

PHU ANH PHI NGHIEM

ILUSTRADO POR MARÍA TORRES SENÉS

La física de los aceleradores...

*...a través de la física
de la vida cotidiana y el Universo*

TRADUCIDO AL ESPAÑOL POR JUAN CARLOS SANZ MARTÍN

De la física *con* los aceleradores a la física *de* los aceleradores

La física moderna fascina por su capacidad para adentrarse en los constituyentes últimos de la materia, miles de billones de veces más pequeños que el grosor de un cabello, o para retroceder en el tiempo, justo una fracción de segundo tras el Big Bang, hace 14.000 millones de años. Sin embargo, este viaje en el espacio hacia lo infinitesimalmente pequeño y en el tiempo hacia lo infinitamente lejano sólo se concreta, y adquiere realidad palpable, gracias a los aceleradores de partículas. Sin ellos, las diversas teorías que describen los quarks y los bosones seguirían siendo pura especulación. Pero con ellos, esas teorías cobran forma, encuentran la referencia, la piedra angular, que las justifica, las valida y las orienta luego hacia nuevos desarrollos. De descubrimiento en descubrimiento gracias a los aceleradores, los físicos, poco a poco, han podido avanzar con la ayuda de otros ladrillos y han sido capaces de diseñar la arquitectura distintiva, así lo estimamos, de la estructura y las fuerzas reinantes en lo íntimo de la materia que nos rodea y nos constituye.

El acelerador puede mostrar el camino a los físicos de partículas, desconcertados ante una encrucijada de múltiples vías.



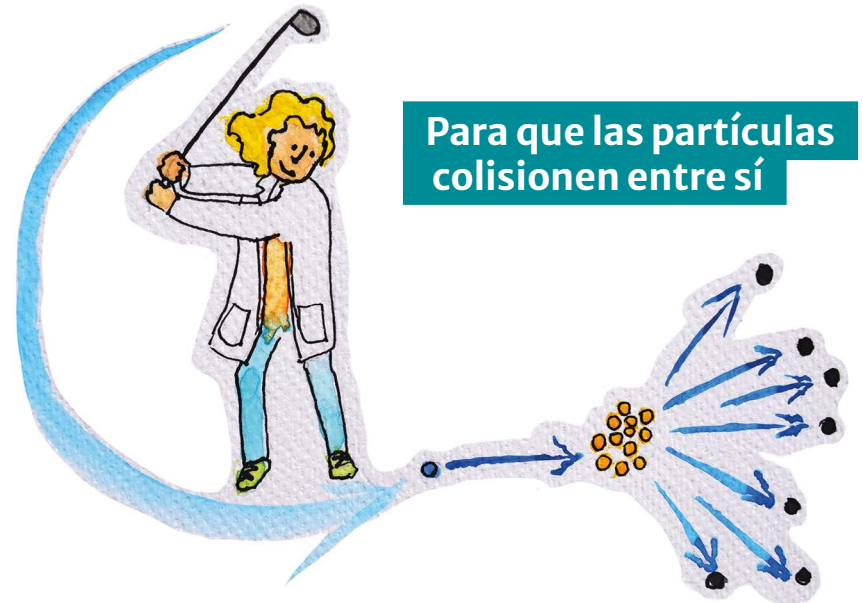
Desde su puesta en funcionamiento, hace 60 años, muchos aceleradores de partículas están vinculados con descubrimientos históricos en la física nuclear y de partículas. Actualmente se considera que existen unos 200 grandes aceleradores en todo el mundo destinados a la investigación científica general. A estos hay que sumar 24.000 aceleradores construidos con fines industriales, y 11.000 más, diseñados exclusivamente para terapias médicas.

Los campos de aplicación de los aceleradores son tan amplios como diversos. Son las herramientas favoritas en muchas disciplinas científicas y tecnológicas. Pero, ¿qué es un acelerador? ¿En qué ciencias y técnicas se basa?

En este manual repasaremos la física en que se asienta el funcionamiento de los aceleradores. Así, tras presentar brevemente las áreas que hacen uso de estas máquinas y su distribución en el mundo, se abordará la física de las partículas aceleradas y las fuerzas electromagnéticas asociadas. Veremos que ésta es la misma física que gobierna lo cotidiano y el Universo. Por tanto, estos últimos aspectos también serán cumplidamente discutidos.

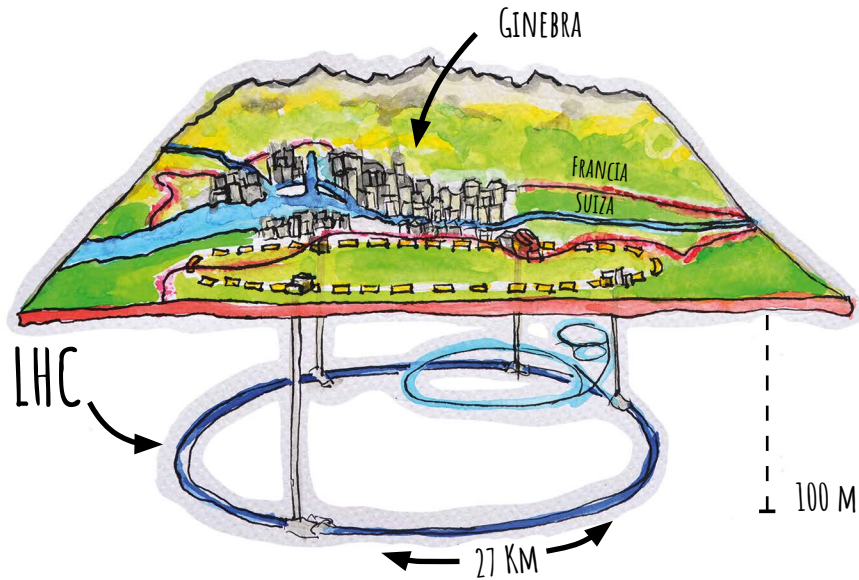
¿Para qué sirve un acelerador?

