Aceleradores de partículas: una visión general

Autor: Josu Eguía de TEKNIKER-IK4

INTRODUCCIÓN Y USOS

Desde que fueron concebidos a principios del siglo XX, los aceleradores de partículas se han convertido en la herramienta más efectiva, compleja y fascinante para estudiar las características de la materia a nivel atómico, y han contribuido al avance de la Física como pocas otras invenciones. Sin embargo, y para un público no especialista, en sí mismos permanecen como grandes desconocidos y sus objetivos, principios de funcionamiento, tipos y usos no son un tema habitual de la divulgación científica, más concentrada en disciplinas y campos más accesibles para el profano. Para paliar este déficit, habría que empezar por señalar que los aceleradores de partículas son dispositivos que se valen de campos electromagnéticos para acelerar partículas cargadas. En puridad, únicamente el campo eléctrico es capaz de incrementar la velocidad, y por tanto la energía, de una partícula cargada, mientras que el campo magnético se limita a alterar la dirección del movimiento de la carga. Sin embargo, y como ya veremos, es necesario el concurso de ambos a fin de obtener las prestaciones más espectaculares de un acelerador. La aceleración de las cargas puede darse hasta un rango de energía bajo, del orden de decenas de eV[1] , como en el caso del tubo catódico de electrones que forma el núcleo de las TV más habituales a finales del siglo XX. A medida que se incrementa la energía, las partículas aceleradas encuentran utilidad campos científicos y aplicaciones industriales más exigentes. Sin embargo, es a energías altas, superiores a 500 keV (referencia de los años 20) o 1 GeV (referencia más actual), donde aparecen las aplicaciones más espectaculares y fascinantes de los aceleradores, ligadas a la física de partículas. Por ello, el presente artículo se centra principalmente en los aceleradores de alta energía, en sus tipos y aplicaciones, pese a que constituyen menos del 1% de los cerca de 26.000 aceleradores instalados en el mundo. En cuanto al resto, de energías medias y bajas, aproximadamente un 44% de los se utiliza en radioterapia, un 41% en implantación de iones en materiales (sobre todo en la industria del semiconductor y electrónica), un 9% en procesos de transformación industrial y un 4% en la industria biomédica y otras aplicaciones biológicas.

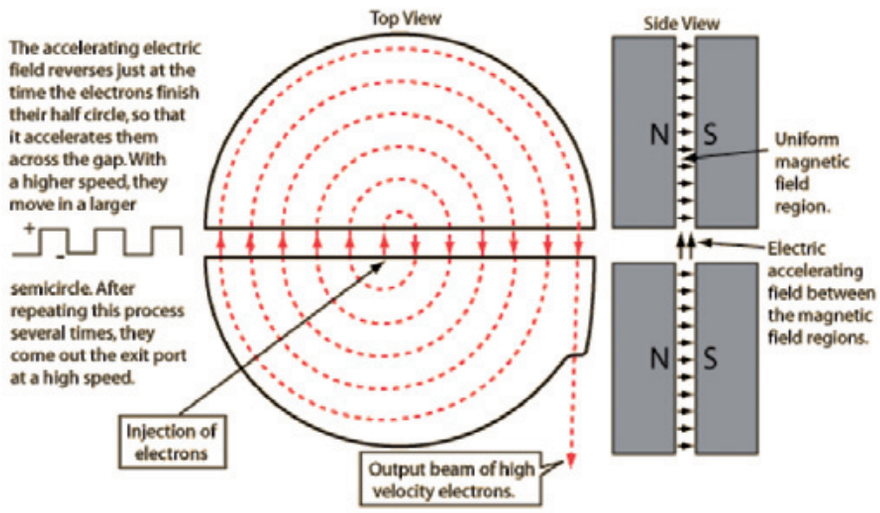
La clasificación de los aceleradores se podría realizar según criterios muy distintos (geometría, aplicación etc.), pero la forma más útil y la que permite entender su evolución histórica se basaría en clasificar a los aceleradores por la técnica empleada para generar el campo acelerador. En paralelo, se podría completar esta información haciendo referencia al uso del acelerador, con lo que se cubrirían las dos cuestiones básicas: cómo funciona y para que se utiliza. Con este esquema, y con someras pinceladas acerca de la física del acelerador, es posible obtener una visión general suficiente para un técnico.

