

ACELERACIÓN DE PARTÍCULAS:

- Aceleradores
- Rayos Cósmicos

ACELERADORES

ACELERACIÓN DE PARTÍCULAS

Una partícula cargada que se mueve por una región del espacio donde hay **campo electromagnético** experimenta una **fuerza** dada por:

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

$\vec{v}$: **velocidad** de la partículas

e : **carga** de la partícula

$\vec{E}$: **campo eléctrico**

$\vec{B}$: **campo magnético**

ACELERACIÓN DE PARTÍCULAS (cont.)

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

fuerza de Lorentz:



Como esta fuerza es el resultado de un producto vectorial, será perpendicular a la velocidad y al campo magnético.

Al ser perpendicular a la velocidad de la carga, también lo es a su trayectoria, por lo cual dicha **fuerza no realiza trabajo sobre la carga**, lo que supone que **no hay cambio de energía cinética**, o lo que es lo mismo, no cambia el módulo de la velocidad.

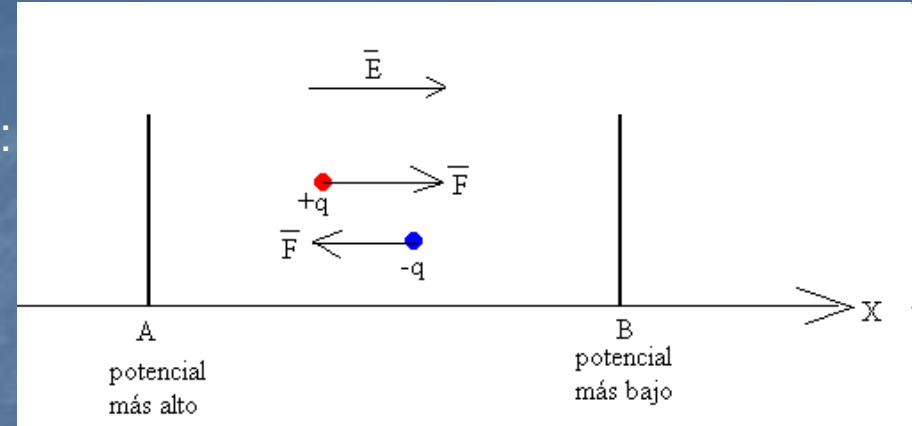
Al ser perpendicular a la velocidad **modifica la dirección del movimiento de la partícula.**

ACELERACIÓN DE PARTÍCULAS (cont.)

➔ Por lo tanto,
la ganancia de energía será:

$$\begin{aligned}\frac{dE}{dt} &= e\vec{v} \cdot \vec{E} \\ &= e \frac{d\vec{r}}{dt} \cdot \vec{\nabla} V\end{aligned}$$

donde V es el
potencial escalar



Tomando el caso
unidimensional:

$$\Delta E = e \frac{\partial V}{\partial r} dr = e \Delta V$$

La forma más sencilla de acelerar una carga
es someterla a una diferencia de potencial.

ACELERACIÓN DE PARTÍCULAS (cont.)

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

La **fuerza de Lorentz**, al ser perpendicular a la velocidad, modifica la dirección del movimiento de la partícula, manteniéndose constante el módulo de la velocidad. Este cambio de dirección es debido a que la fuerza actúa como **fuerza centrípeta**, originando un **movimiento de rotación** de la partícula en el interior del campo magnético.

Ambas contribuciones en el segundo miembro de la ecuación juegan un papel en la **aceleración de partículas en ciclotrones y otros aceleradores artificiales**

ACCELERADORES

Accelerators were invented to provide energetic particles to investigate the structure of the atomic nucleus.

Since then, they have been used to investigate many aspects of particle physics.

Their job is to speed up and increase the energy of a beam of particles by generating:

- electric fields that accelerate the particles, and
- magnetic fields that steer and focus them.

ACELERADORES: Ciclotrón

El primer acelerador moderno fue el **ciclotrón de Lawrence**, desarrollado en Berkeley, entre 1928 y 1931.

El instrumento consta de dos placas semi-circulares donde un **campo magnético uniforme, perpendicular** al plano de las placas, puede deflectar a las partículas cargadas.

El **radio de giro** de las partículas es:

$$r_g = \frac{(E/eV)}{300z(B/G)} \text{ cm}$$

Resulta de igualar la fuerza centrípeta con la fuerza magnética:

$$F_c \equiv m \frac{v^2}{r} = \frac{zevB}{c} \equiv F_m$$

La **velocidad máxima** alcanzada es:

$$v_{\max} = \frac{ze r_{\max} B}{mc}$$

La **velocidad angular**

$$\Omega = \frac{v}{R} = \frac{eB}{m}$$

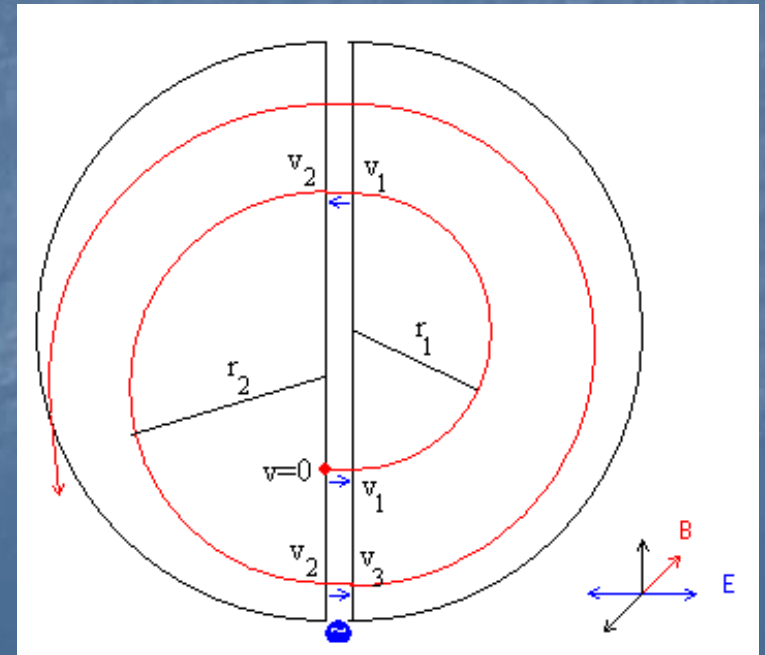
es independiente de v y r .

ACELERADORES: Ciclotrón (cont.)

- Separando las dos regiones semi-circulares hay una **brecha** (gap) donde se **aplica una diferencia de potencial**.
- Las **partículas se inyectan en el gap** (por ejemplo, colocando un material radio-activo) y **son aceleradas por la diferencia de potencial**.
- Debido a los **efectos del campo magnético**, las partículas describen una semi-circunferencia y **vuelven a cruzar el gap**, donde la diferencia de potencial ha sido invertida durante el tiempo de vuelo.
- Las partículas entran en la otra semi-circunferencia con una **velocidad mayor** por lo que describirán una semicircunferencia de **mayor radio**, pero con la misma frecuencia:

$$\Omega = \frac{v}{R} = \frac{eB}{m}$$

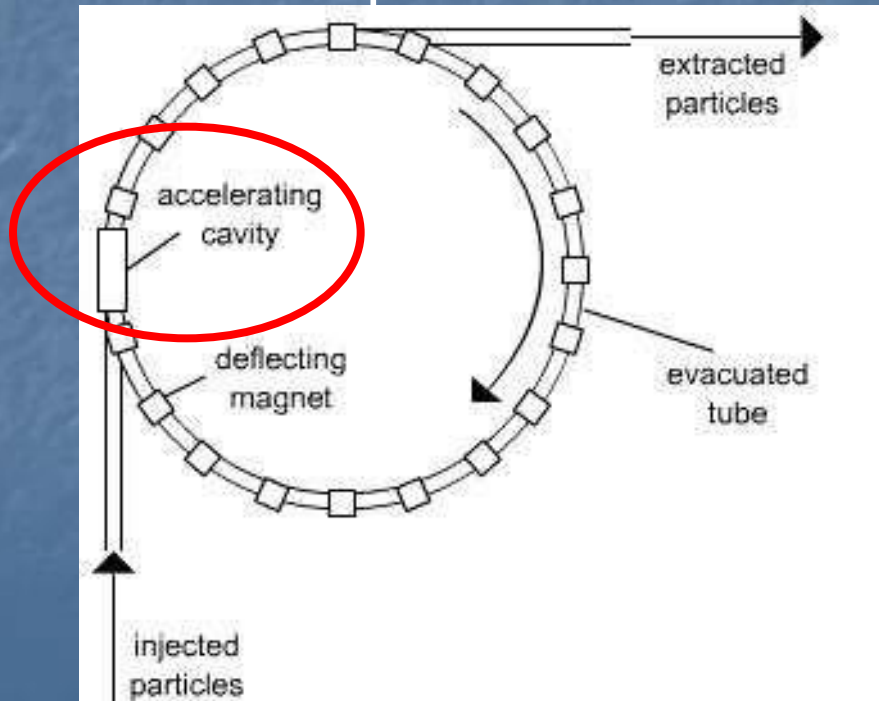
- El proceso se repite una y otra vez (cíclicamente), generándose más y más energía, hasta que el giroradio de la partícula se hace igual al máximo espacio disponible.



ACELERADORES: Sincrotrón

A fin de lograr mayores energías se desarrollaron los **sincrotrones**:

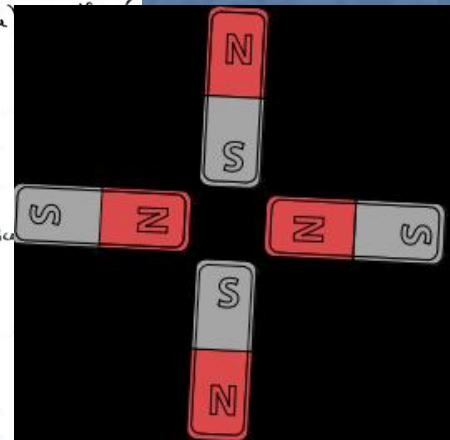
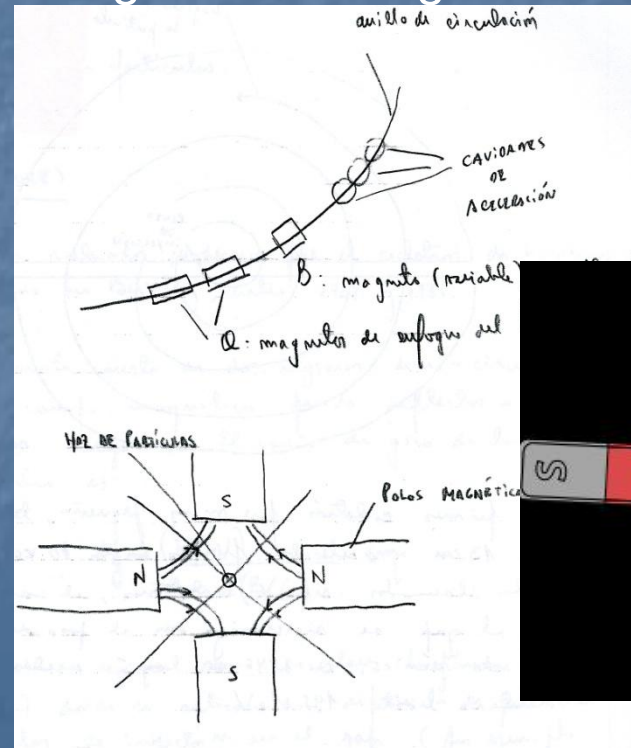
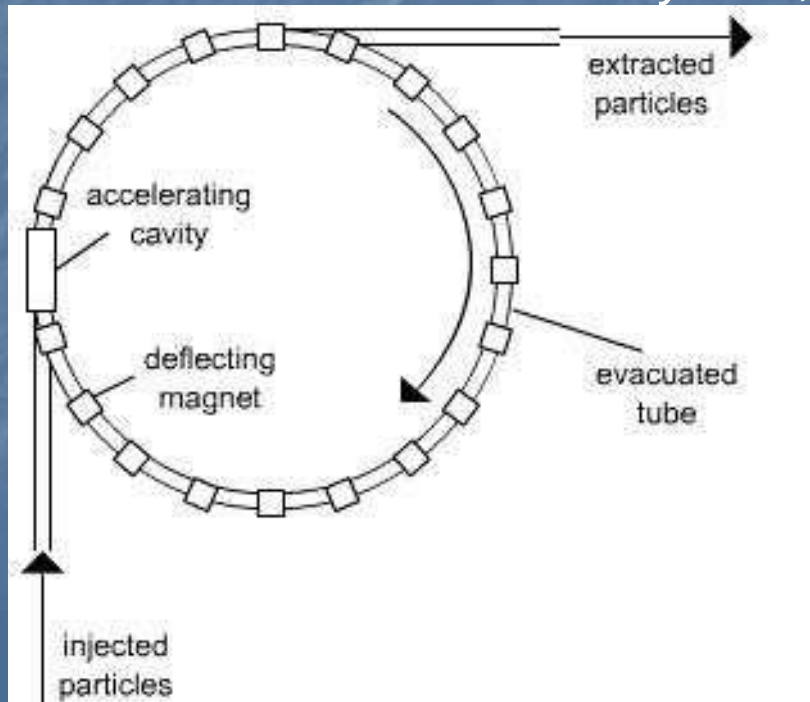
- En estos las partículas se mueven a lo largo de una **trayectoria circular fija** y se utilizan **campos magnéticos variables**.
- Las diferencias de potencial se aplican en diferentes tramos del circuito por el cual se mueve el haz de partículas.



