon$ como el número de fotones emitidos por unidad de tiempo con energía entre ϵ y $\epsilon + d\epsilon$, se cumple

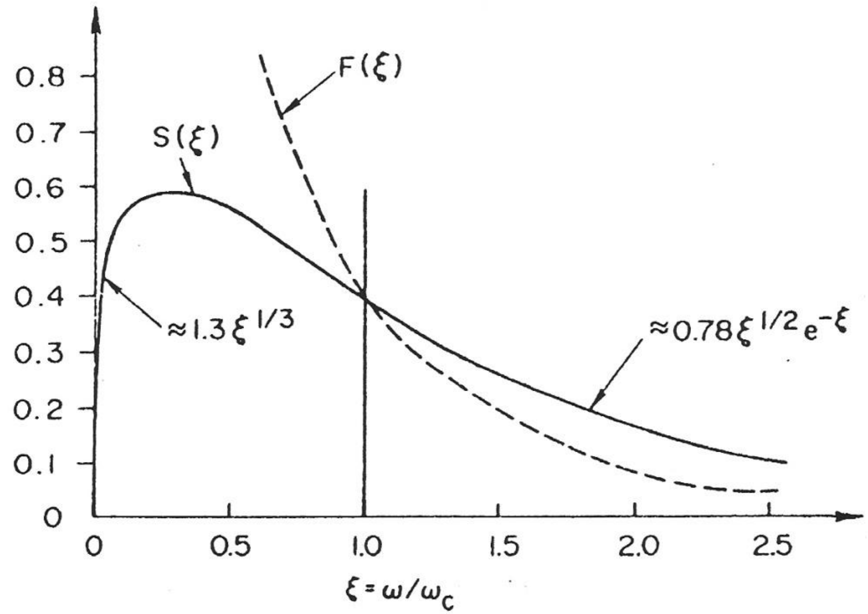
$$\epsilon\ n(\epsilon)d\epsilon = \frac{dP_\gamma}{d\omega} d\omega$$

con lo que

$$n(\epsilon) = \frac{P_\gamma}{\epsilon_c^2} F(\frac{\epsilon}{\epsilon_c})$$

con

$$F(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}) = (\frac{\epsilon}{\epsilon_c})^{-1} S(\frac{\epsilon}{\epsilon_c})$$



Normalized power spectrum S and photon number spectrum F

4. PARAMETROS FUNDAMENTALES

Por la condición de equilibrio en la órbita se cumple que:

$$R = \frac{p}{eB} = \frac{\sqrt{T(T+2m_e c^2)}}{ceB}$$

siendo $p = m_e \gamma \beta c$ ($\beta = v/c$).

En las fuentes de sincrotrón se cumple que $T(\sim GeV) >> m_e c^2 (511 keV)$ (siendo $E = T + m_e c^2$ la energía total) por lo cual con muy buena aproximación:

$$E \simeq T = ceBR$$

que conduce a la muy utilizada expresión

$$E[GeV] = 0.3 B[T] R[m]$$

El parámetro γ:

$$\gamma = \frac{E}{m_e c^2} = \frac{E[GeV]}{0.511 \times 10^{-3}}$$

Los parámetros críticos:

$$\omega_c[MHz] = \frac{3}{2}\frac{\gamma^3 c}{R} = 4.5 \times 10^2 \frac{\gamma^3}{R[m]}$$

$$\epsilon_c[eV] = 665\ B[T](E[GeV])^2 = 2218 \frac{(E[GeV])^3}{R[m]}$$

$$\lambda_c[\mathring{A}] = 5.6 \frac{R[m]}{(E[GeV])^3} = \frac{18.6}{B[T]\ (E[GeV])^2}$$

E: Energía de las particulas cargadas que criculan por el anillo

ε_c ω_c λ_c : *Energía, frecuencia , longitud de onda críticas* de los fotones emitidos

B : Campo magnético

R: Radio de curvatura

EMITANCIA Y BRILLO

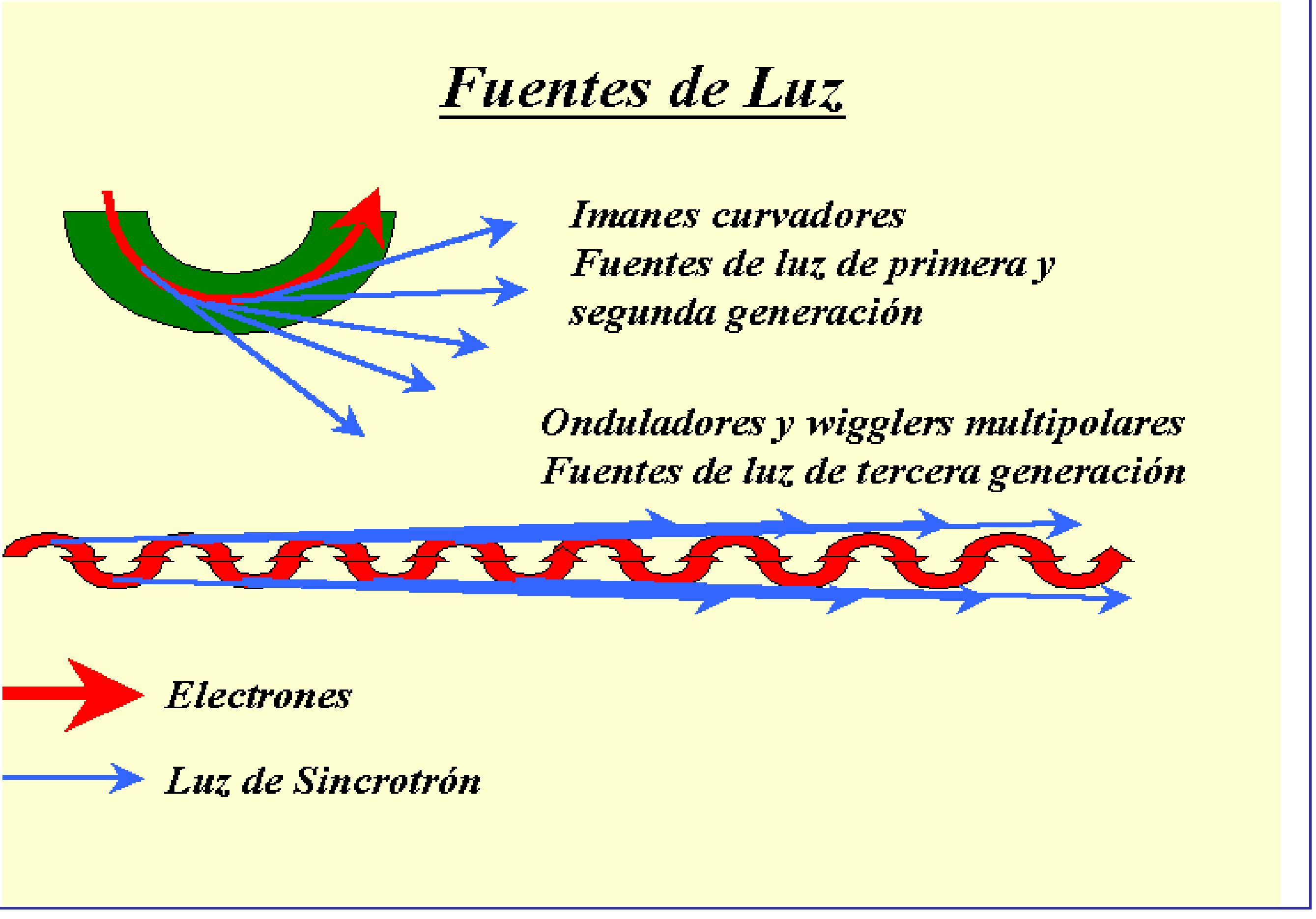
Emitancia: tamaño del haz x divergencia.