La primera gran división distingue entre los aceleradores *electrostáticos* y los aceleradores con campos *electromagnéticos oscilantes*. En el primero de ellos, el campo eléctrico, de valor, dirección y sentido constantes, es creado entre dos electrodos mediante la aplicación de un potencial. Una partícula cargada introducida en el espacio entre electrodos se acelera y recorre la distancia entre los mismos, adquiriendo una energía dependiente del potencial aplicado y su propia carga. Dos exponentes muy consolidados de este tipo de aceleradores son los aceleradores **Van de Graaf** y los aceleradores del tipo **Cockcroft & Walton**, cuyos nombres se deben a los científicos responsables de la invención a finales de los años veinte y comienzos de los treinta. En España,

[1] La unidad de energía electronvoltio (eV), es la que adquiere un electrón cuando es acelerado por un voltio de diferencia de potencial, equivaliendo a unos 1,6 · 10^{-19} julios. La correspondencia relativista entre masa y energía hace que pueda calcularse su equivalencia como masa aplicando la fórmula de Einstein $E = m \cdot c^2$
Algunos de sus múltiplos son:
1kiloelectronvoltio (keV) = 10^3 eV
1megaelectronvoltio (MeV) = 10^3 keV = 10^6 eV
1gigelectronvoltioa (GeV) = 10^3 MeV = 10^9 eV
1teraelectronvoltio (TeV) = 10^3 GeV = 10^{12} eV
1petaelectronvoltio (PeV) = 10^3 TeV = 10^{15} eV
1exaelectronvoltio (EeV) = 10^3 PeV = 10^{18} eV

el *Centro Nacional de Aceleradores* (CNA), sito en Sevilla, está equipado con versiones de alta energía de estos dos tipos de acelerador (potenciales de 3MeV para el primero y 1 MeV para el segundo).

Ciclotrón CNAs



Esquema del Ciclotrón
Imagen: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu

Los aceleradores *electrostáticos* son útiles en muchas aplicaciones y los casos y disciplinas en las que son de gran importancia no dejan de crecer. Así, se usan habitualmente en medicina nuclear, el análisis de muestras utilizando técnicas PIXE (*Particle Induced X-ray emission*) en el estudio de materiales o en el perfilado profundo en estudios de física de estado sólido. En menor grado, se han llegado a utilizar como espectrómetros de masas en estudios geológicos y astroquímicos. Incluso es posible obtener neutrones de las partículas cargadas por el acelerador para realizar estudios de cristalografía en Física de la Materia Condensada.

Años 30

Sin embargo, tal y como se ha dicho previamente, la física de partículas precisa de energías mucho más altas que las obtenibles mediante un acelerador electrostático y hay mejores formas de conseguir un haz de electrones de alta energía, con lo que, ya desde los años 30, se han desarrollado aceleradores de campos electromagnéticos oscilantes y de alta energía para cubrir estas necesidades.

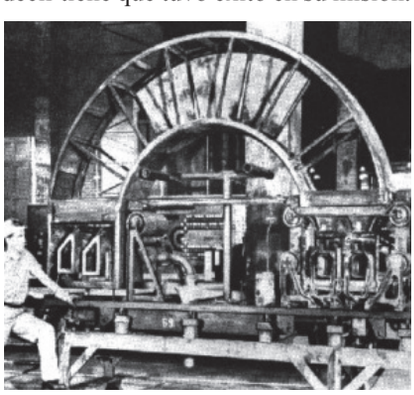
En primero de ellos es el *Ciclotrón*, el primer acelerador circular, que le valió el Nobel de Física a **Ernest O. Lawrence** en el año 1939, pese a que el desarrollo es de comienzos de los treinta. Se trata de dos cavidades de vacío unidas entre sí en forma de "D" y separadas por un pequeño *gap*. El campo magnético producido por un potente electroimán mantiene a las partículas moviéndose en círculo, y cada vez que la partícula atraviesa el *gap* sufre una aceleración debida a un campo eléctrico pulsado a alta frecuencia que actúa en el citado hueco. De esta forma, la partícula traza una espiral que se aleja del centro a medida que se acelera, hasta que tiene suficiente energía para abandonar las cavidades y se produce la extracción del haz. Se entiende por tanto que cuanto mayor sea la energía de extracción deseada para las partículas, mayor ha de ser el radio de la cavidad y el propio ciclotrón, al necesitar la espiral más espacio para evolucionar.