ACELERADORES: Sincrotrón

Se utilizan **magnetos cuadrupolares** para mantener el haz de partículas bien colimado y **magnetos superconductores** para desviar el haz y mantenerlo dentro del anillo de circulación.

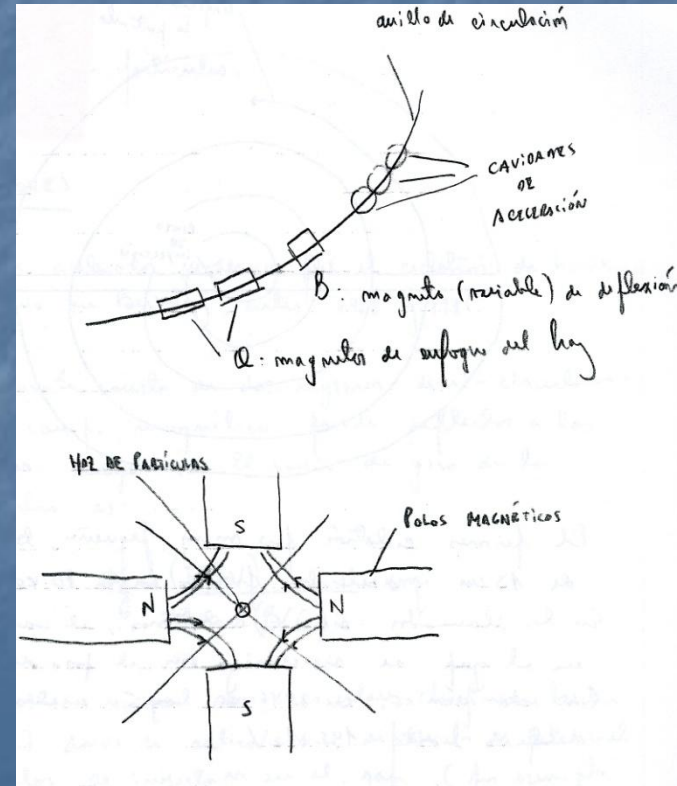
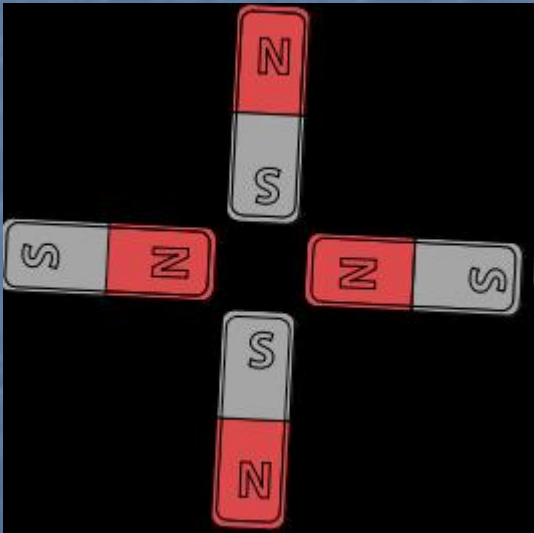
A **superconducting magnet** is an electromagnet made from coils of superconducting wire. They must be cooled to cryogenic temperatures during operation. In its superconducting state the wire can conduct much larger electric currents than ordinary wire, creating intense magnetic fields.



ACELERADORES: Sincrotrón

Magneto cuadrupolar

Quadrupole magnets consist of groups of four magnets laid out so that in the multipole expansion of the field the dipole terms cancel and where the lowest significant terms in the field equations are quadrupole. Quadrupole magnets are useful as they create a magnetic field whose magnitude grows rapidly with the radial distance from its longitudinal axis. This is used in particle beam focusing.



ACELERADORES: Sincrotrón

Magneto cuadrupolar

A quadrupole electromagnet as used in the *storage ring* of the Australian Synchrotron



Synchrotron magnet prototypes

Prototypes of the magnets used in the synchrotron storage ring. The large yellow one forces electrons to turn a corner, creating high intensity light.

The smaller green and red magnets help focus and steer the electrons.

ACELERADORES: Sincrotrón

The **Australian Synchrotron** is a **3 GeV synchrotron radiation** facility built in Melbourne, Victoria, and opened on 31 July 2007.

The Australian Synchrotron is a **light source facility** (in contrast to a *collider*).

It uses particle accelerators to produce a beam of high energy electrons which are placed within a **storage ring** (4) that circulates the electrons to create synchrotron light.

The light is directed down separate beamlines at the end of which may be placed a variety of experimental equipment contained within the endstations (6).



ACELERADORES: Sincrotrón

A quadrupole electromagnet as used in the *storage ring* of the Australian Synchrotron



A **storage ring** is a type of circular particle accelerator in which a continuous or pulsed particle beam may be kept circulating for a long period of time, up to many hours.

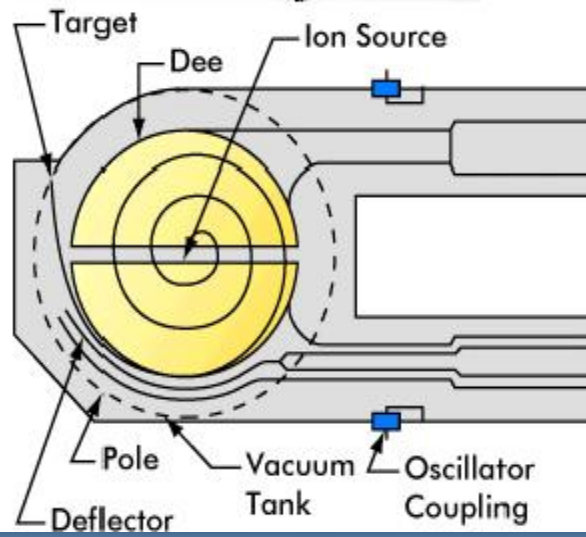
Storage of a particular particle depends upon the mass, energy and usually charge of the particle being stored.

Most commonly, storage rings are to store electrons, positrons, or protons.

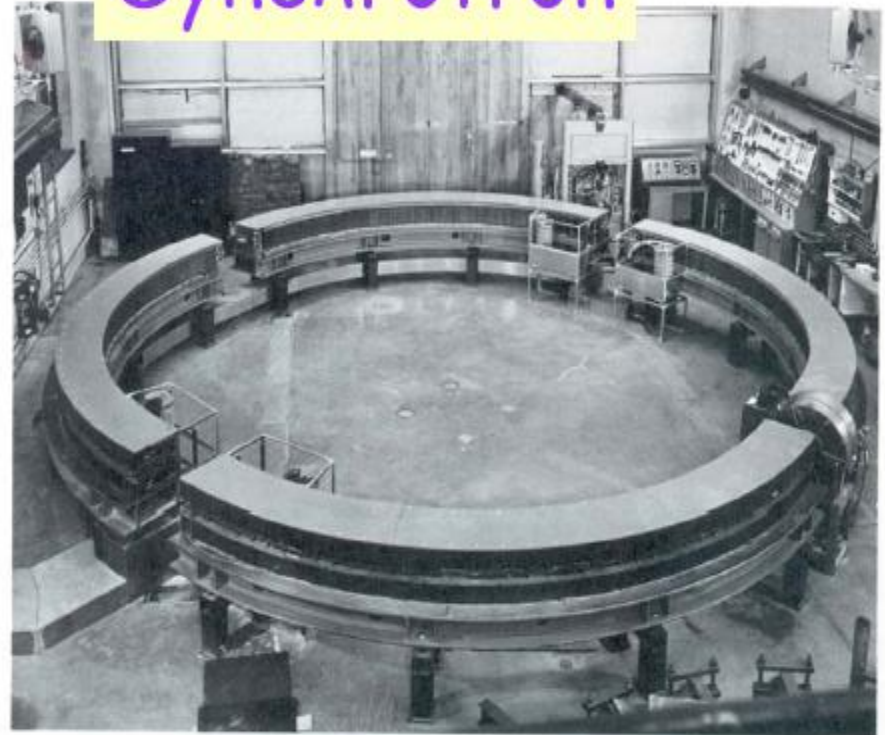
The most common application of storage rings is to store electrons which then radiate [synchrotron radiation](#).

Early Accelerators

Cyclotron



Synchrotron



accelerated by passing through regions of electric field generated by a radio frequency oscillator. The radius of curvature can be obtained by equating the centripetal force mv^2/R to the magnetic force evB :

Figure 31-5. Early Cornell electron synchrotron before inversion of the donut-shaped vacuum tank. Electric field for acceleration is in the cavity at the right.

ACELERADORES: Sincrotrón (cont.)

La **energía máxima** que se puede obtener está determinada por:

- ❖ La intensidad máxima de los campos magnéticos.
- ❖ El tamaño del anillo.
- ❖ Las pérdidas de las partículas (por radiación sincrotrón).

ACELERADORES: Sincrotrón (cont.)

Large Electron-Positron Collider (LEP)

del CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, creado el 1 de julio de 1957, en Meyrin, cerca de Ginebra) y operó entre 1989 y 2000:

- usó 1312 magnetos de enfoque, 3304 magnetos de deflexión y un anillo de 27 km de circunferencia situado 100 m bajo tierra.
- los e^- y e^+ se aceleraban hasta 50 GeV y colisionaban “de frente”, generando un gran número de partículas Z^0 (bosones que surgen como consecuencia de la perturbación del campo débil)

BOSONES Fueron descubiertos en el CERN, en 1983,
con el Super Proton Synchrotron (SPS) del CERN
(con 7 km de circunf.)
aunque su existencia y características generales
habían sido predichas mucho antes.

Existen dos tipos de **bosones W**:
uno con carga eléctrica positiva igual a la carga elemental y el
otro con la misma carga pero negativa. Se simbolizan W^+ y W^-
y ambos son respectivamente antipartículas del otro.
El **bosón Z es eléctricamente neutro**, y es su propia antipartícula.

ACELERADORES: Sincrotrón (cont.)

Large Electron-Positron Collider (LEP)

del CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, creado el 1 de julio de 1957, en Meyrin, cerca de Ginebra) y operó entre 1989 y 2000:

➤ En 1996 se convirtió en LEP2, alcanzando mayores energías máximas (130 -200 GeV) que permitieron producir pares W^+ y W^- , equivalentes a bosones Z^0 pero con carga (sus masas son del orden de 65 y 80 GeV/c², respectivamente.)

ACELERADORES: Sincrotrón (cont.)