Brillo : fot/seg/angulo solido/area sup emisora

Brillo espectral: brillo/0.1 % BW

Brilliance o Brightness

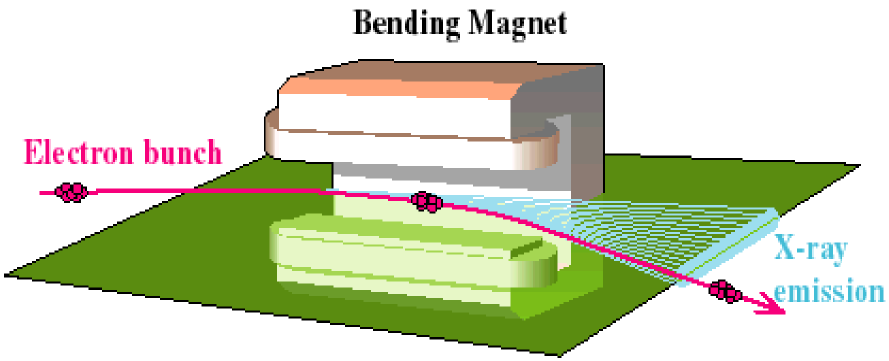
5. DISPOSITVOS DE INSERCION



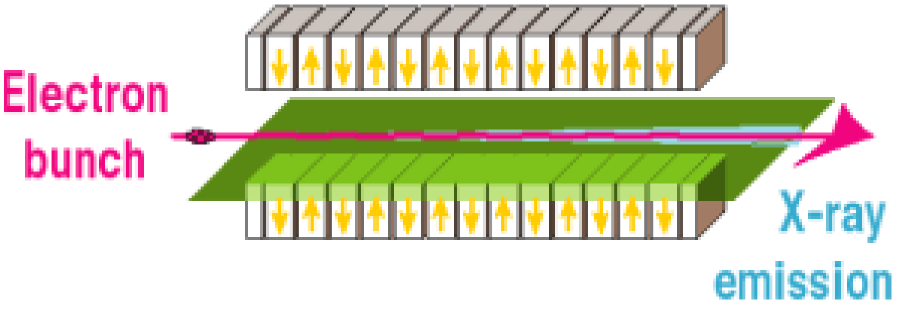
5. DISPOSITVOS DE INSERCION

1ª generación : Aceleradores de física de altas energías

2ª generación : Radiación emitida "imán de curvatura" (BM)



3ª generación : radiación emitida "dispositivos inserción" (wiggler, ondulador)



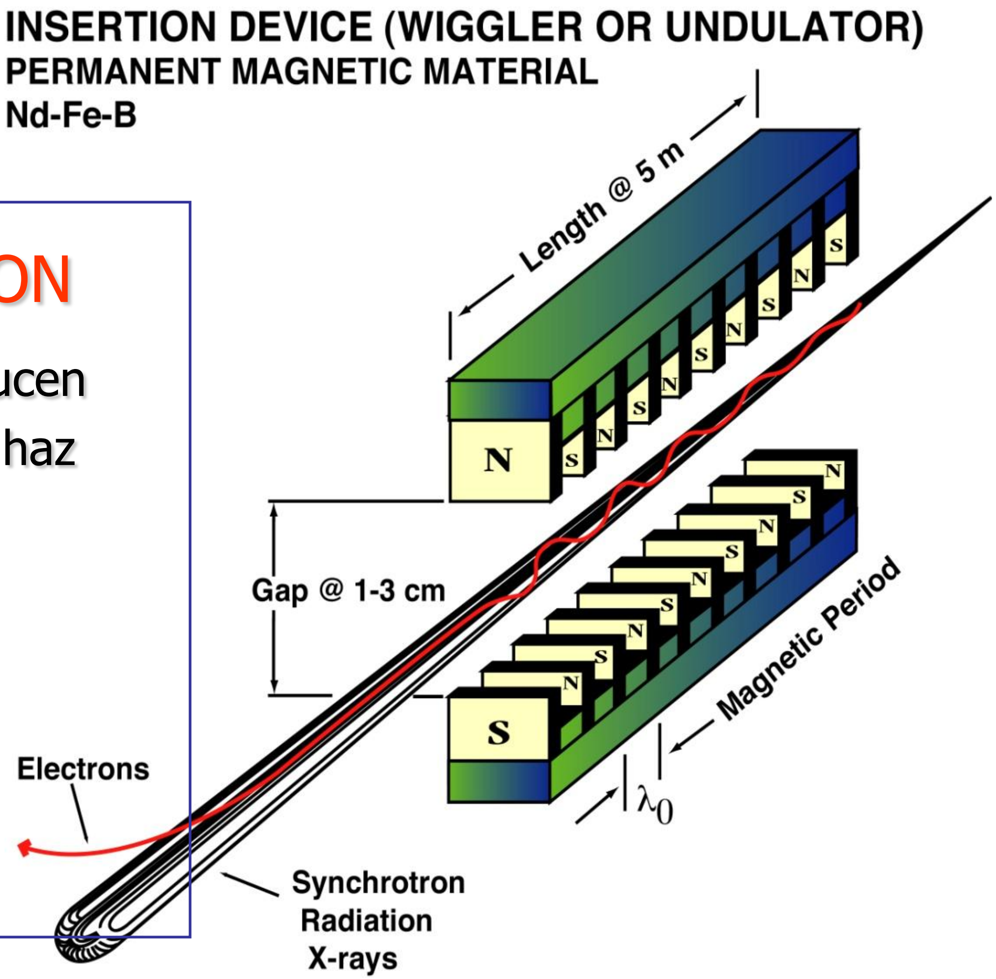
5. DISPOSITVOS DE INSERCION

• Dipolos magneticos alternos que producen campos magneticos perpendiculares al haz

• Modifican emitancia y el brillo del haz

• Parámetro de deflexión:

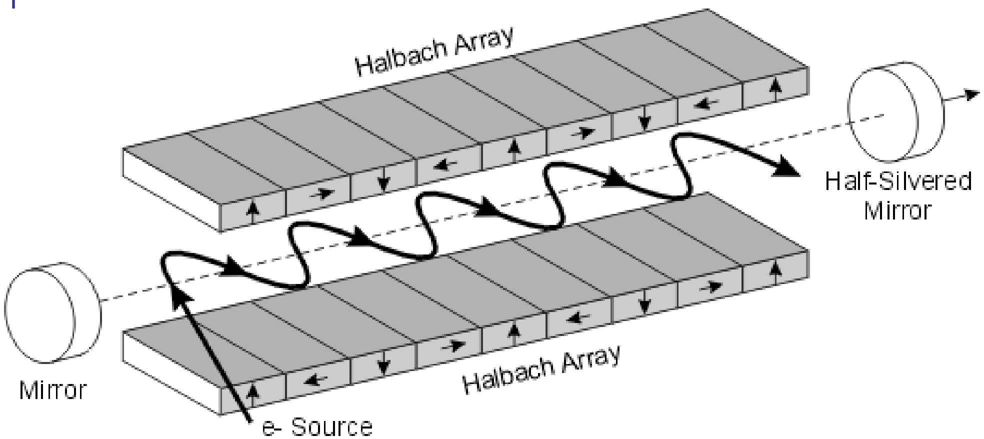
$$K = \frac{eB\lambda_u}{2\pi m_e c},$$

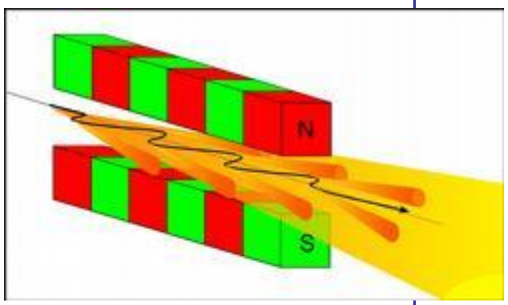


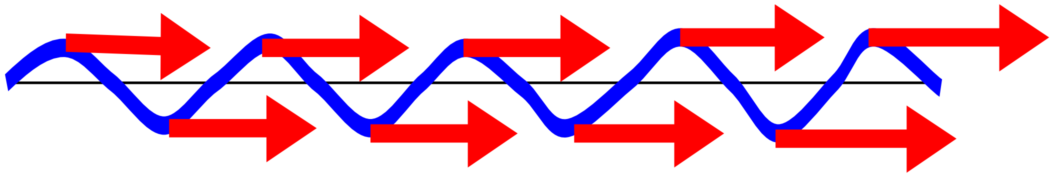
5. DISPOSITVOS DE INSERCION

Wiggler

Disposicion de imanes permanentes (verde y amarillos) en un wiggler. La longitud del periodo es “larga”. Parámetro de deflexión K >>1