Su evolución fue el *Sincrociclotrón*, que automáticamente ajustaba la frecuencia de los pulsos del campo eléctrico para compensar una serie de efectos relativistas que sufre la partícula a energías superiores a los 20 MeV.

Durante la década de los años treinta, los ciclotrones se utilizaron para la investigación de los efectos deuterón – núcleo y para descubrir muchos isótopos en multitud de elementos. Aún hoy se utilizan para la producción de isótopos, si bien cada vez se destinan más a la protonterapia para el tratamiento del cáncer, entre otras aplicaciones.

Años 40

En el año 1943, El propio E.O. Lawrence utilizó una variante del ciclotrón llamada *Calutrón* para la separación de isótopos radiactivos de uranio a fin de obtener el material explosivo para las bombas atómicas, dentro del *Proyecto Manhattan*. Ni que decir tiene que tuvo éxito en su misión.



Calutrón
Imagen: http://www.hcc.mnscu.edu

En paralelo, en 1940 **Donald Kerst** desarrollo el *Betatrón*, un acelerador de partículas circular específico para electrones. Debido a su poca masa, el concepto del *sincrociclotrón* no podía

compensar los efectos relativistas que aparecen a energías más altas, con lo que fue necesario un cambio de concepto. Se trata básicamente de un enorme transformador, equipado con una cámara de vacío circular en el interior de su bobinado secundario. Mientras el campo magnético mantiene a las partículas girando, la corriente alterna del primario crea fuerzas electromotrices en el secundario que aceleran los electrones. Sin embargo, al igual que el ciclotrón, perdía eficiencia y efectividad a altas energías.

Esquema de Betatrón

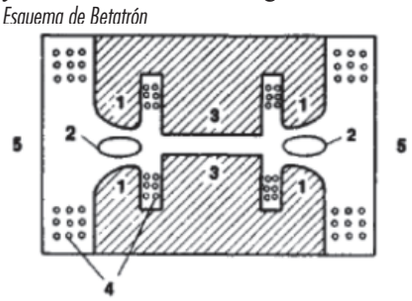


Imagen: The Free Dictionary

El haz de electrones de alta energía es muy útil en física de partículas. Si se hace incidir sobre un metal, el haz de electrones funciona como fuente de rayos gamma o rayos X para aplicaciones industriales y médicas.

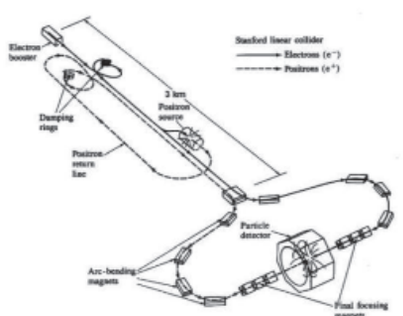
Años 50

En los años cincuenta se da una cascada de innovaciones en el diseño de los aceleradores, que lleva a continuas mejoras y un número rápidamente creciente de aceleradores instalados en el mundo. La innovación principal es el desarrollo del *Sincrotrón* [1]. En este acelerador, tanto el campo magnético que hace girar las partículas como el campo eléctrico que las acelera varían y se adaptan al haz, lo que trae dos efectos importantes. Se superan los efectos relativistas que limitaban la energía de la partícula en anteriores aceleradores y desaparecía la espiral presente hasta entonces, con lo que la trayectoria de las partículas se convierte en una circunferencia de diámetro prácticamente constante. La máxima energía viene determinada por el momento en que la radiación sincrotrón emitida por la partícula (toda partícula cargada sometida a una aceleración emite energía en forma de onda electromagnética) es igual a la energía inyectada, con lo que no queda energía sobrante para la aceleración. Aún hoy, el concepto sincrotrón es la base de la aceleración a altas energías de las partículas, y son los aceleradores más numerosos del mundo. En muchas ocasiones, la introducción de una partícula en un sincrotrón no se puede hacer a baja energía/velocidad, con lo que es necesario realizar una aceleración previa en algún otro acelerador. Para esta función, la solución más socorrida es el empleo de aceleradores *lineales*, los LINACS (ver más abajo).