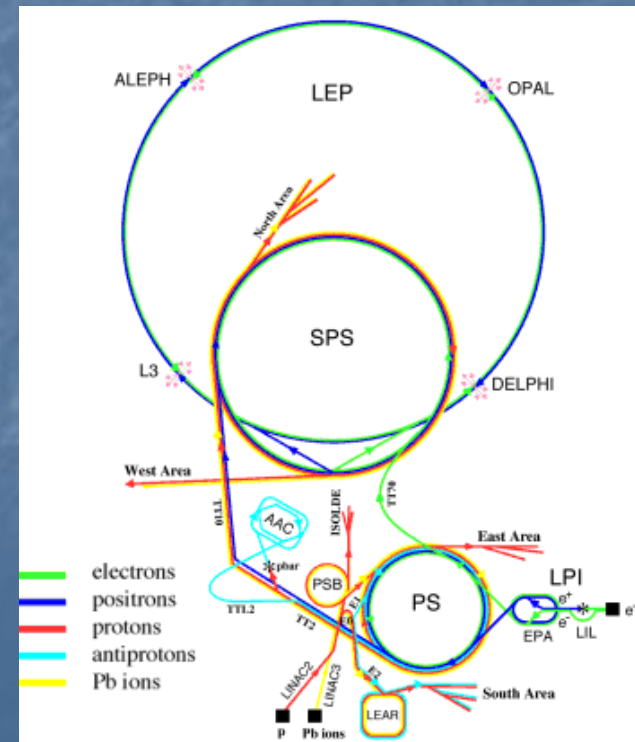
CERN

Notable "firsts" were the Intersecting Storage Rings (ISR) proton-proton collider commissioned in 1971, and the proton-antiproton collider at the **Super Proton Synchrotron (SPS)**, which came on the air in 1981 and produced the massive W and Z particles two years later, confirming the unified theory of electromagnetic and weak forces.

LEP:

Existían ocho puntos de colisión, en cuatro de los cuales había instalados varios experimentos:

ALEPH, DELPHI, L3 y OPAL



ACELERADORES: Sincrotrón (cont.)



Anillo del LEP, CERN

ACELERADORES: LINACS

Otro tipo de aceleradores son los llamados **LINACS (linear accelerator)** en los cuales las partículas se mueven a lo largo de una línea recta a través de una serie de cavidades de aceleración.

- Estos no sufren de pérdidas sincrotrón, y no necesitan de magnetos de deflexión.
- Se suelen usar como inyectores de partículas pre-aceleradas de los aceleradores sincrotrón.
- En el caso del Stanford Linear Accelerator Centre (SLAC), se usa un linac en forma directa como acelerador.
Su tubo de aceleración tiene 3 km.
Los e^- y e^+ se aceleran allí y son deflectados en los extremos para luego colisionar con energías de ~ 50 GeV.

LINAC 2, CERN



ACCELERADORES

An accelerator comes either in the form of a ring (circular accelerator), where a beam of particles travels repeatedly round a loop, or in a straight line (linear accelerator), where the beam travels from one end to the other.

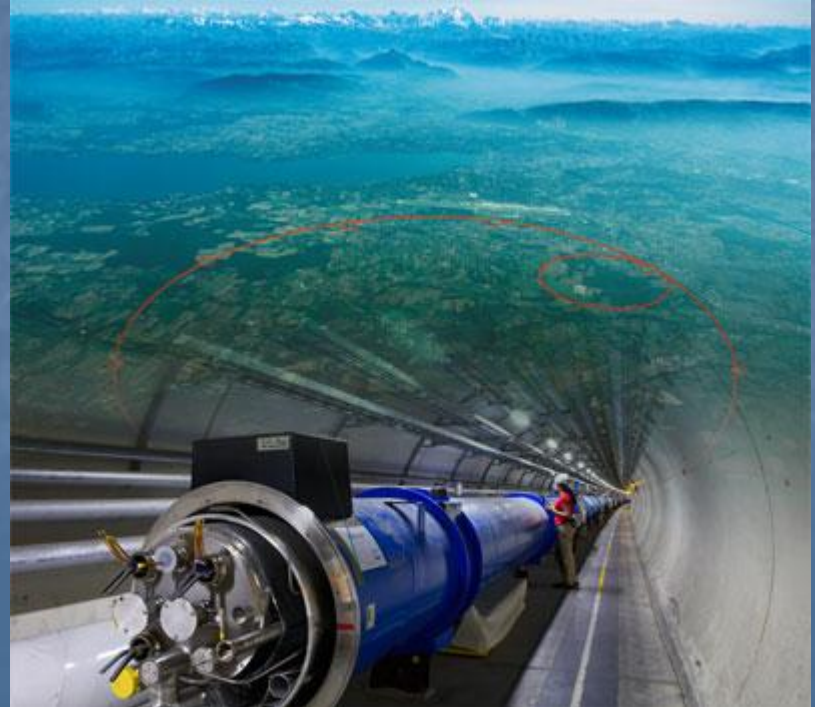
A number of accelerators may be joined together in sequence to reach successively higher energies, as at the accelerator complex at CERN.

ACELERADORES: CERN

Los principales aceleradores en el mundo son:

❖ CERN

- **LEP** Se usó durante 11 años hasta noviembre de 2000.
Colisionó e^- y e^+ hasta energías de $\sim 180 \text{ GeV}$.
- **LHC (Large Hadron Collider)**:
Se terminó de construir en el 2008.
Usa el túnel del LEP.
Se aceleran dos haces de hadrones (protones o iones de plomo) que viajan en direcciones opuestas y colisionan de frente a 14 TeV .



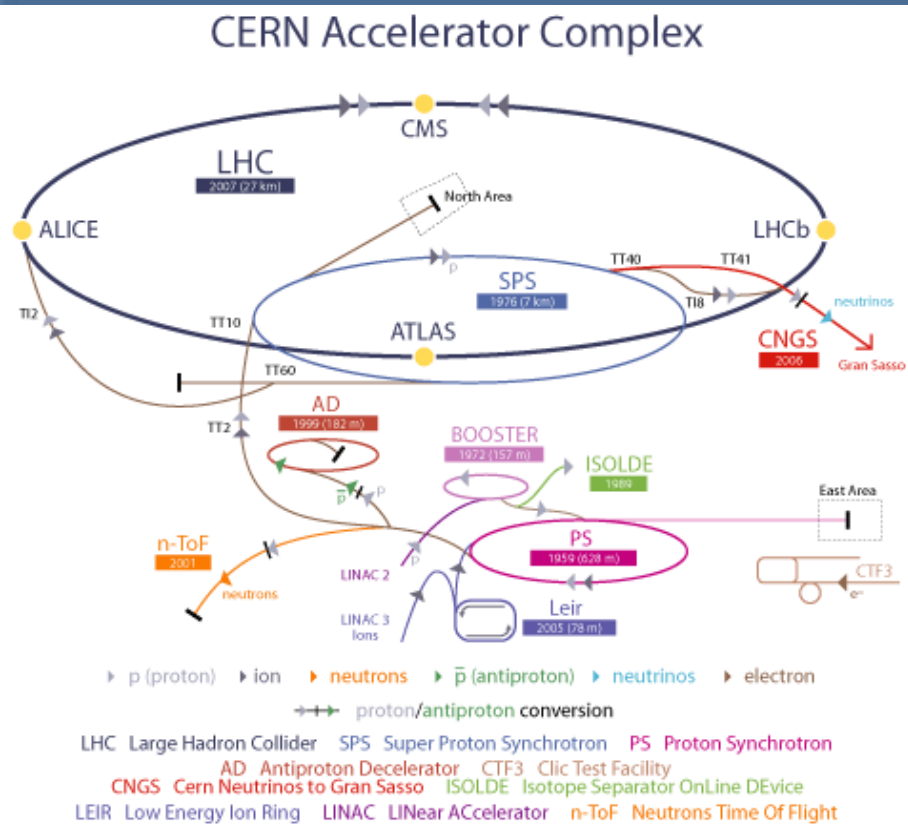
ACELERADORES: CERN (cont.)

A proton's journey to maximum acceleration

➤ *Protons* are obtained by removing electrons from hydrogen atoms. They are injected from the linear accelerator (LINAC2) into the PS Booster, then the Proton Synchrotron (PS), followed by the Super Proton Synchrotron (SPS), before finally reaching the Large Hadron Collider (LHC).

Protons will circulate in the LHC for 20 minutes before reaching the maximum speed and energy.

➤ *Lead ions* for the LHC start from a source of vaporised lead and enter LINAC3 before being collected and accelerated in the Low Energy Ion Ring (LEIR). They then follow the same route to maximum acceleration as the protons.



LHC experiments will address questions such as what gives matter its mass, what the invisible 96% of the Universe is made of, why nature prefers matter to antimatter and how matter evolved from the first instants of the Universe's existence.



LHC

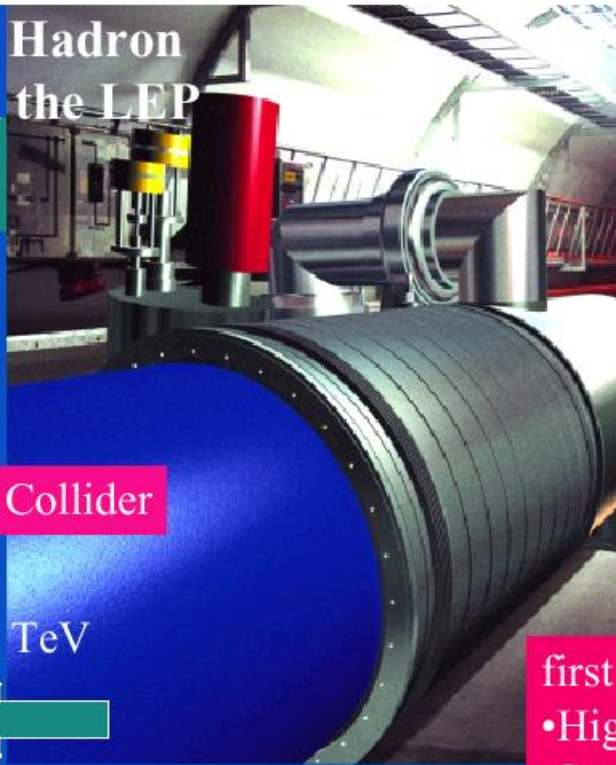
The Large Hadron Collider in the LEP Tunnel

Proton- Proton Collider

7 TeV + 7 TeV



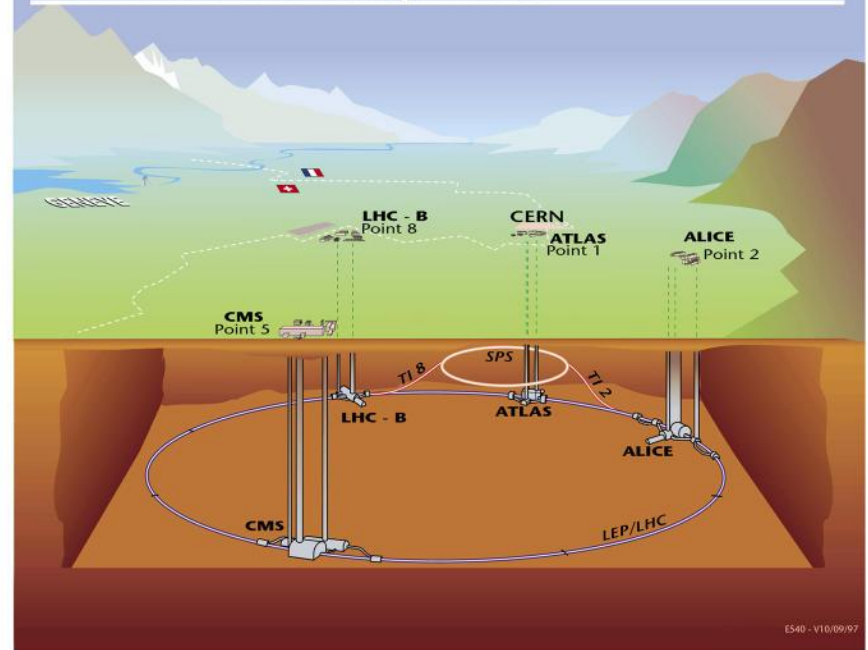
Luminosity = $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$



first targets:

- Higgs boson (s)
- Supersymmetric Particles
- Quark-Gluon Plasma
- CP violation in B

Overall view of the LHC experiments.