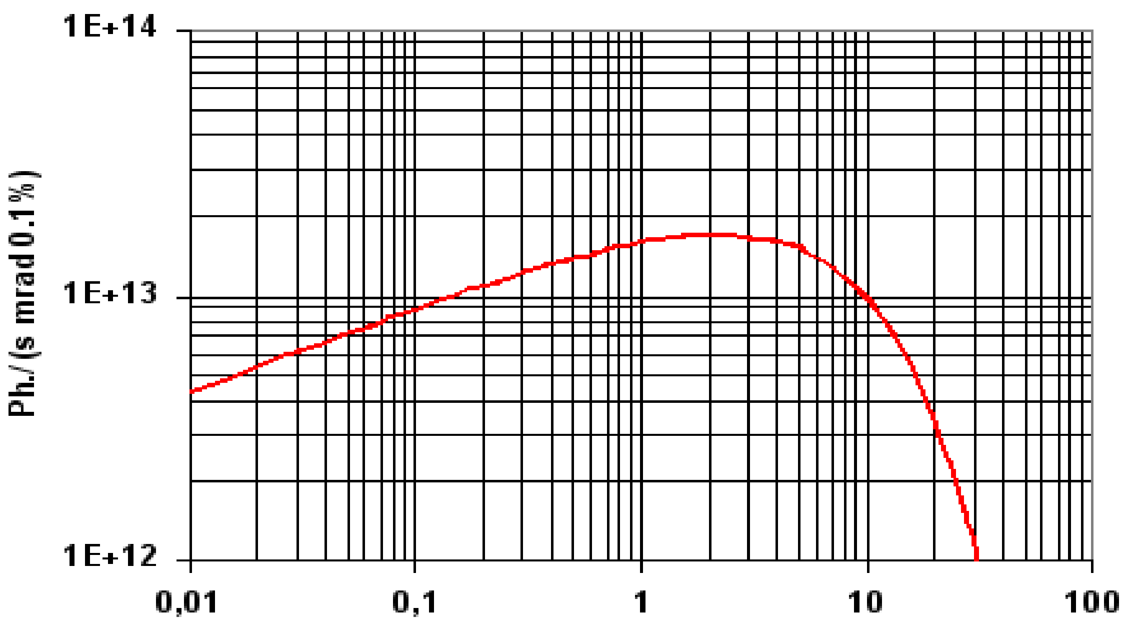






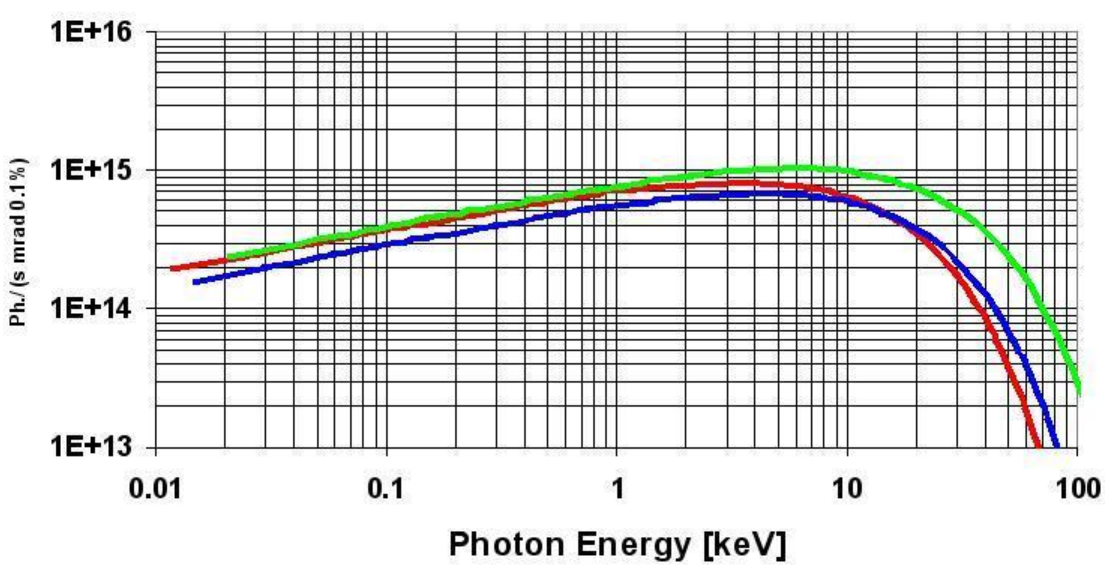
La trayectoria de un haz de electrones en un wiggler (línea azul). Las flechas rojas simbolizan la radiación sincrotrón emitida, la intensidad aumenta por el solapamiento de los conos de radiación.

5. DISPOSITVOS DE INSERCION



Iman de curvatura

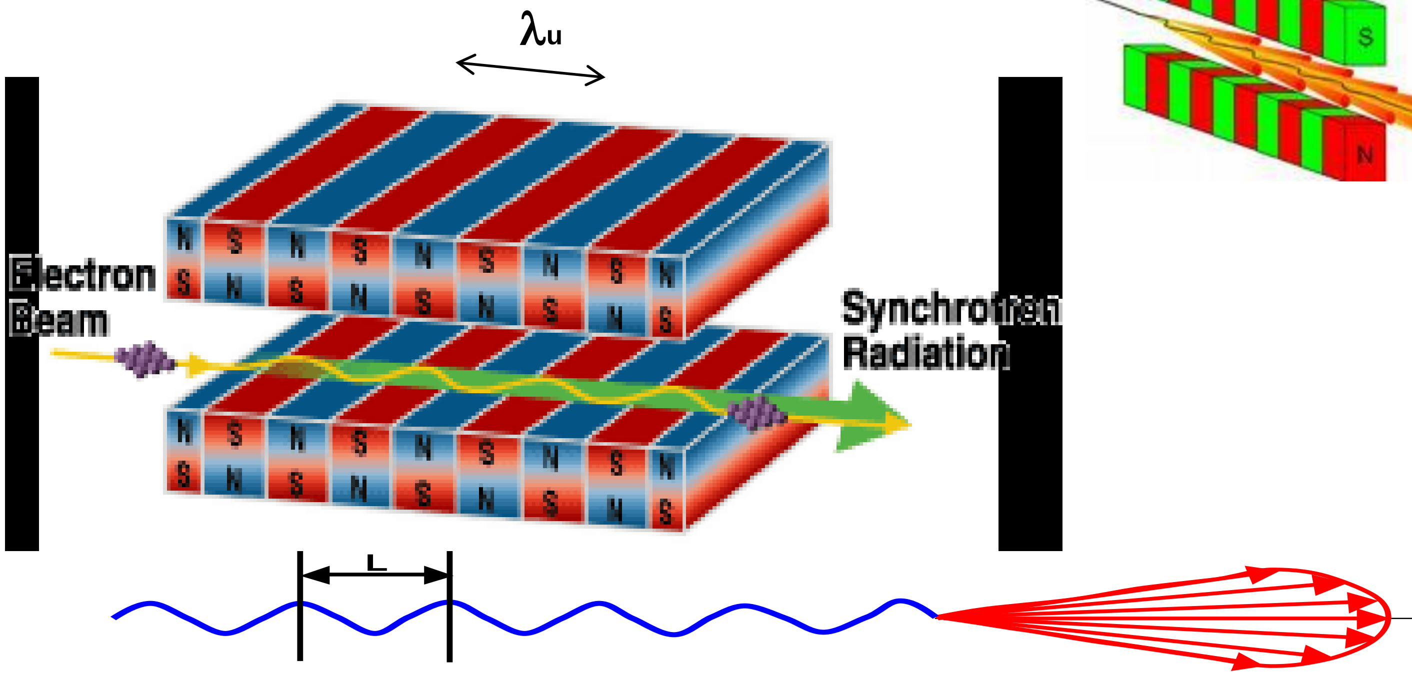
Flujo de fotones emitido por una fuente de 3 GeV y una corriente de 250 mA

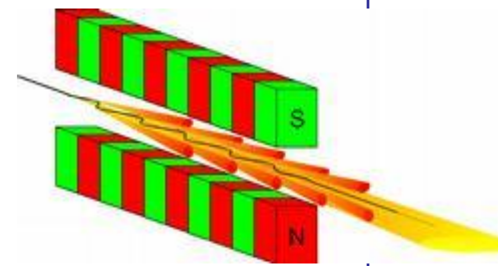


Wiggler

5. DISPOSITVOS DE INSERCION

Ondulador





Trayectoria de un haz de electrones en un ondulador (línea azul). Las flechas rojas simbolizan la radiación sincrotrón emitida. En este caso tiene lugar un fenómeno de interferencia. *Parámetro de deflexión K <<1*