Sicrotrón
Imagen: es.wikipedia.org

Algunas variaciones del sincrotrón son el *Bevatron* (6,2 GeV), que dio lugar al descubrimiento del antiprotón y el antineutrón, el *Cosmotrón*, que dio lugar a la producción de mesones y al descubrimiento de las partículas V, el *Sincrofasotrón* o el *sincrotrón específico para protones*. A día de hoy, los sincrotrones se utilizan principalmente como fuente de rayos X de aplicación en el estudio de materiales. El año 1983 en el *Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi*, cerca de **Batavia**, Illinois, USA, un sincrotrón aceleró un protón hasta energías superiores a 1 TeV (Trillón/Teraelectrovoltio) con lo que se convirtió en el acelerador más poderoso de la historia.

Otra de las innovaciones de los años cincuenta es el citado concepto de acelerador *lineal* (LINAC), un acelerador que renuncia a la estructura espiral o circular de los aceleradores primigenios y que realiza la aceleración en un conducto recto (lineal) de longitud finita definida. La energía máxima que se le puede dar a la partícula viene definida por la intensidad del campo eléctrico que se puede conseguir y la longitud del acelerador, dado que renuncia a confinarlo en un anillo hasta la extracción. Sin embargo, la diferencia en el principio acelerador hace que presente algunas diferencias que en algunas aplicaciones se tornan en ventajas y que han llevado a los aceleradores lineales a vivir un momento del esplendor con posterioridad a su invención en la década de los cincuenta, donde únicamente se empleaban como inyectores de los *sincrotrones*.

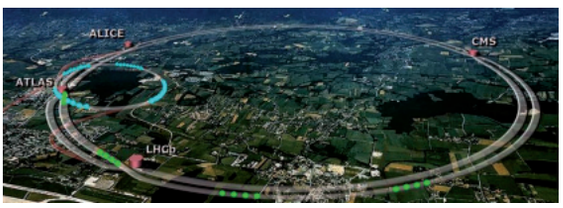


Esquema de acelerador lineal de Stanford
Imagen: SLAC

Años 60 y posteriores

En las décadas siguientes se produce la expansión y mejora de los aceleradores, su ampliación para energías superiores y un verdadero florecer de variantes, instalaciones y aplicaciones. Pero al margen de esto, en la década de los sesenta tenemos que señalar que se produce el desarrollo de lo que hoy en día se conoce como Aceleradores de *Blanco Fijo*. En estos aceleradores, el objeto al que se destina el haz acelerador está en la propia instalación como un sistema fijo, con lo que la utilización del acelerador queda muy definida.

[1] *Bolufer-Mayans P. "EL SINCROTRON ALBA" DYNA Ingeniería e Industria. Septiembre 2009. Vol. 84-6 p.481-484*



LHC
Image: http://scienceblogs.com

COLISIONADORES

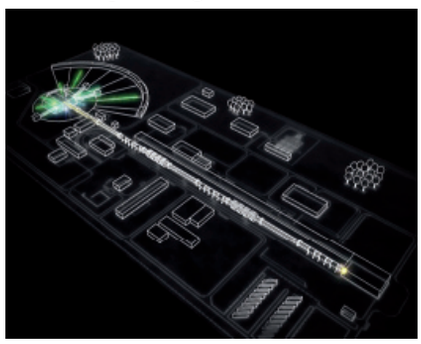
Entre los Aceleradores de *Blanco Fijo* se encuentran los muy famosos *Colisionadores*. Algunas investigaciones en física de partículas requieren no solo de partículas con alta energía sino de la colisión entre partículas de alta energía; por supuesto, estas partículas no tienen por qué ser la misma. De esta forma, un sincrotrón se podría utilizar para acelerar y acumular estas partículas antes de que choquen en el interior del conducto. Se les llama entonces *Storage Rings*, y funcionan como *Colisionadores o Colliders*.

Los colisionadores revelaron el efecto **Touschek**, las interacciones electrón – positrón, el decaimiento β, y pueden servir para corroborar las teorías físicas actuales en su búsqueda del *Bosón de Higgs*, en el famoso LHC, entre otras aplicaciones.