ES40 - V10/09/97

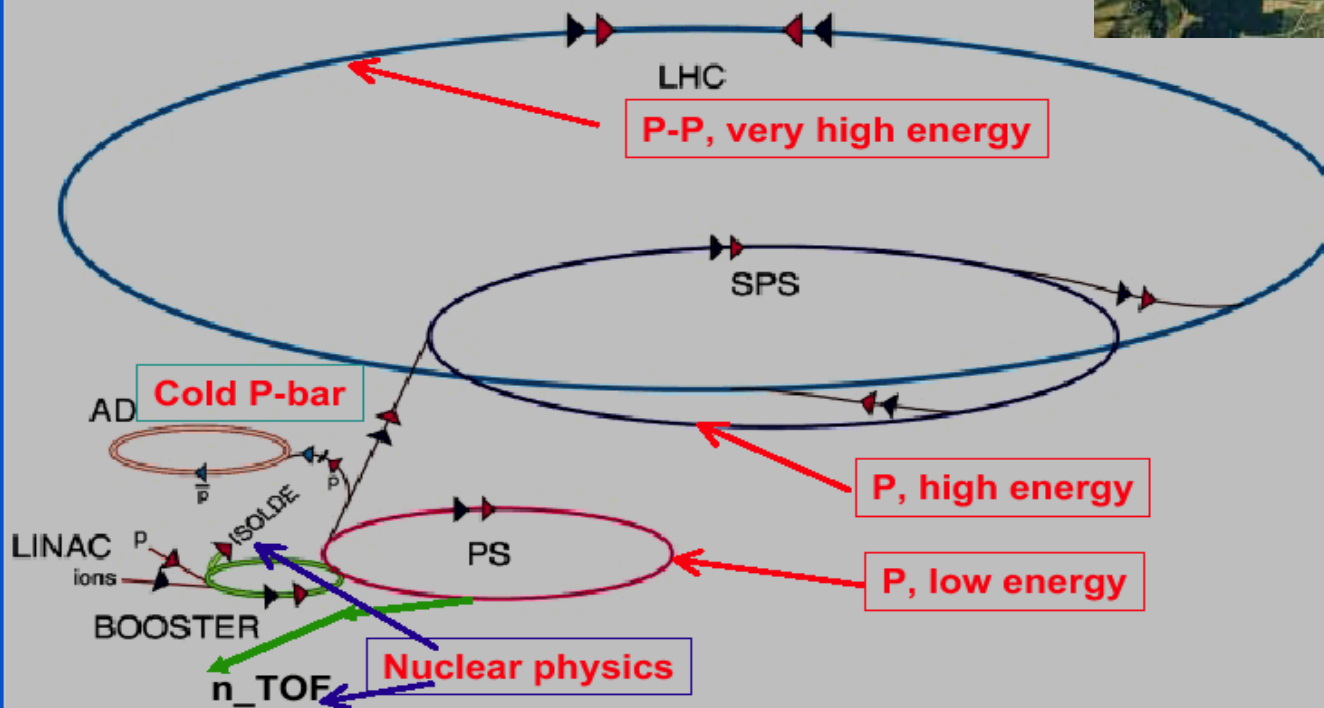


Accelerators



Accelerator chain of CERN

Accelerator chain of CERN (operating or approved projects)



ACELERADORES

Además de CERN, otros importantes aceleradores en el mundo son:

❖ **FERMILAB** (Chicago): TEVATRÓN: Colisiona p y $\bar{p}$ a 1.8 TeV



❖ **HERA** (Hamburgo): Colisiona p de 820 GeV con e^- de 267 GeV

❖ **SLAC** (Stanford):

- SLC: Colisiona e^+ con e^- a 100 GeV
- PRP: Es un anillo que colisiona e^- y e^+ a 30 GeV

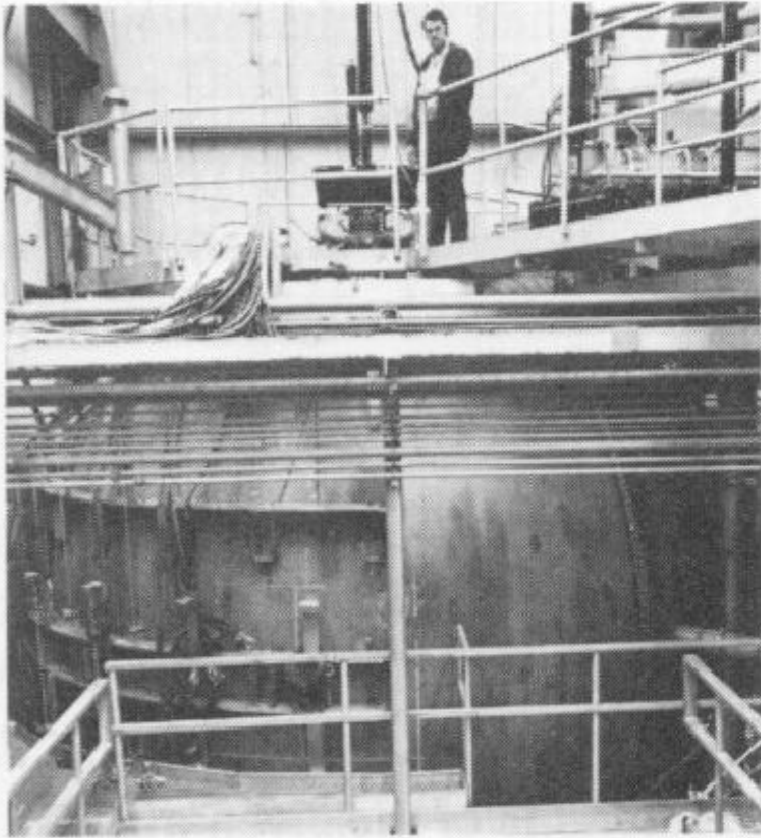
ACELERADORES: Detectores

Un elemento esencial de todo experimento con aceleradores de partículas, independientemente de la forma del acelerador y del hecho de que se colisionen haces de partículas entre sí o con blancos fijos, lo constituyen los **DETECTORES**.

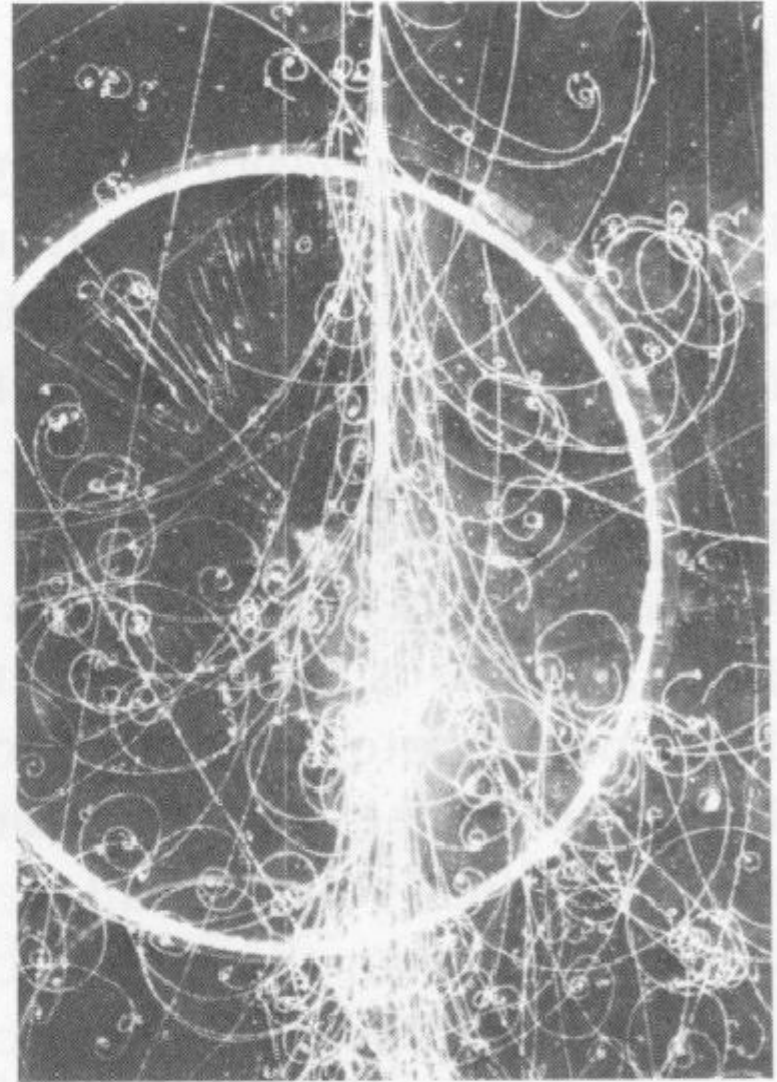
Estos pueden ser de muchos tipos, pero esencialmente todos **se basan en el proceso de ionización**.

La forma en la cual los iones que se forman son usados para rastrear el movimiento de las partículas viene dado por el tipo específico de detector.

Early Detectors: Bubble Chambers



(a)



(b)

Bubble Chambers II

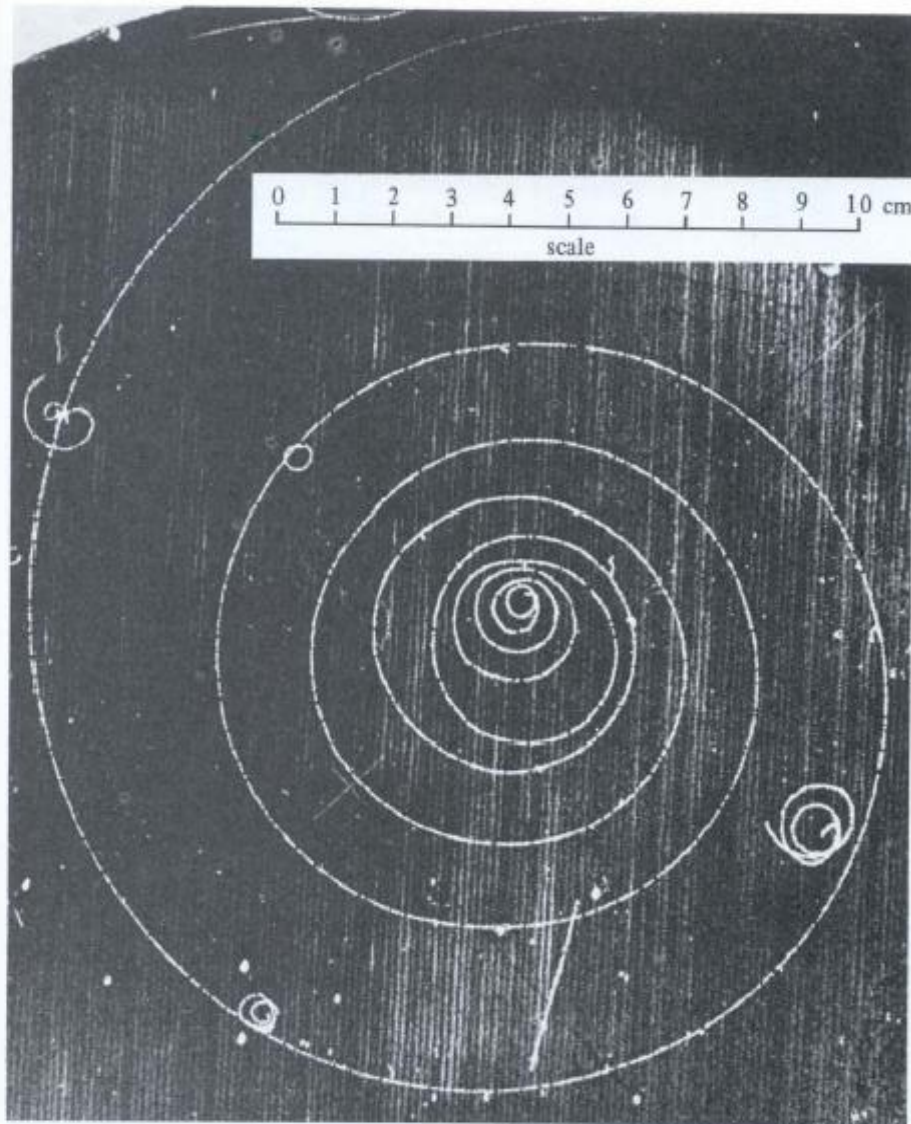


Figure 31-3. *Electron track in liquid hydrogen bubble chamber. Track is curved because of uniform magnetic field pointing out of the page. Radius of curvature decreases as electron is slowed down by liquid hydrogen. [Photograph courtesy Alvarez group, Lawrence Radiation Laboratory, University of California.]*

The **cloud chamber**, also known as the **Wilson chamber**, is used for detecting particles of ionizing radiation.