6. COMPONENTES TÉCNICOS

INYECTOR

- **Cañón de electrones**
- **Linac**: acelerador lineal

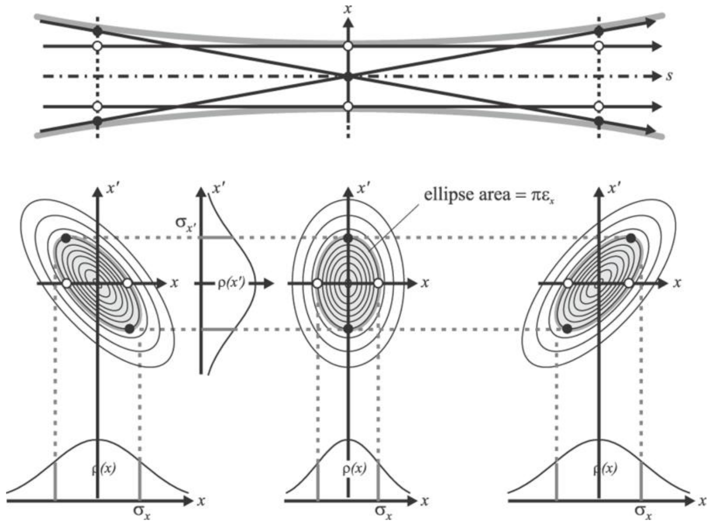
BOOSTER + ANILLO DE ACUMULACIÓN:

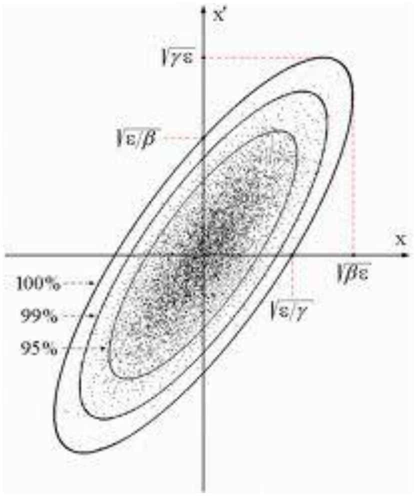
- **Red magnética** (lattice)
  - Conjunto de imanes
    - Dipolos: curvan la trayectoria del haz
    - Cuadrupolos: focalizan
    - Sextupolos: correcciones de las órbitas.
  - Fija propiedades básicas haz:"emitancia",dimensiones (**dinámica transversal**)

- **Sistema de RF**
  - Fuentes de alimentación, guías de ondas
  - Cavidades RF
  - Acelera (Booster) y/o suministra al haz la energía perdida como radiación sincrotrón (anillo de acumulación) (**dinámica longitudinal)**

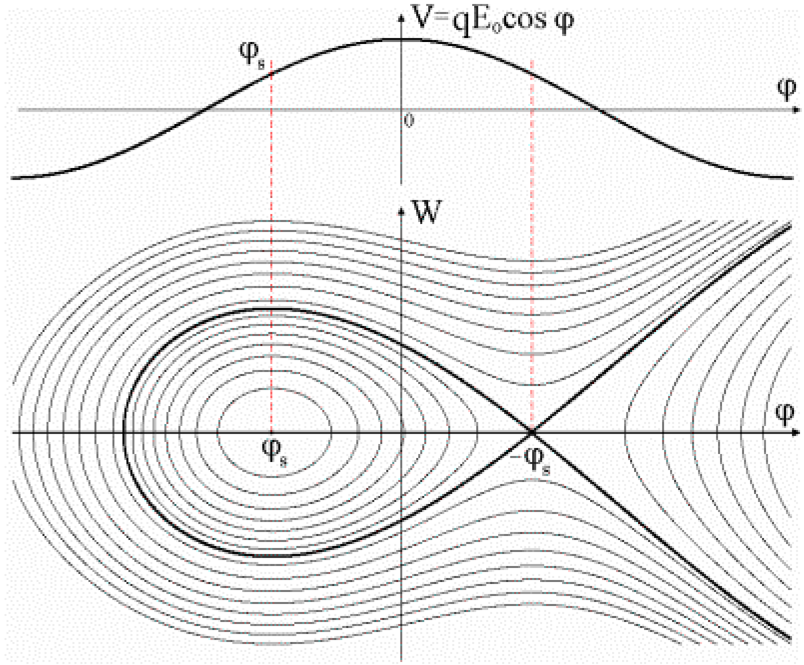
6. COMPONENTES TÉCNICOS

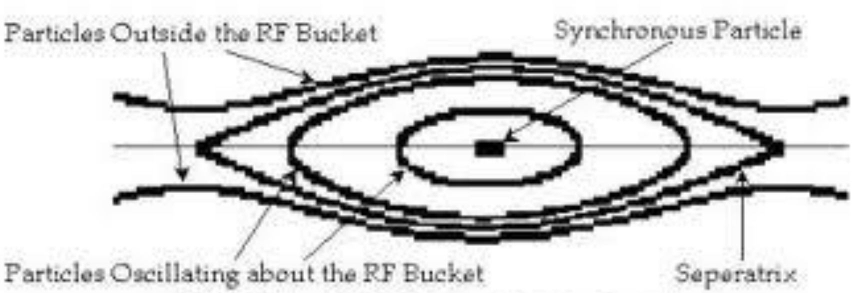
Dinámica transversal: red magnética





Dinámica longitudinal: sistema RF





An RF Bucket With Various Particle Trajectories

6. COMPONENTES TÉCNICOS

BOSTER+ ANILLO DE ACUMULACIÓN (continuación):

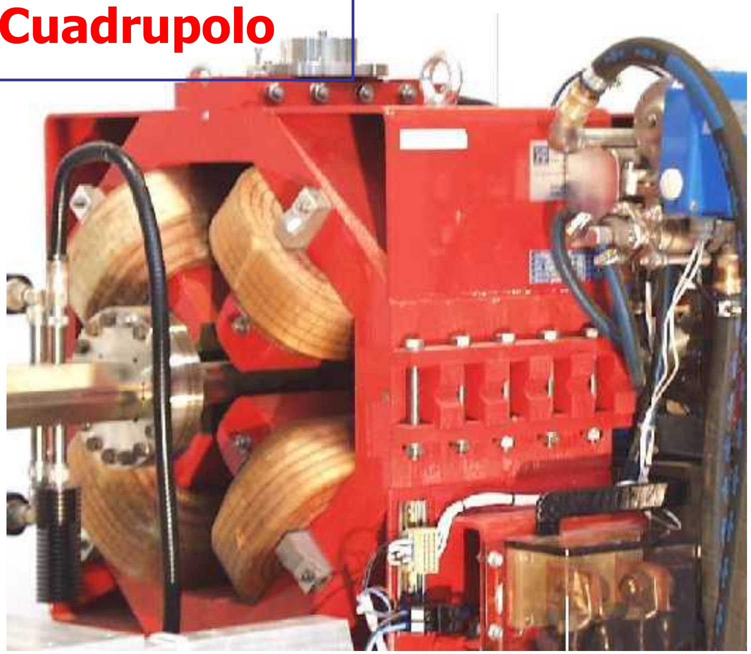
- **Sistema de alto (booster)/ultraalto (anillo de acumulación) vacío**
  - El haz de electrones circula en un tubo en ultraltovacío, (P=10^{-9}-10^{-10} torr) para mantener su intensidad (1/2 de la inicial tras 5-50 horas).