Además de los *colisionadores*, los Aceleradores de *Blanco Fijo* se pueden utilizar para la producción de iones, radiactivos o no, si el haz se hace incidir sobre un convertidor, lo que provoca una cascada de neutrones que puede desencadenar una reacción de fisión en un átomo y la producción, por tanto, de átomos (iones) más pequeños a partir del original. El uso de esos iones puede ser muy variado, siendo el principal el uso como en aplicaciones biológicas y médicas. Para estos usos, lo habitual es el empleo de LINACS, aceleradores lineales de energías medias.

ACCELERATOR DRIVEN SYSTEMS

Esta aplicación es uno de los primeros ejemplos de lo que se ha venido en llamar *Accelerator Driven Systems* (ADS), *Sistemas Activados por Aceleradores*, donde el acelerador es una herramienta, un desencadenante o una fuente necesaria para un proceso industrial, científico o experimental no directamente ligado con la física de partículas. Otro de los casos de aplicación de un ADS que está empezando a estudiar y probar se basa en la habilidad que tienen las partículas de alta energía para alterar la materia con la que chocan para transmutar residuos nucleares, cuya problemática en sobradamente conocida. Se están desarrollando LINACS que atacan residuos nucleares a fin de transformarla (transmutarla) en una especie o sustancia menos peligrosa, más tratable o más adecuada para su gestión.



Fuente de neutrones por espalación

Y no podemos acabar esta breve reseña sin mencionar una aplicación particular que ha sido de importancia reciente en el mapa español de instalaciones científicas. Una de las instalaciones más exitosas gobernadas por un acelerador de partículas son las *Fuentes de Neutrones por Espalación*. Las fuentes de neutrones de gran flujo tradicionales utilizaban, como producto primario, los neutrones residuales de una reacción de fisión nuclear, con lo que se basaban en reactores e instalaciones nucleares muy similares a las empleadas con fines energéticos. Un ejemplo de este tipo de instalación es el *Institute Laue-Langevin*, (ILL) sito en **Grenoble**, Francia. Debido a los riesgos asociados a la propia instalación, a la problemática de los residuos y a muchos otros de diversa índole, la comunidad científica y las naciones han avanzado en pos del abandono de estas instalaciones y la sustitución de las mismas por otras basadas en principios más limpios y seguros. En este sentido, la espalación es la vía más prometedora. Una partícula que golpee un metal pesado puede, bajo ciertas condiciones, liberar neutrones de forma controlable, a fin de ser utilizados en investigación. Sobre este principio en el mundo se han proyectado instalaciones y fuentes de neutrones para cubrir la demanda de neutrones por parte de los investigadores. De esta forma, Europa disponía de una Fuente de Neutrones (y muones) por Espalación de pulso corto, de nombre *ISIS*, en el *Rutherford Appleton Laboratoy* de **Oxford**, en el Reino Unido. Esta instalación, si bien válida, plenamente operativa y moderna, no cubre las demandas de los científicos. Por su parte, los Estados Unidos de Norteamérica acaban de inaugurar la *Spallation Neutron Source* (SNS) en **Oakridge**, Tennesse, como gran instalación de neutrones a nivel nacional. De la misma forma, China está trabajando en el trabajo de diseño y construcción de la futura *Chinese Spallation Neutron Source* (CSNS). De esta forma, Europa dio un paso al frente y optó por construir una gran fuente de neutrones por espalación de pulso largo, la ESS, *European Spallation Source*. España se postuló como sede de esta instalación, que finalmente fue adjudicada a **Lund**, en Suecia. Sin embargo, tanto los laboratorios como la industria española se encuentran actualmente trabajando a favor del desarrollo de la citada ESS que está, de este modo, actuando como tractor de los desarrollos en aceleradores en España.

Se ha tratado, por tanto, de dar unas pinceladas acerca de la historia de los aceleradores, de su evolución, principios de funcionamiento y tipos, sin olvidar la forma en que han servido al avance de la ciencia la tecnología y, por qué no decirlo, del propio ser humano. Son una herramienta fascinante, con más futuro que pasado, una herramienta que nos habla de la naturaleza de la materia y de la propia historia del universo, tan ligada a la de la materia y la energía.