In its most basic form, a cloud chamber is a sealed environment containing a supercooled, supersaturated water or alcohol vapour. When an alpha particle or beta particle interacts with the mixture, it ionises it. The resulting ions act as condensation nuclei, around which a mist will form (because the mixture is on the point of condensation). The high energies of alpha and beta particles mean that a trail is left, due to many ions being produced along the path of the charged particle. These tracks have distinctive shapes (for example, an alpha particle's track is broad and straight, while an electron's is thinner and shows more evidence of deflection). When a vertical magnetic field is applied, positively and negatively charged particles will curve in opposite directions

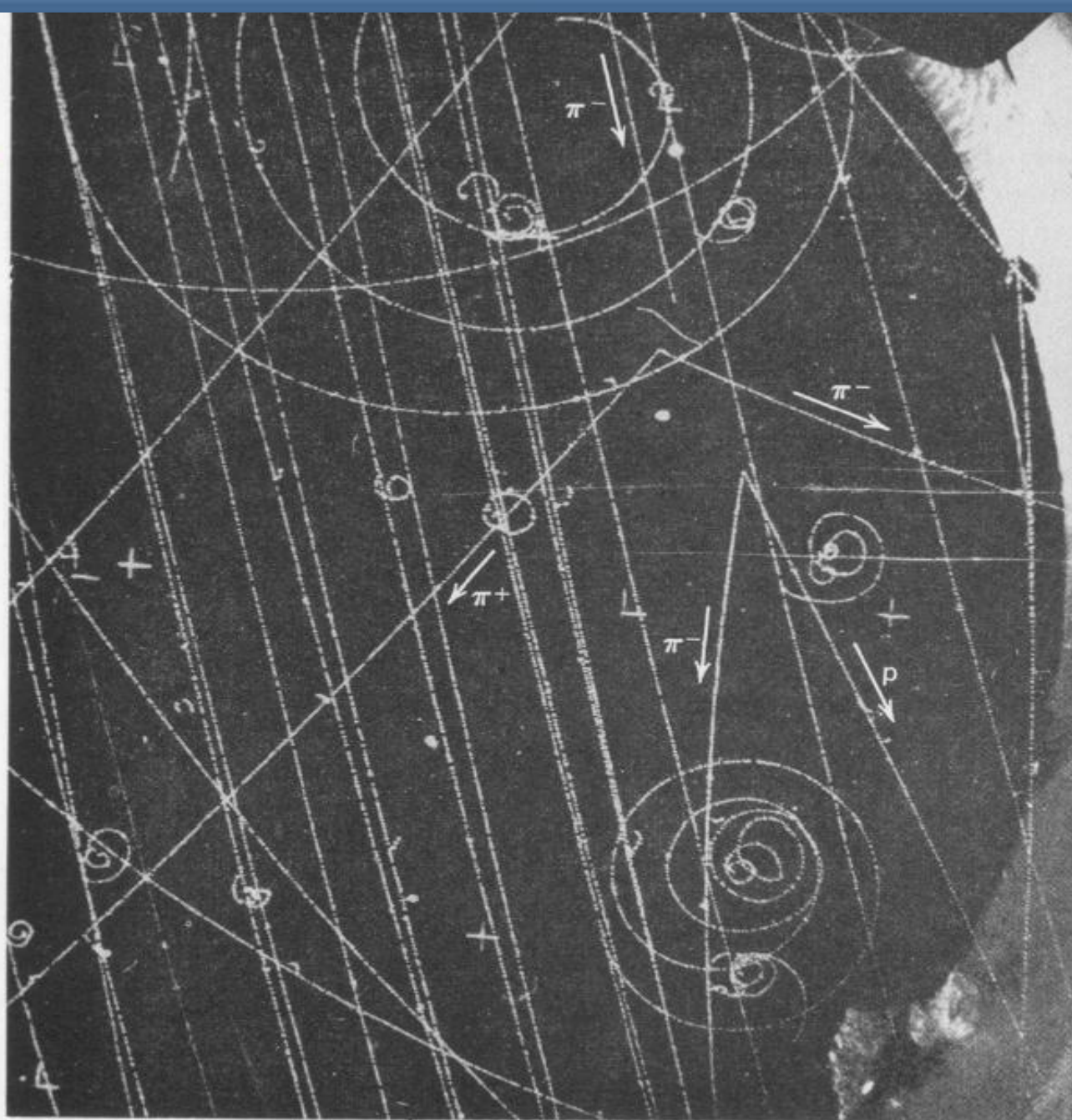


FIG. 20-3. (e) Associated production of Λ^0 and θ^0 . A negative pion, traveling through liquid hydrogen, strikes a proton and produces a Λ^0 -hyperon and a θ^0 -meson, both of which decay inside the bubble chamber.

ACELERADORES: Detectores

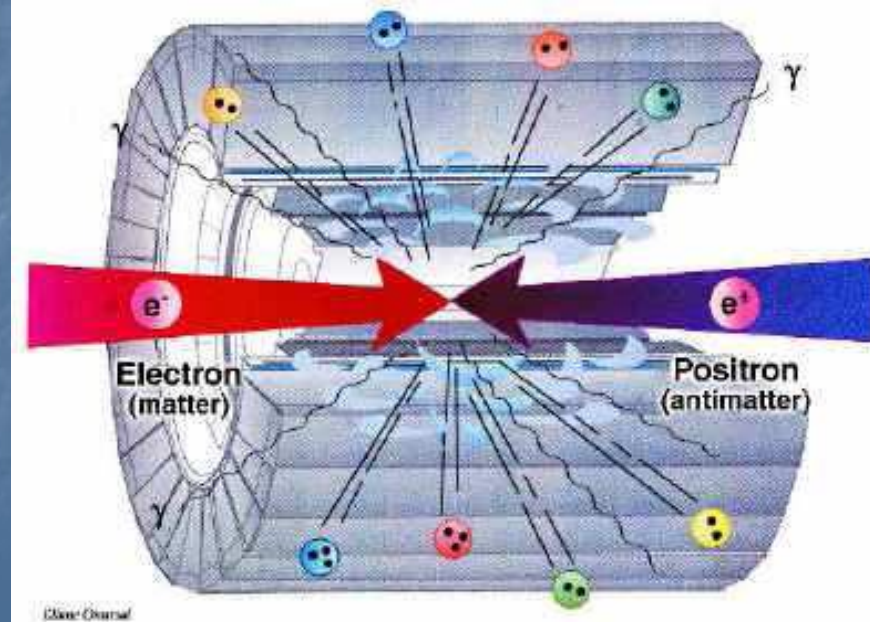
Los detectores actuales están basados en **semiconductores de silicio** que permiten *reconstruir el movimiento de las partículas* a través de las corrientes generadas.

ACELERADORES: Detectores (cont.)

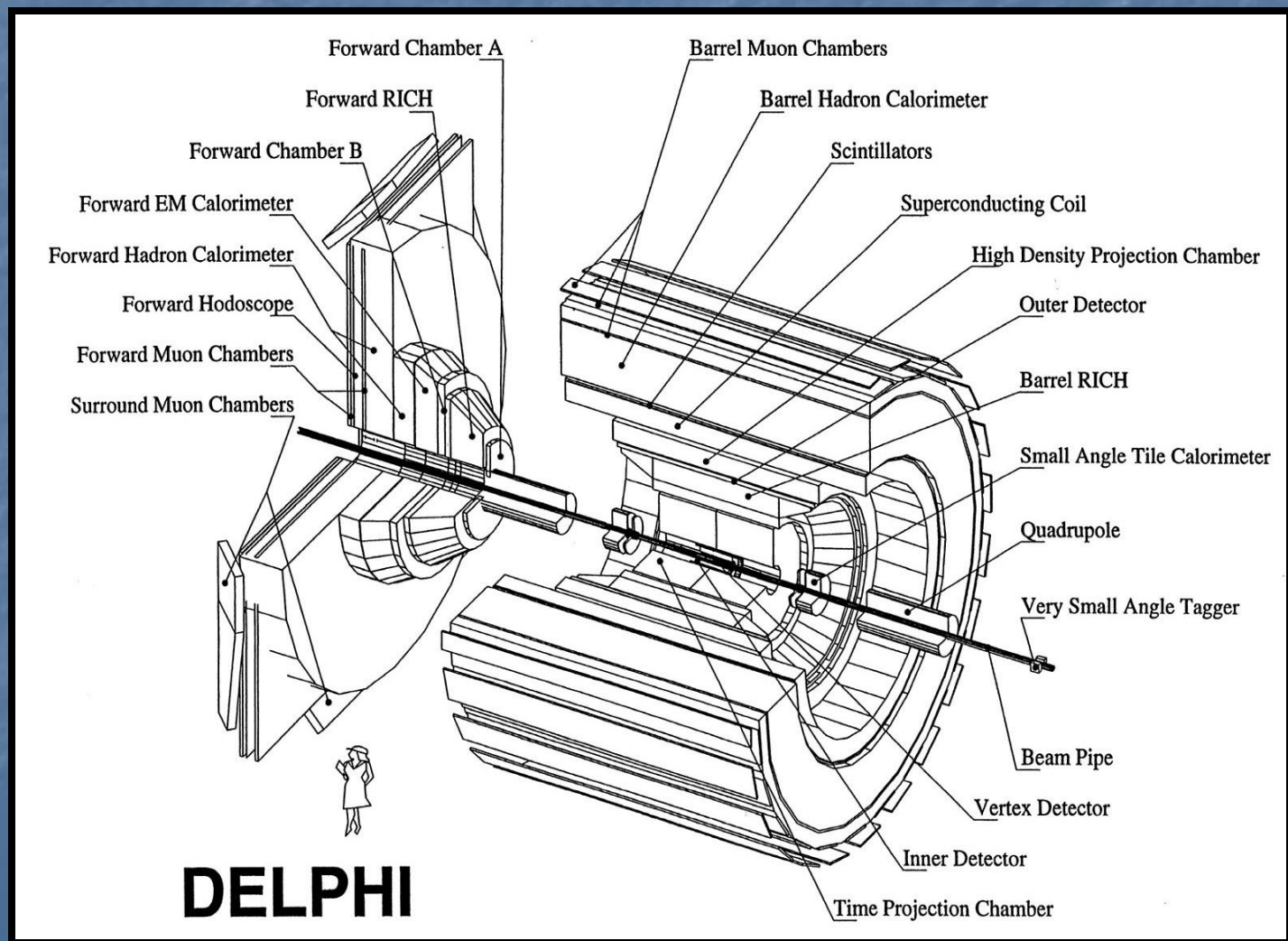
Semiconductores de silicio:

- Estos dispositivos permiten una **digitalización inmediata** y una **reconstrucción 3-D** de la trayectoria de la partícula.
- Para **determinar la energía de las partículas se utilizan calorímetros**.
Los hay electromagnéticos y hadrónicos.
Básicamente, determinan la energía a través de la profundidad hasta la cual se desarrolla la lluvia de partículas desencadenada por la partícula incidente.