6. COMPONENTES TÉCNICOS

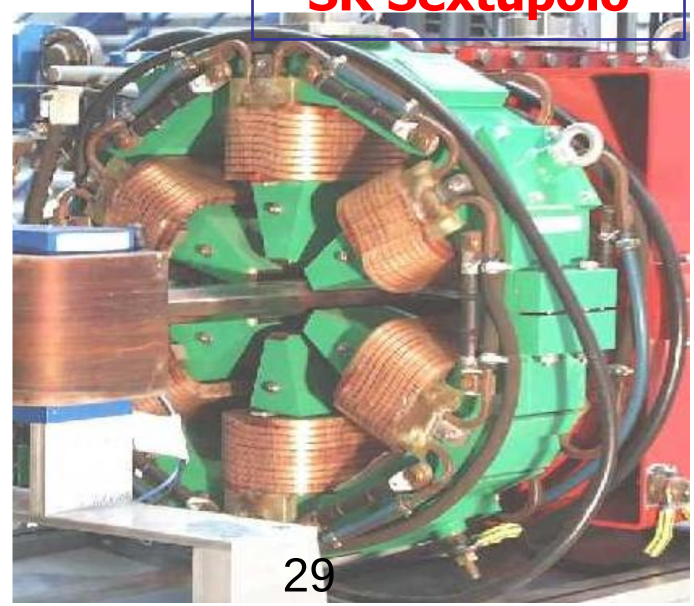
IMANES

SR Dipolo

SR Cuadrupolo

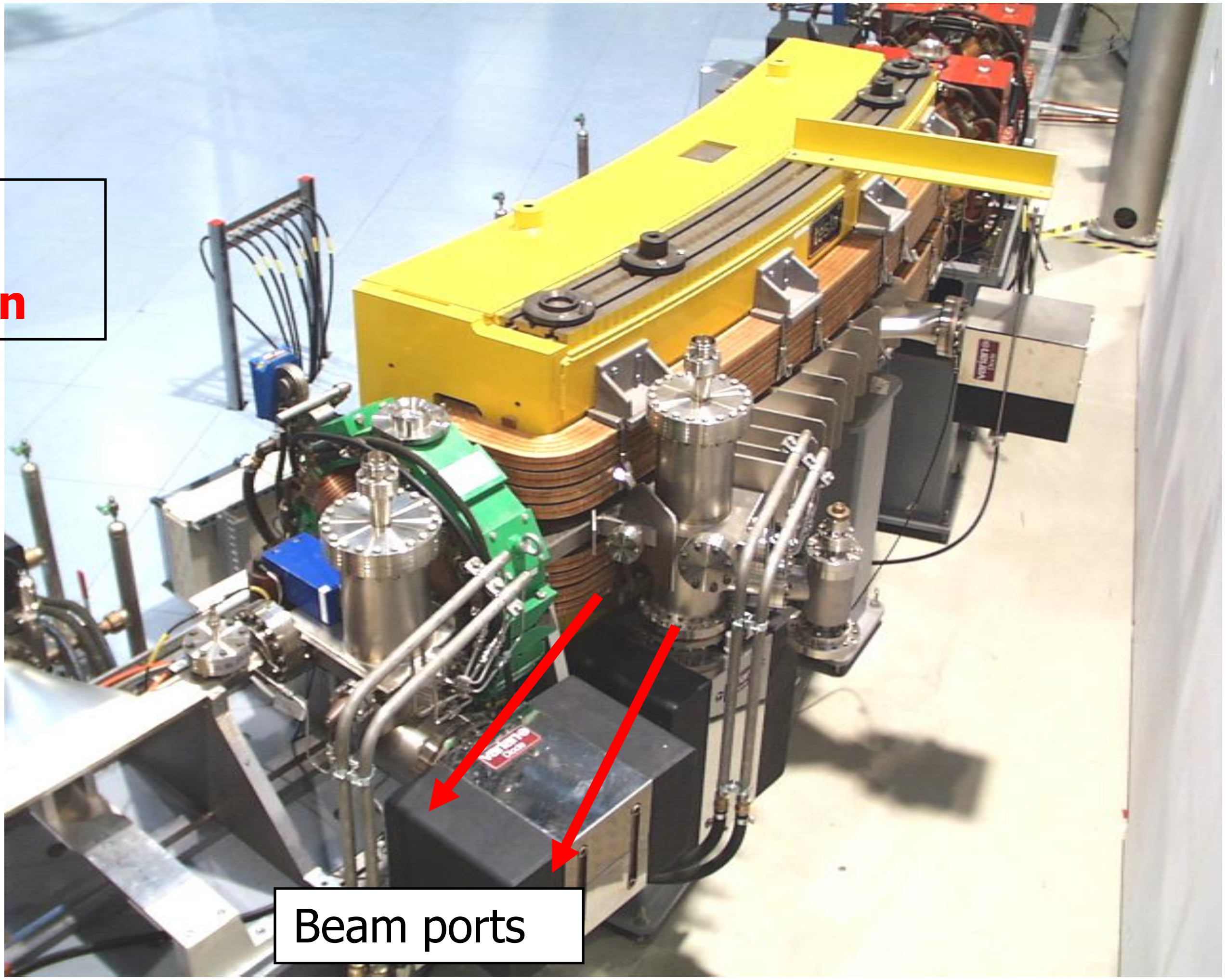


SR Sextupolo



6. COMPONENTES TÉCNICOS

Imán de curvatura
y línea de extracción



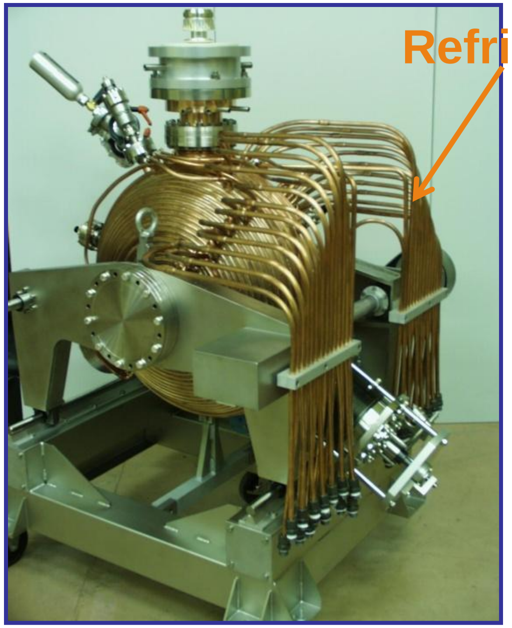
Beam ports

Courtesy: E.Huttel, ANKA

6. COMPONENTES TÉCNICOS

Sistemas de Radio Frecuencia

Refrigeración

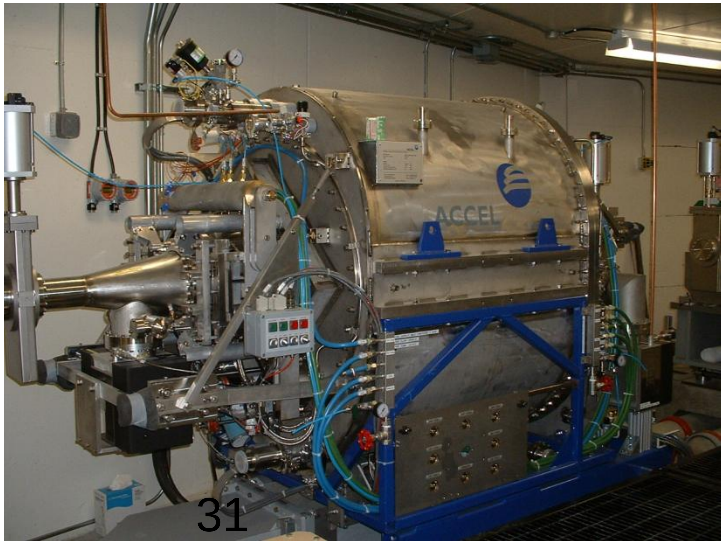


Alimentación: guías de ondas

Convencional

Vista general

Superconductor

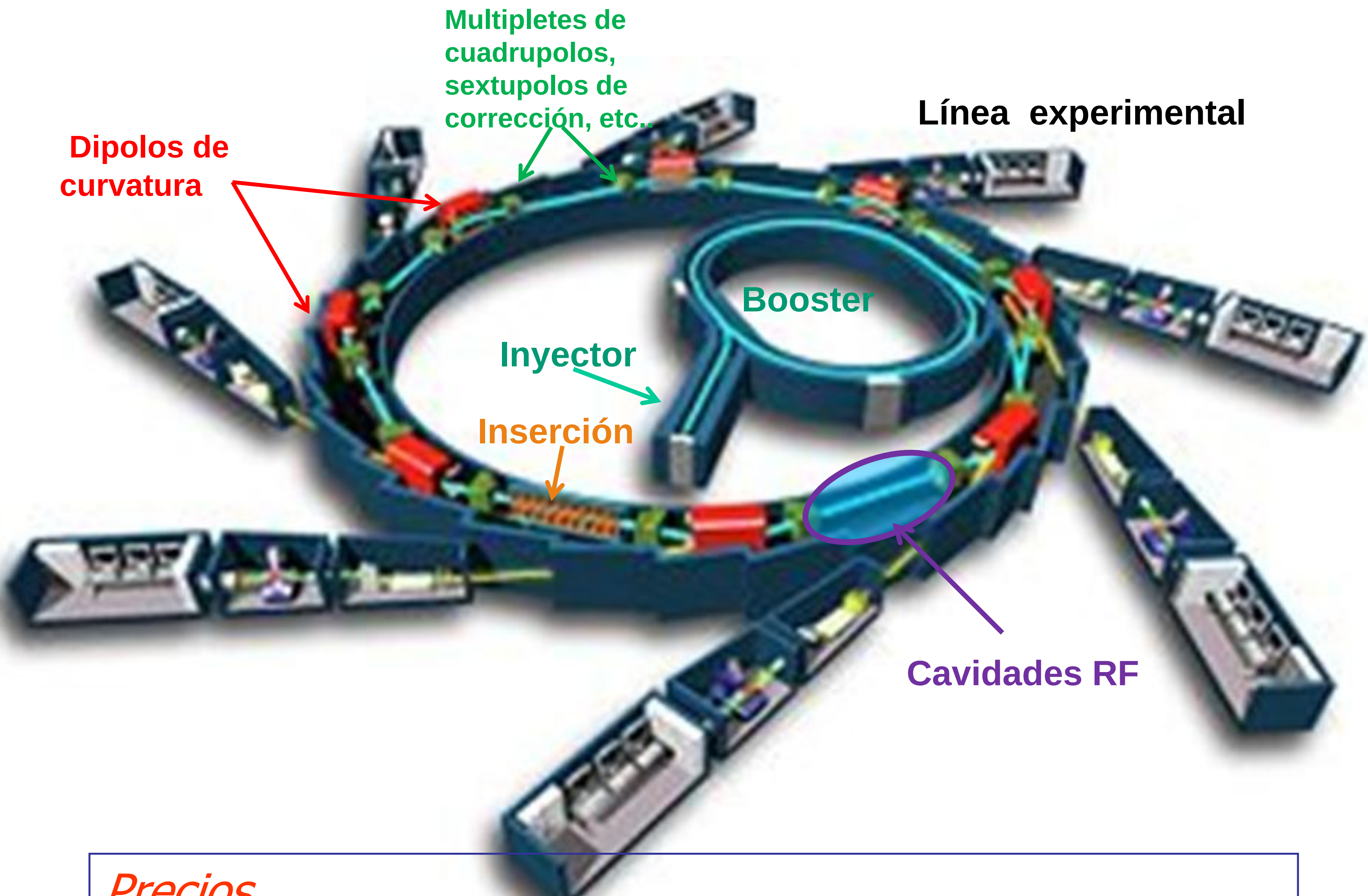


6. COMPONENTES TÉCNICOS

Montaje de un sector de vacío en el Swiss Light Source

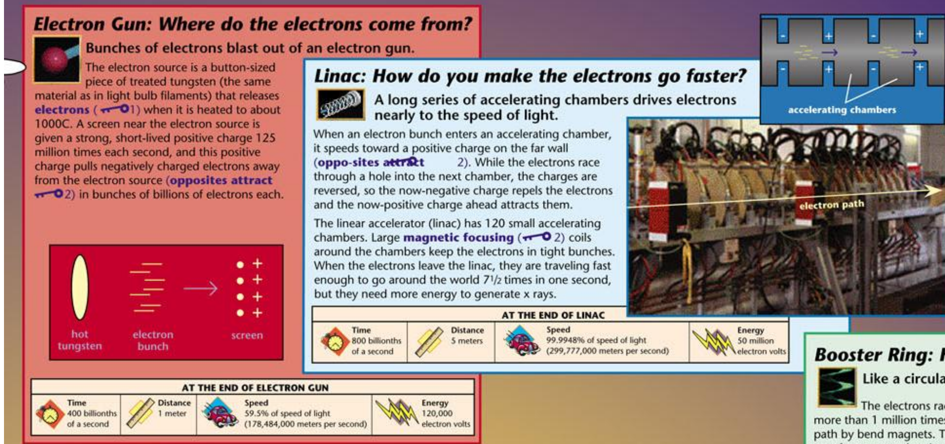
Vacio

Cortesia de L.Rivkin, SLS



Precios

- *Anillo 3ª generación, 90 m y 3 GeV de energía: 160 millones de euros (más otros tantos para la construcción de "beam-lines")*



Electron Gun: Where do the electrons come from?

Bunches of electrons blast out of an electron gun.

The electron source is a button-sized piece of treated tungsten (the same material as in light bulb filaments) that releases **electrons** (1) when it is heated to about 1000C. A screen near the electron source is given a strong, short-lived positive charge 125 million times each second, and this positive charge pulls negatively charged electrons away from the electron source (**opposites attract** 2) in bunches of billions of electrons each.

AT THE END OF ELECTRON GUN			
Time 400 billionths of a second	Distance 1 meter	Speed 59.5% of speed of light (178,484,000 meters per second)	Energy 120,000 electron volts

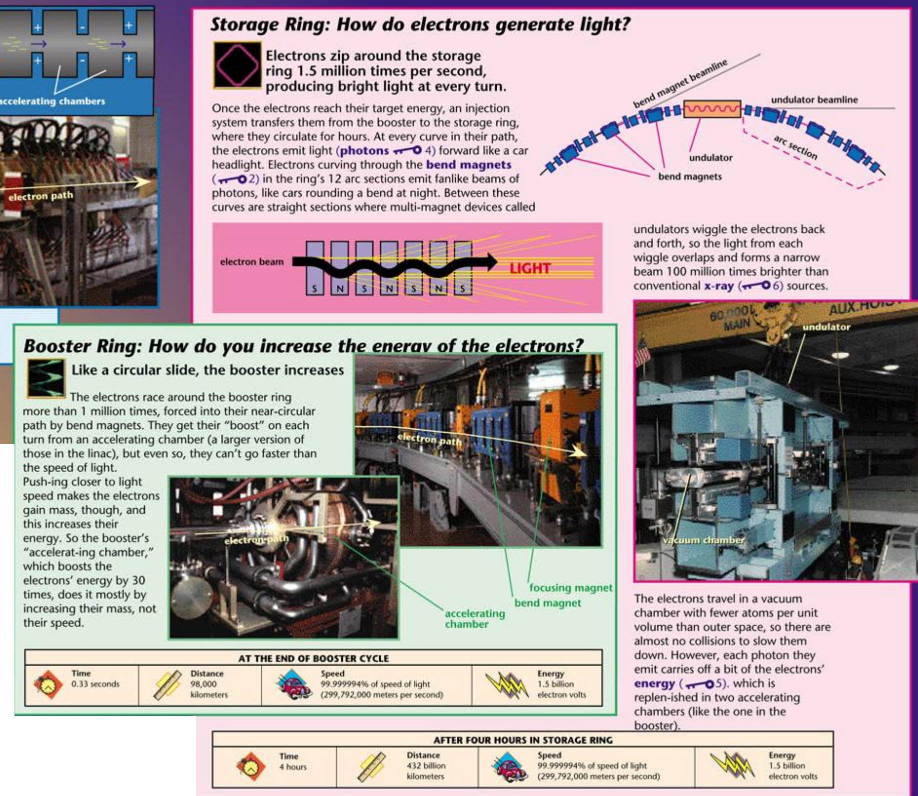
Linac: How do you make the electrons go faster?

A long series of accelerating chambers drives electrons nearly to the speed of light.

When an electron bunch enters an accelerating chamber, it speeds toward a positive charge on the far wall (**oppo-sites attract** 2). While the electrons race through a hole into the next chamber, the charges are reversed, so the now-negative charge repels the electrons and the now-positive charge ahead attracts them.

The linear accelerator (linac) has 120 small accelerating chambers. Large **magnetic focusing** (2) coils around the chambers keep the electrons in tight bunches. When the electrons leave the linac, they are traveling fast enough to go around the world 7½ times in one second, but they need more energy to generate x rays.

AT THE END OF LINAC			
Time 800 billionths of a second	Distance 5 meters	Speed 99.9948% of speed of light (299,777,000 meters per second)	Energy 50 million electron volts



Storage Ring: How do electrons generate light?

Electrons zip around the storage ring 1.5 million times per second, producing bright light at every turn.

Once the electrons reach their target energy, an injection system transfers them from the booster to the storage ring, where they circulate for hours. At every curve in their path, the electrons emit light (**photons** 4) forward like a car headlight. Electrons curving through the **bend magnets** (2) in the ring's 12 arc sections emit fanlike beams of photons, like cars rounding a bend at night. Between these curves are straight sections where multi-magnet devices called undulators wiggle the electrons back and forth, so the light from each wiggle overlaps and forms a narrow beam 100 million times brighter than conventional **x-ray** (6) sources.

The electrons travel in a vacuum chamber with fewer atoms per unit volume than outer space, so there are almost no collisions to slow them down. However, each photon they emit carries off a bit of the electrons' **energy** (5), which is replen-ished in two accelerating chambers (like the one in the booster).