Esquema de un detector DELPHI
(DEtector with
Lepton, Photon and
Hadron
Identification, LEP)



Detectores del LEP

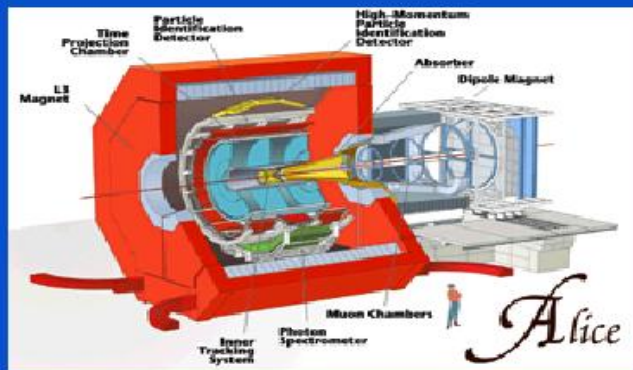
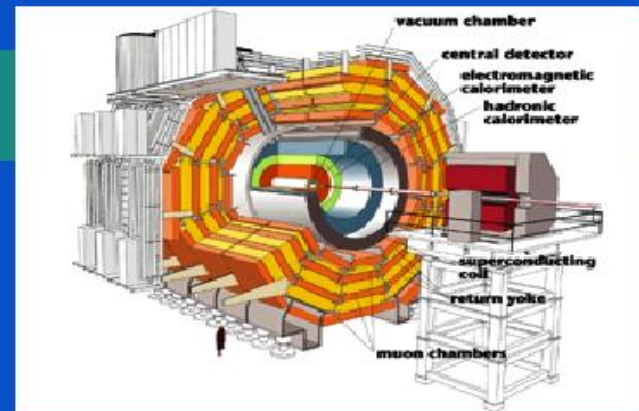
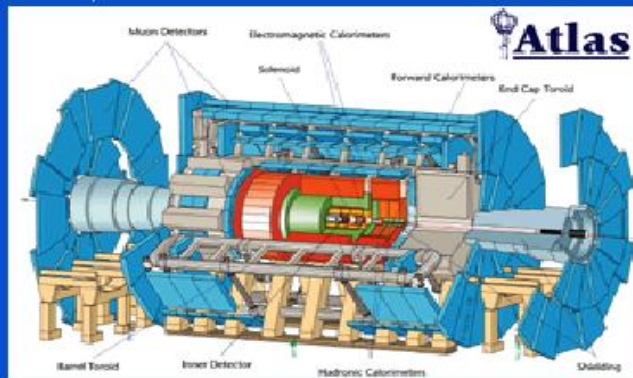




LHC Experiments

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) detector

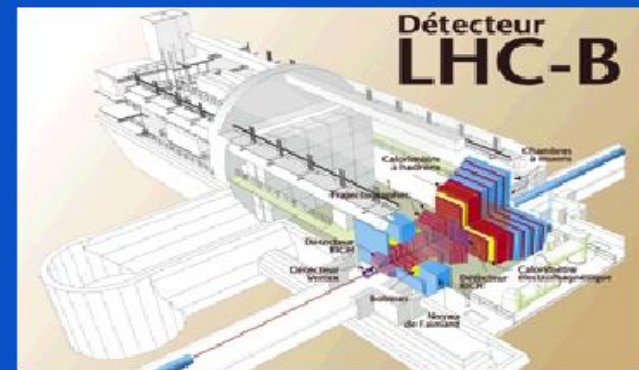
Size: 46 m long, 25 m high and 25 m wide. The ATLAS detector is the largest volume particle detector ever constructed. Weight: 7000 tonnes



ALICE (A Large Ion Collider Experiment) detector

Size: 26 m long, 16 m high, 16 m wide

Weight: 10 000 tonnes



LHCb (Large Hadron Collider beauty)

Size: 21m long, 10m high and 13m wide

Weight: 5600 tonnes

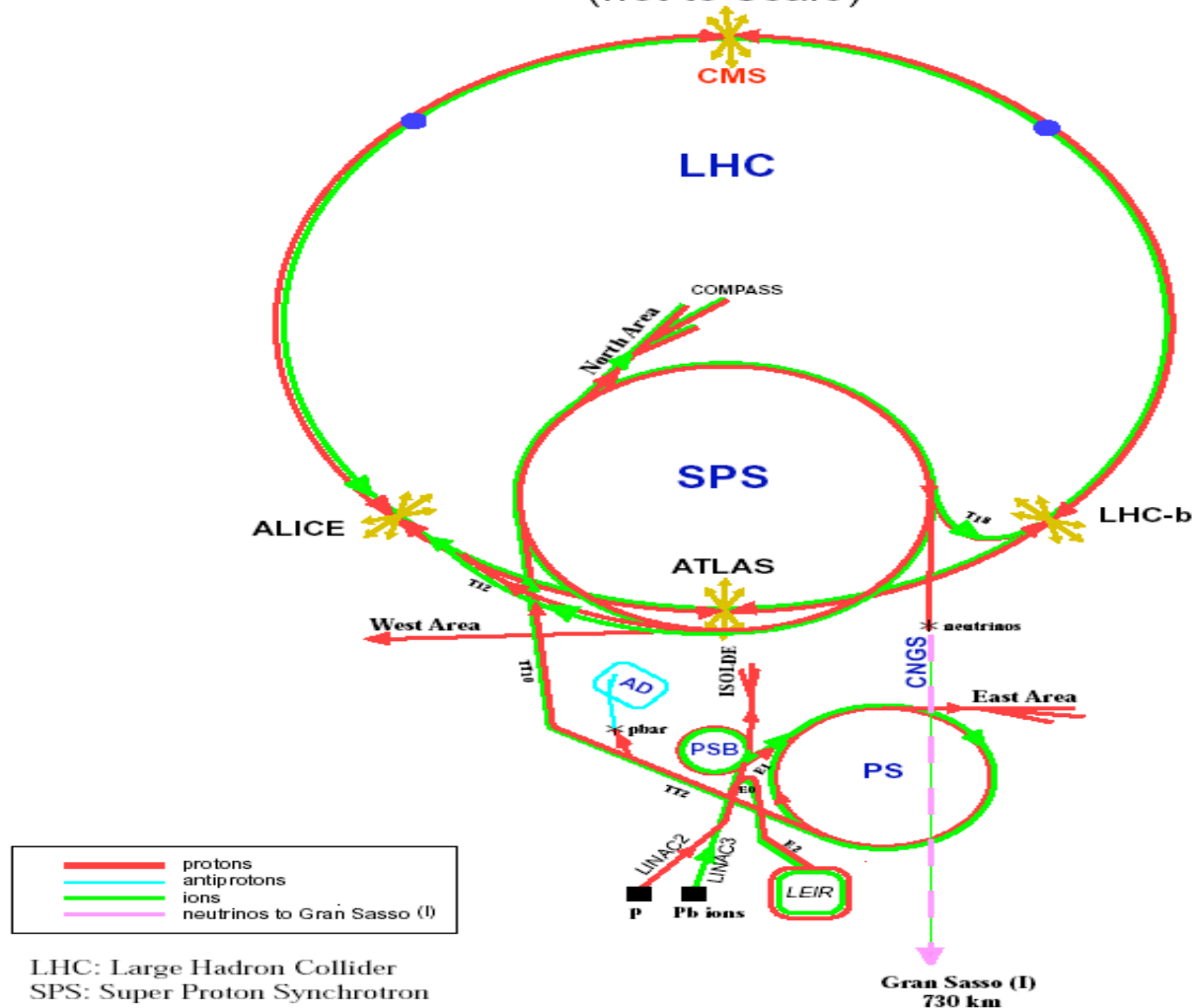
ACELERADORES: Detectores

The two large experiments, **ATLAS** and **CMS**, are based on general-purpose detectors to analyse the myriad of particles produced by the collisions in the accelerator. They are designed to investigate the largest range of physics possible. Having two independently designed detectors is vital for cross-confirmation of any new discoveries made.

Two medium-size experiments, **ALICE** and **LHCb**, have specialised detectors for analysing the LHC collisions in relation to specific phenomena:

For the ALICE experiment, the LHC will collide lead ions to recreate the conditions just after the Big Bang under laboratory conditions. The data obtained will allow physicists to study a state of matter known as quark-gluon plasma, which is believed to have existed soon after the Big Bang.

CERN Accelerators (not to scale)



The ATLAS, CMS, ALICE and LHCb detectors are installed in four huge underground caverns located around the ring of the LHC. The detectors used by the TOTEM experiment are positioned near the CMS detector, whereas those used by LHCf are near the ATLAS detector.

RAYOS CÓSMICOS

RAYOS CÓSMICOS

Los rayos cósmicos fueron descubiertos por Victor Hess en 1912.

Se trata de **partículas energéticas** que llegan a la Tierra desde el espacio exterior.

Cosmic rays of high and ultra-high energy



In 1912, after 9 balloon ascents to record ionization levels, Victor Hess concluded that

“A radiation of very high penetrating power enters our atmosphere from above”.

The newly discovered radiation was dubbed “cosmic” by Robert A. Millikan in 1925.

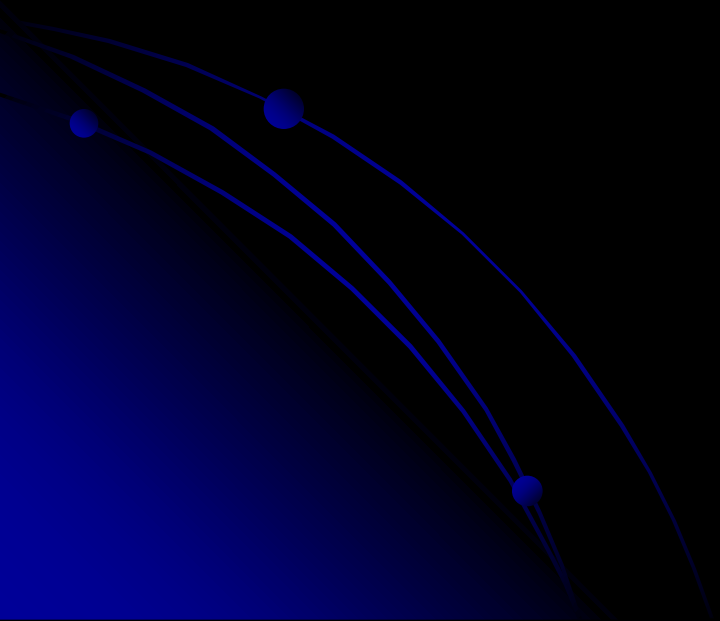
In 1936, Victor Hess was awarded with the Nobel Prize for his discovery.

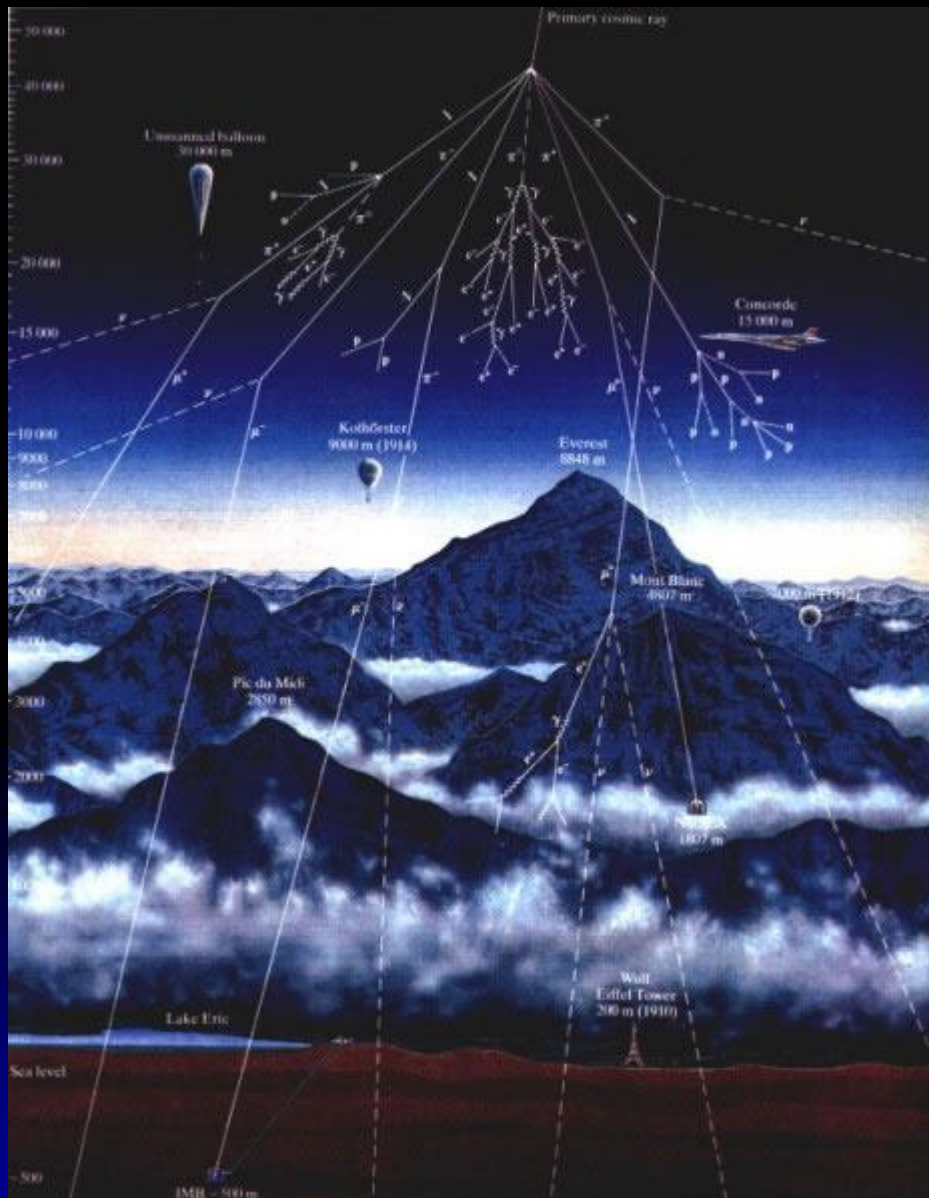
RAYOS CÓSMICOS

Las **partículas primarias** que forman los rayos cósmicos son:

- protones (86%),
- partículas α (11%),
- electrones (2%) y
- núcleos más pesados (1%).

Hay, además, pequeñas proporciones de positrones y antiprotones, que se creen de **origen secundario** (esto es, debido a interacciones de los rayos cósmicos primarios con el medio interestelar).





Cosmic rays (CRs) reach Earth's atmosphere with relativistic energies.

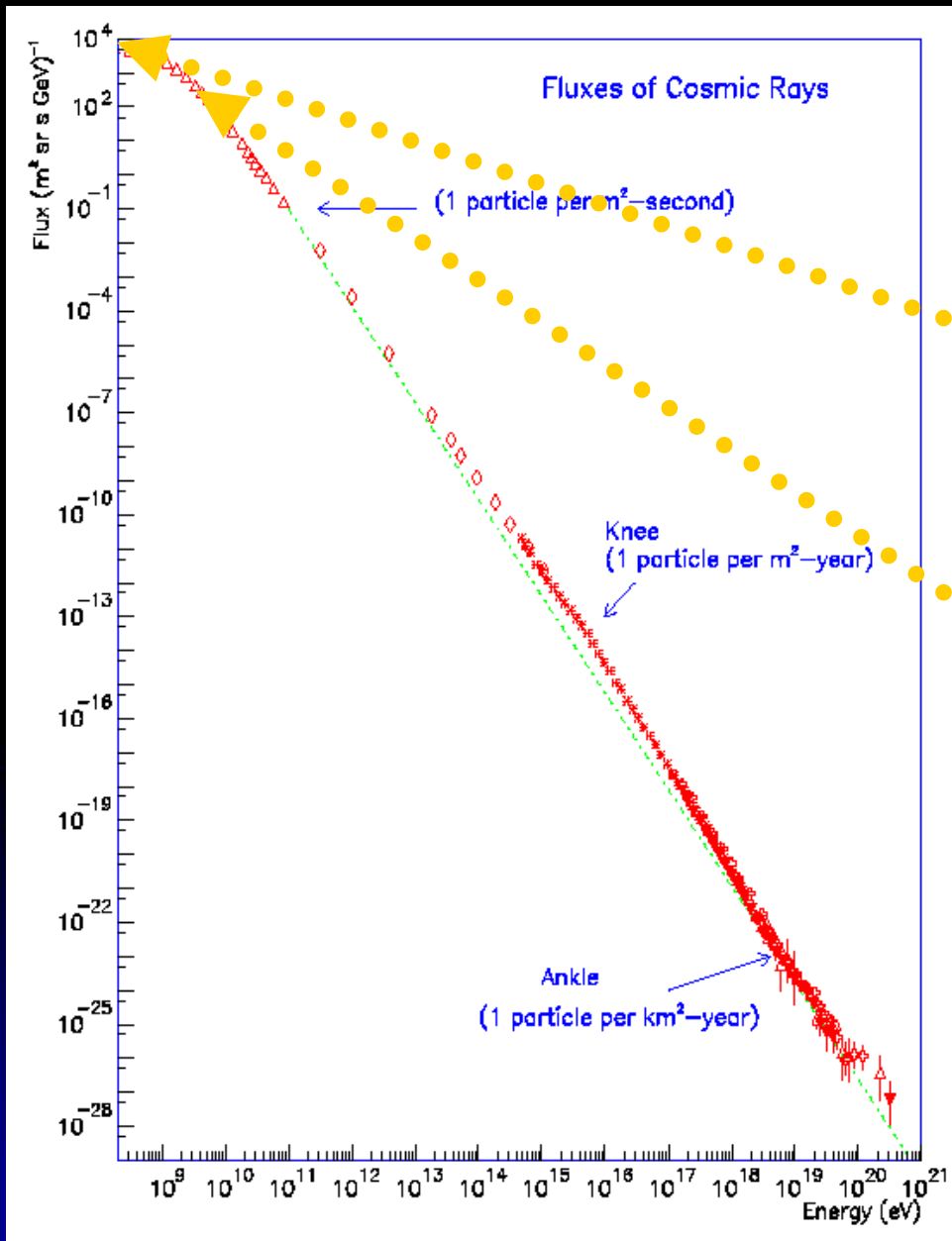
At energies **below 1 TeV** they are detected directly from space. **Above a 100 TeV**, ground arrays can be used to measure the extensive air showers they produce through their interaction with the atmosphere.

One of the main characteristics of cosmic rays is their differential intensity = differential energy spectrum = differential flux:

$$F_a = \frac{dN_a}{dS dt d\Omega dE} \quad \left([F_a] = \frac{\text{particles}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{GeV}} \right).$$

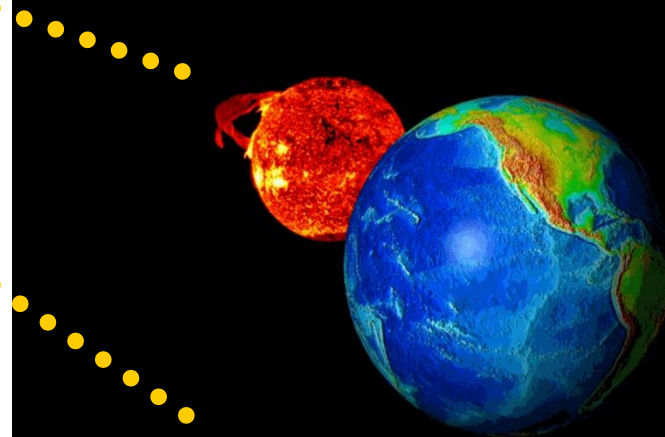
So $dN_a = F_a dS dt d\Omega dE$ is the number of particles a with the total energies E to $E + dE$ which cross the area dS (perpendicular to the direction of observation) in time dt coming within the solid angle $d\Omega = d\varphi \sin \vartheta d\vartheta$.

**This is the quantity usually plotted as the
Spectrum of Cosmic Rays**

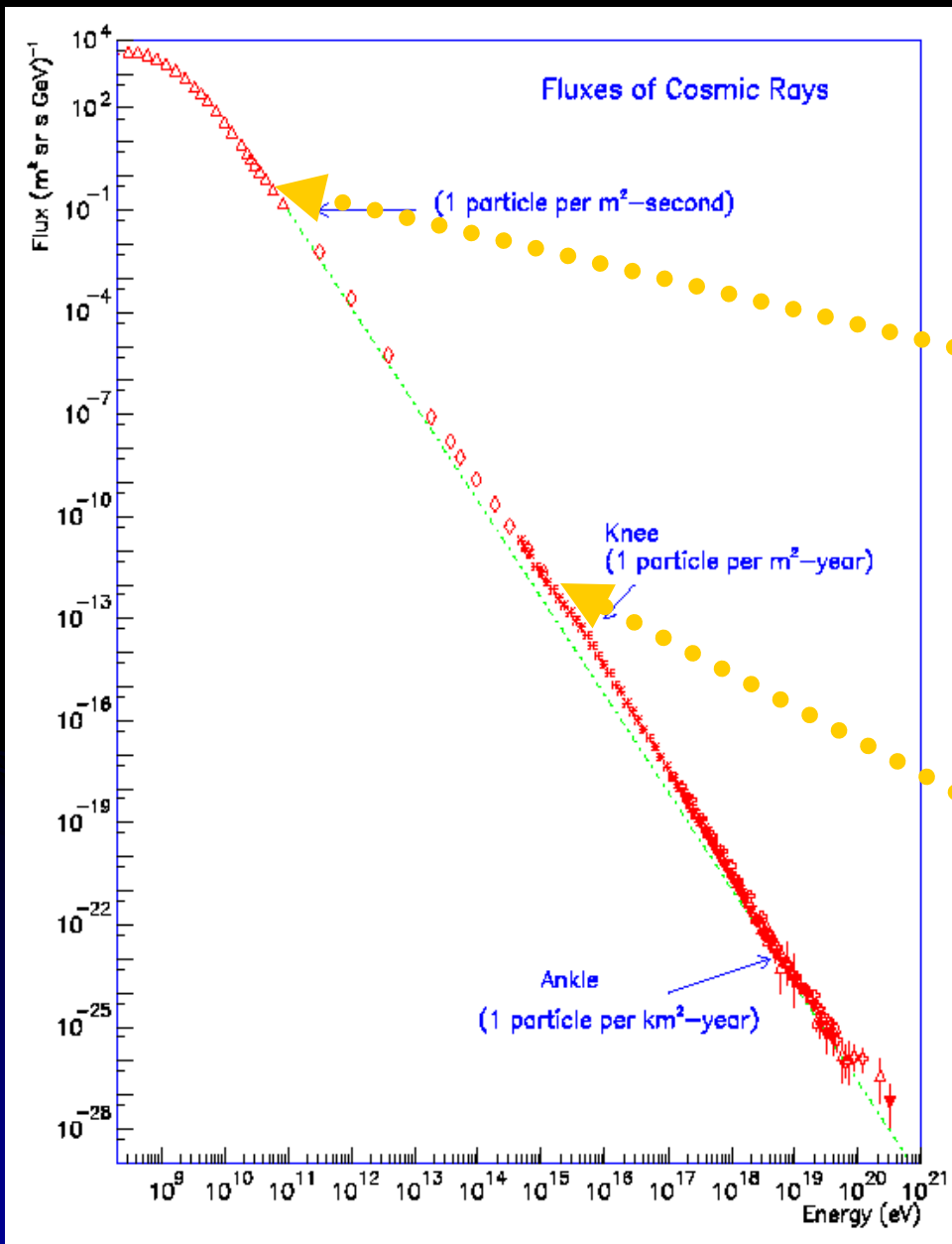


Spectrum

The only part of the spectrum we are sure from where it comes is this:

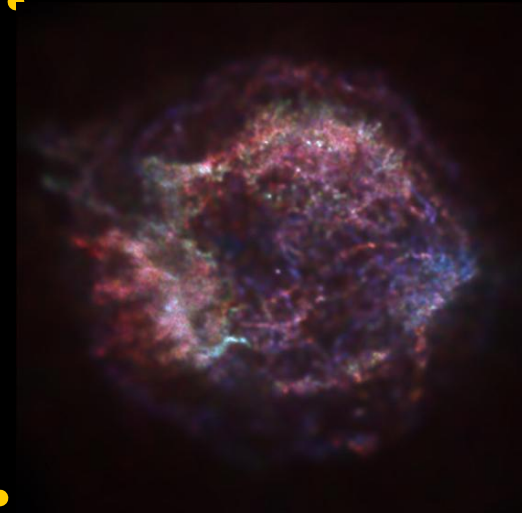


Only below 100 GeV the flux is local (the Sun): the solar wind shield most particles with less than this energy coming from outside the solar system.