AFTER FOUR HOURS IN STORAGE RING			
Time 4 hours	Distance 432 billion kilometers	Speed 99.999994% of speed of light (299,792,000 meters per second)	Energy 1.5 billion electron volts

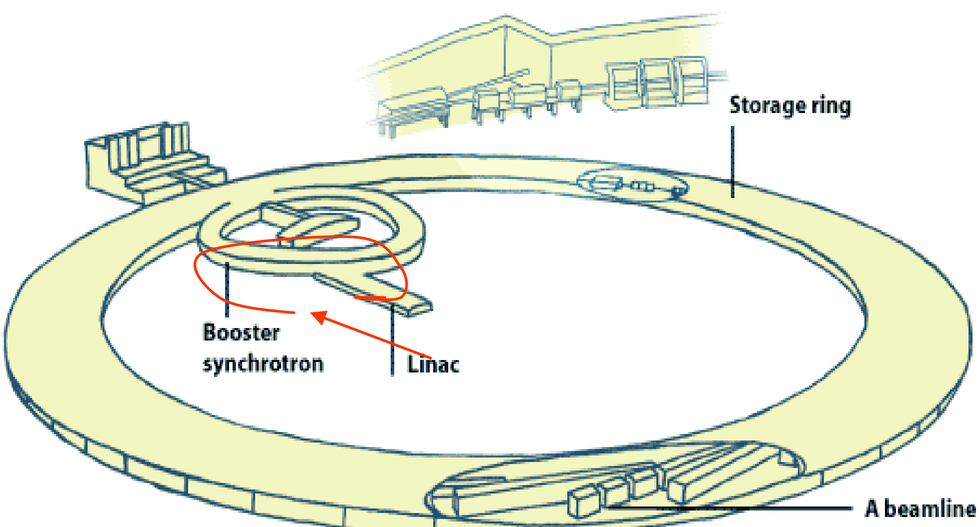
Booster Ring: How do you increase the energy of the electrons?

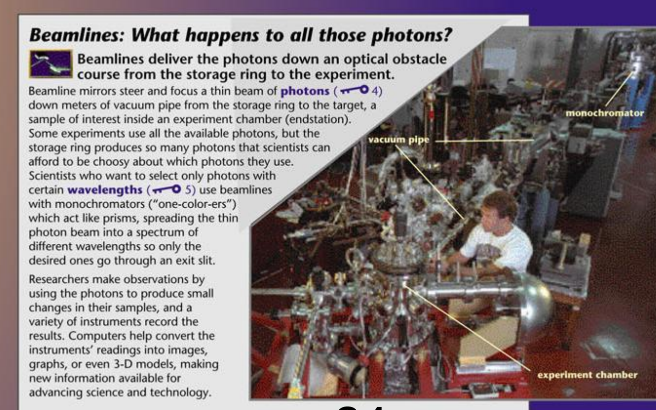
Like a circular slide, the booster increases

The electrons race around the booster ring more than 1 million times, forced into their near-circular path by bend magnets. They get their "boost" on each turn from an accelerating chamber (a larger version of those in the linac), but even so, they can't go faster than the speed of light. Push-ing closer to light speed makes the electrons gain mass, though, and this increases their energy. So the booster's "accelerat-ing chamber," which boosts the electrons' energy by 30 times, does it mostly by increasing their mass, not their speed.

AT THE END OF BOOSTER CYCLE			
Time 0.33 seconds	Distance 98,000 kilometers	Speed 99.999994% of speed of light (299,792,000 meters per second)	Energy 1.5 billion electron volts

Viaje de los electrones desde el cañón, al linac, booster y anillo





Beamlines: What happens to all those photons?

Beamlines deliver the photons down an optical obstacle course from the storage ring to the experiment.

Beamline mirrors steer and focus a thin beam of **photons** (4) down meters of vacuum pipe from the storage ring to the target, a sample of interest inside an experiment chamber (endstation). Some experiments use all the available photons, but the storage ring produces so many photons that scientists can afford to be choosy about which photons they use. Scientists who want to select only photons with certain **wavelengths** (5) use beamlines with monochromators ("one-color-ers") which act like prisms, spreading the thin photon beam into a spectrum of different wavelengths so only the desired ones go through an exit slit.

Researchers make observations by using the photons to produce small changes in their samples, and a variety of instruments record the results. Computers help convert the instruments' readings into images, graphs, or even 3-D models, making new information available for advancing science and technology.

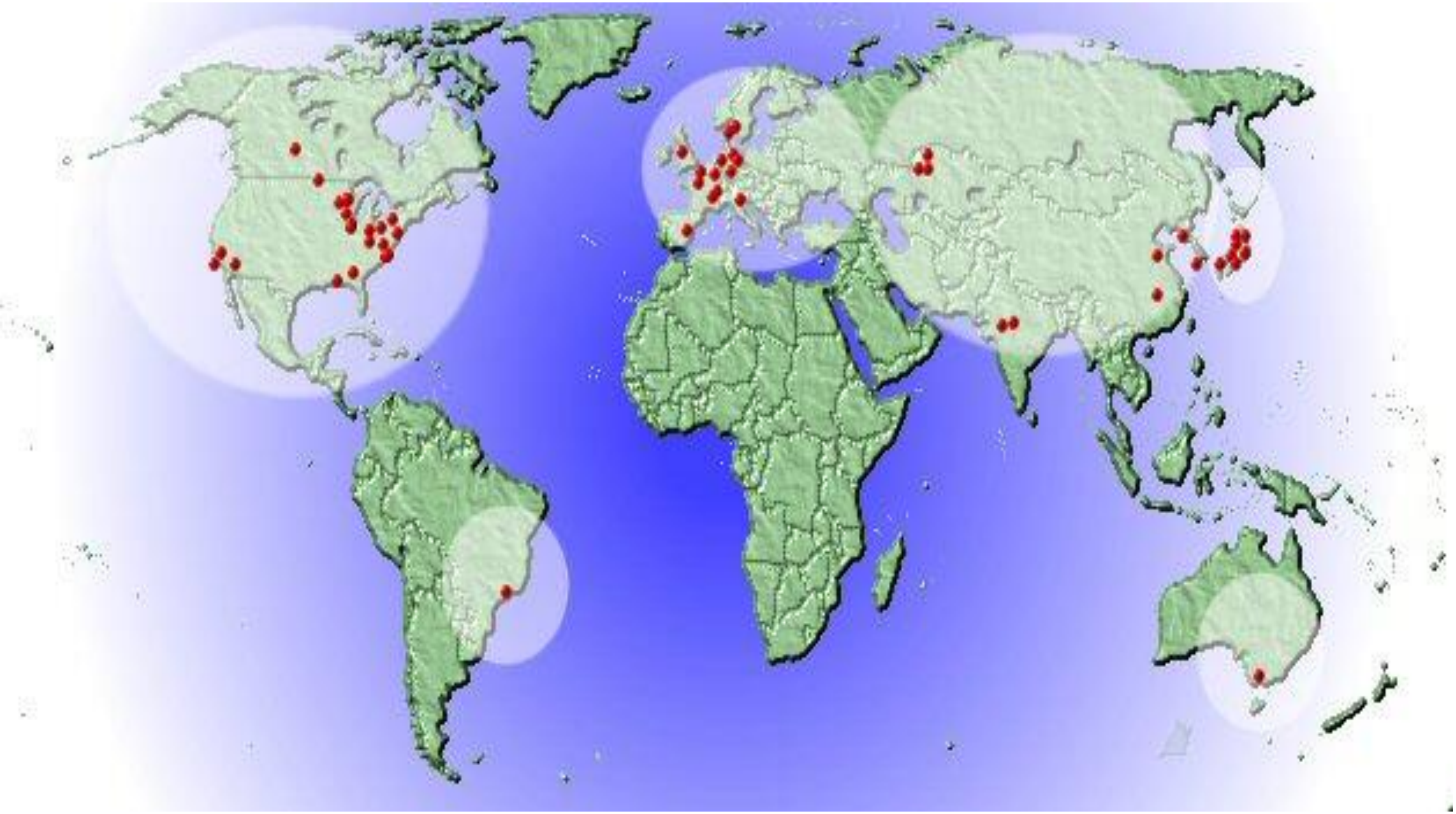
7. Los tres mayores sincrotrones del mundo

ESRF, Europa-France

APS, USA

Spring-8, Japón

7. Los sincrotrones del mundo



7. Los sincrotrones del mundo

- TSRF - Laboratory of Nuclear Science - Tohuku University
- SuperSOR Light Source - Institute for Solid State Physics - University of Tokyo
- National Institute of Radiological Sciences (NIRS)
- Nano-Hana
- NSSR - Nagoya University
- UVSOR - Institute for Molecular Research
- Rits SR - MIRRORCLE-20 - MIRRORCLE-6X - Synchrotron Light Life Science Center - Ritsumeikan University
- KSR - Institute for Chemical Research - Kyoto University
- SAGA Synchrotron Light Research Center
- HISOR - Hiroshima University
- Spring8 - NewSUBARU - NIJI-III
- PF - PF-AR - NIJI-II - NIJI-IV - TERAS
- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

JAPÓN

7. Los sincrotrones del mundo

Asia

BSRF - Beijing Synchrotron Radiation Facility, P.R
CANDLE, Armenia
HSRC - Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Japan
iFEL - Institute of Free Electron Laser, Japan
INDUS 1/INDUS 2, India
IR FEL Research Center - FEL-SUT, Japan
Medical Synchrotron Radiation Facility, Japan
Nano-Hana, Japan
NSRL - National Synchrotron Radiation Laboratory, P.R. China
NSRRC - National Synchrotron Radiation Research Center, Taiwan
NSSR - Nagoya University Small Synchrotron Radiation Facility, Japan
KSR - Nuclear Science Research Facility, Japan
PAL - Pohang Accelerator Laboratory , Korea
PF - Photon Factory, KEK, Japan
Ritsumeikan University (Rits) Synchrotron Radiation Center, Japan
SAGA-LS - Saga Light Source, Japan
SESAME, Jordan
SPL - Siam Photon Laboratory, Thailand
SPring-8, Japan
SSLS - Singapore Synchrotron Light Source, Singapore
SSRC - Siberian Synchrotron Research Center, Russian Federation
SSRF - Shanghai Synchrotron Radiation Facility, P.R. China
SuperSOR - SuperSOR Synchrotron Radiation Facility, Japan
TSRF - Tohoku Synchrotron Radiation Facility, Japan
UVSOR - Ultraviolet Synchrotron Orbital Radiation Facility, Japan

7. Los sincrotrones del mundo

Europe

ALBA - Synchrotron Light Facility, Spain
ANKA - Angstromquelle Karlsruhe, Germany
BESSY - Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung , Germany
CESLAB - Central European Synchrotron Laboratory, Czech Republic (external link)
CLIO - Centre Laser Infrarouge d'Orsay, France
DAFNE Light, Italy
DELSY - Dubna ELectron SYnchrotron, Russian Federation
DELTA - Dortmund Electron Test Accelerator, Germany
Diamond Light Source, UK
ELETTRA - Synchrotron Light Laboratory, Italy
ELSA - Electron Stretcher Accelerator, Germany
ESRF - European Synchrotron Radiation Facility, France
FELBE - Free-Electron Lasers at the ELBE radiation source at the FZD, Germany
FELIX - Free Electron Laser for Infrared eXperiments, The Netherlands
HASYLAB - Hamburger Synchrotronstrahlungslabor at DESY, Germany
ISA - Institute for Storage Ring Facilities, Denmark
ISI-800 - Institute of Metal Physics, Ukraine
Kharkov Institute of Physics and Technology, Ukraine
KSRS - Kurchatov Synchrotron Radiation Source, Russian Federation
MAX-lab, Sweden
MLS - Metrology Light Source, Germany
PSLS - Polish Synchrotron Light Source, Poland (external link)
SLS - Swiss Light Source, Switzerland
SOLEIL, France
TNK - F.V Lukin Institute, Russian Federation

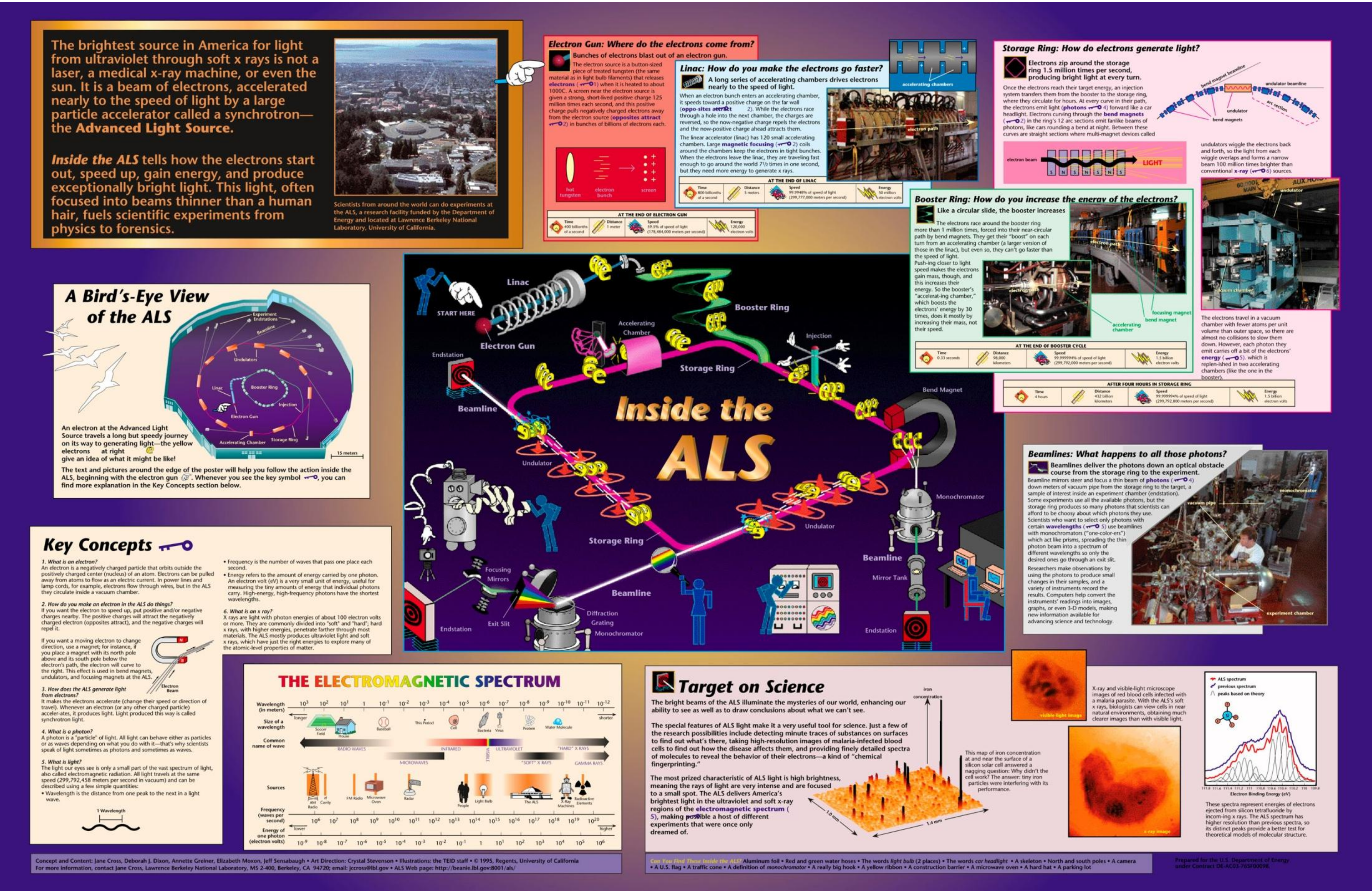
America

ALS - Advanced Light Source, USA
APS - Advanced Photon Source, USA
CAMD - Center for Advanced Microstructures & Devices, USA
CFN - Center for Functional Nanomaterials, USA
CHESS - Cornell High Energy Synchrotron Source, USA
CLS - Canadian Light Source, Canada
CNM - Center for Nanoscale Materials, USA
CTST - UCSB Center for Terahertz Science and Technology, USA
DFELL - Duke Free Electron Laser Laboratory, USA
FOUNDRY - The Molecular Foundry, USA
Jlab - Jefferson Lab, USA
LCLS - Linac Coherent Light Source, USA
LNLS - Laboratorio Nacional de Luz Sincrotron, Brazil
NSLS - National Synchrotron Light Source, USA
SRC - Synchrotron Radiation Center, USA
SSRL - Stanford Synchrotron Radiation Laboratory, USA
SURF - Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility, USA
VU FEL - W. M. Keck Vanderbilt Free-electron Laser Center, USA

Australia

AS - Australian Synchrotron

http://www.lightsources.org



http://www.lightsources.org/images/posters/alsposter1.jpg