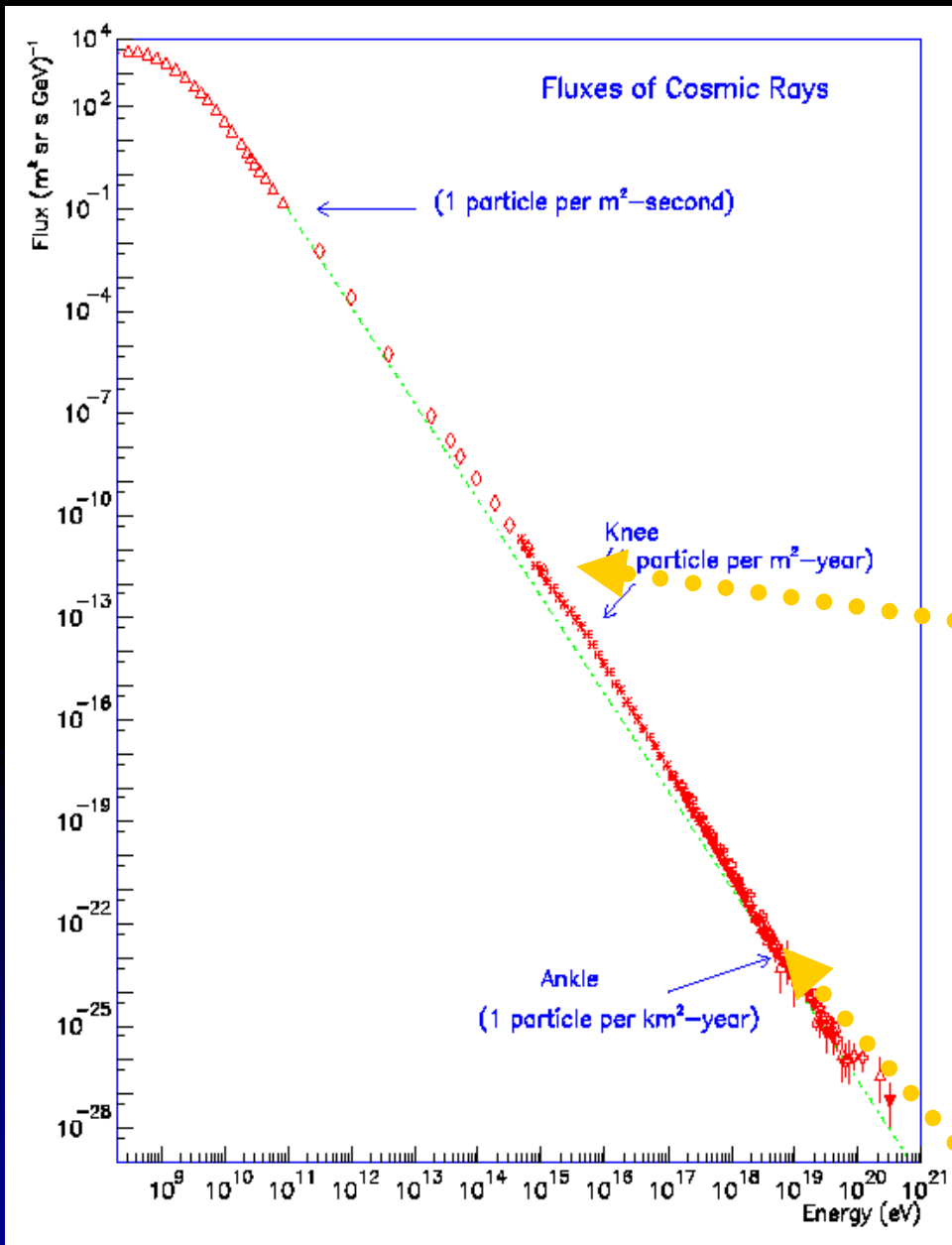


Spectrum

The bulk of CRs occurs with energies below the knee and are thought to come from our own galaxy.



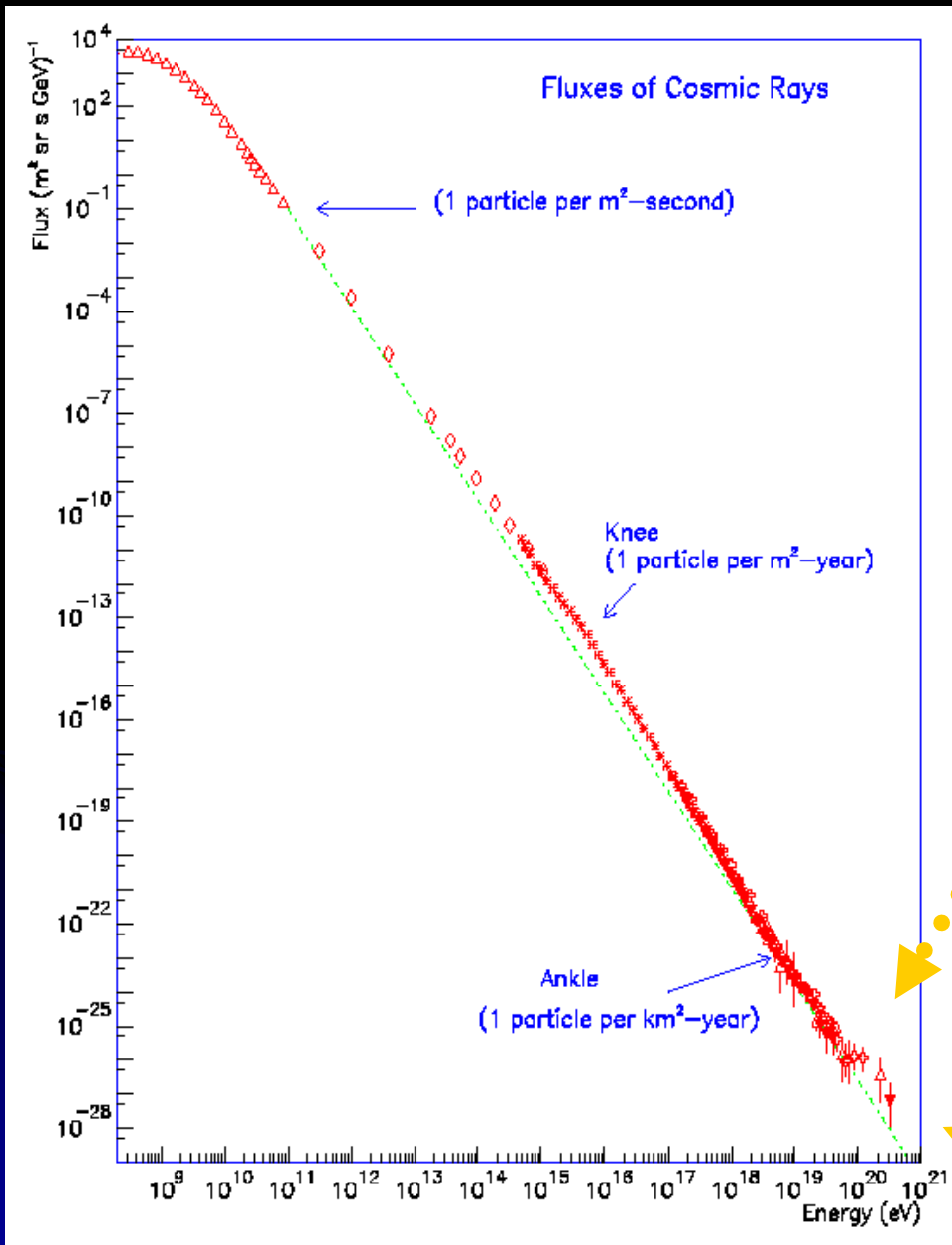
There is still no definite observational proof! However, the circumstantial evidence is convincing enough for everybody.



Spectrum

Above the knee the spectrum steepens, and that is thought to come from an extragalactic component.





Spectrum

Above 10^{20} eV the origin of the cosmic rays is a mystery. The highest CR energy measured is 3×10^{20} eV: a tennis ball at 100 km/s (10^8 times higher than available in accelerators)



RAYOS CÓSMICOS: Espectro

El **espectro en energía de los rayos cósmicos** va

- desde energías del orden de MeV

(rango dominado con contribuciones locales del sistema solar)

- hasta energías por arriba de 10^{20} eV.

En el rango más alto de energía la composición de los rayos cósmicos es desconocida.

- ❖ A energías de 10^{11-12} eV, el **flujo de rayos cósmicos en la Tierra** es de **~ 1 partícula por m^2 por segundo.**

- ❖ A energías de 10^{15-16} eV, donde el espectro cambia de

$$N \propto E^{-2.7} \quad \text{a} \quad N \propto E^{-3.0}$$

el **flujo** es de **~ 1 partícula por m^2 por año.**

- ❖ A **energías muy altas**, arriba de 10^{18} eV, donde el espectro parece volver a endurecerse, el **flujo** es de **~ 1 partícula por km^2 por año.**

RAYOS CÓSMICOS: Espectro (cont.)

Entre unos pocos GeV y la llamada rodilla del espectro a unos 10^{14-15} eV, el espectro está bien descrito por:

$$N(E)dE = \text{cte } E^{-2.7}dE$$

Arriba de energías de ~ 30 GeV, donde los efectos de modulación de los campos magnéticos solar y terrestre dejan de ser importante, la radiación cósmica parece ser completamente isotrópica.

➤ Esto es de esperar ya que, independientemente de la naturaleza de las fuentes, el campo magnético galáctico destruye la anisotropía de partículas cargadas.

RAYOS CÓSMICOS: Espectro (cont.)

➤ Sólo en el caso de las energías más altas, efectos anisotrópicos pueden permanecer para fuentes cercanas.

➤ Las partículas más energéticas, sin embargo, deben ser extragalácticas, ya que su giroradio no puede ser contenido en la Galaxia.

$$r_g = \frac{(E/\text{eV})}{300z (B/G)} \text{ cm}$$

➤ Los efectos de los campos magnéticos hacen que una astronomía galáctica de rayos cósmicos sea imposible, ya que las partículas detectadas no guardan memoria de las fuentes.

➤ Sólo en el caso de fuentes extragalácticas cercanas y para partículas con energías por arriba de 10^{19} eV tal astronomía es factible.

RAYOS CÓSMICOS: Densidad de energía

La **densidad de energía** de rayos cósmicos lejos de la influencia solar es:

$$\omega_{\text{RC}} \sim 1 \frac{\text{eV}}{\text{cm}^3}$$

Esta densidad es comparable a

- la de la **luz estelar** ($\sim 0.6 \text{ eV/cm}^3$),
- el **fondo cósmico de radiación** ($\sim 0.26 \text{ eV/cm}^3$)
- y el **campo magnético galáctico** ($\sim 0.25 \text{ eV/cm}^3$ para un campo de $3 \mu\text{G}$).

RAYOS CÓSMICOS: Potencia inyectada en la Galaxia

En base a la densidad de energía medida de rayos cósmicos podemos calcular la **potencia inyectada por los mismos en la Galaxia**.

Consideremos que ésta es un disco de radio $R = 15$ Kpc y espesor h de 200 pc. Su **volumen** será:

$$V_G = \pi R^2 h \sim 4.1 \times 10^{66} \text{ cm}^3$$

El **tiempo de residencia de los rayos cósmicos en el disco** vendrá determinado por la escala temporal de difusión de las partículas:

$$t_d \sim \frac{3r^2}{D}$$

donde r es la **distancia a recorrer** por las partículas y D es el **coeficiente de difusión**.

Para el caso de la Galaxia:

$$r = h; \quad D \sim 10^{28} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

RAYOS CÓSMICOS: Potencia inyectada en la Galaxia



$$W_{\text{RC}} = \frac{V_{\text{G}} \omega_{\text{RC}}}{t_{\text{d}}} \sim \frac{4.1 \times 10^{66} \text{ cm}^3 10^{-12} \text{ erg cm}^{-3}}{10^{14} \text{ s}}$$

$$W_{\text{RC}} \sim 4.1 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$$



Potencia total de de los rayos cósmicos en la Galaxia.

Cualquier acelerador o conjunto de aceleradores que los produzca debe satisfacer este presupuesto energético.