Hay aceleradores de muchas clases, lineales unos y circulares otros, que a su vez pueden subdividirse en distintos tipos... Y los hay de todos los tamaños, desde unos pocos metros, que caben en una habitación, hasta de varias decenas de kilómetros, que se extienden por un vasto territorio. Así pues, los aceleradores pueden clasificarse conforme a su tecnología o tamaño. Pero también es muy revelador catalogarlos según su uso. Y cabe distinguir tres usos principales, que siguen aproximadamente la senda histórica del desarrollo de estas máquinas: para la colisión entre partículas, para producir radiación sincrotrónica y para irradiar objetos.



Para que las partículas colisionen entre sí

Inicialmente, los aceleradores de partículas se pensaron para que las partículas de materia colisionaran entre sí. El objetivo es romperlas para ver su interior y lo que surge tras ese choque. Esta estrategia de análisis es uno de los pilares del método científico: para comprender un sistema complejo lo cortamos y descomponemos en trozos más



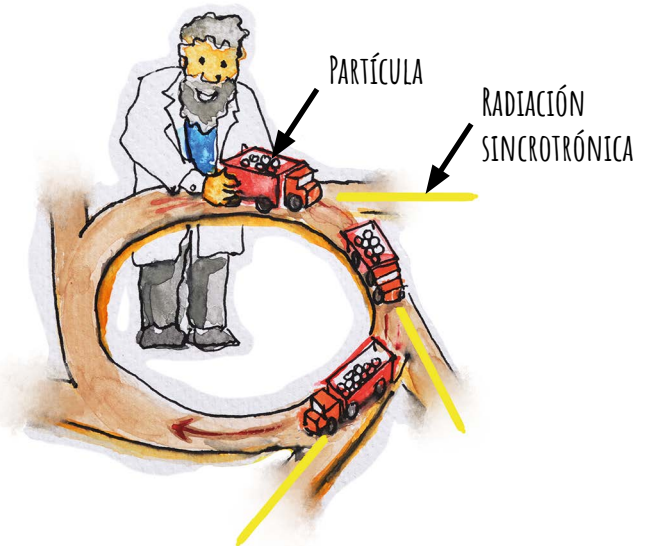
Colisionador de partículas. El LHC, en la frontera franco-suiza. La ciudad de Ginebra da una idea de su tamaño.

pequeños para estudiarlos por separado, con la esperanza de que luego seremos capaces de entender el conjunto. Así obra la ingenua curiosidad infantil, que, para discernir cómo funciona un dispositivo determinado, casi siempre empieza por desarmarlo. Por eso suele decirse que los científicos son, en cierto modo, «niños grandes».

Gracias a las colisiones de partículas del átomo y su núcleo hemos podido estudiar los componentes más recónditos de la materia, hasta la escala de la trillonésima de metro. Por tanto, este tipo de acelerador sirve para que la comunidad de físicos nucleares y de partículas investiguen la física fundamental. El mayor acelerador de este tipo es el LHC (Gran Colisionador de Hadrones), ubicado en el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear). Tiene 27 km de circunferencia y se extiende a ambos lados de la frontera franco-suiza. En Francia, el GANIL (Gran Acelerador Nacional de Iones Pesados), situado en Caen, es otro importante centro acelerador dedicado al estudio del núcleo atómico.

Igual que en la infancia deseamos juguetes cada vez más bellos y potentes, los científicos piden aceleradores paulatinamente más poderosos, que aceleren las partículas a mayor energía para así romper la materia más profundamente y estudiar sus componentes más secretamente ocultos. Al principio se pensaba que los aceleradores circulares no tendrían que ser muy grandes, pues las partículas, al recibir en cada vuelta un impulso adicional, podrían acelerarse indefinidamente. Sin embargo, existe un proceso físico que frustró esa idea: las partículas cargadas, siempre que describen un movimiento curvo, pierden energía en forma de radiación (luz). Algo semejante a un camión cargado de piedras que al transitar por una curva pierde unas pocas. Por ese motivo, si queremos alcanzar energías más altas, hay que construir aceleradores cada vez mayores. Los giros son menos pronunciados y, en consecuencia, se minimiza la radiación que se pierde, denominada radiación sincrotrónica que se consideraba un fenómeno parásito.

Para producir radiación sincrotrónica



Acelerador de radiación sincrotrónica.

No obstante, pronto se advirtió que la radiación sincrotrónica tenía propiedades excepcionales: hasta 10.000 veces más intensa que la luz solar, está concentrada, como la luz láser, en haces delgadísimos y muy direccionales y, al tiempo, abarca un amplísimo intervalo espectral (gama de colores), que va desde las microondas hasta los rayos X, pasando por la luz visible.

Así, además de los colisionadores, se ha diseñado otro tipo de aceleradores, optimados para producir la máxima cantidad de radiación sincrotrónica. Estas máquinas permiten sondear, observar y, por tanto, estudiar materiales físicos o biológicos hasta la escala de una millonésima de metro, como si se tratara de un supermicroscopio gigante. Estas máquinas, con circunferencias que suelen ser de varios cientos de metros, las utilizan múltiples grupos de físicos, químicos y biólogos, pero también de industriales, médicos, farmacéuticos, historiadores del arte, etc. Por su tamaño, no excesivo, y la heterogeneidad de sus usuarios, estos aceleradores son las herramientas de investigación más utilizadas en el mundo. Los países o regiones que desean adquirir instrumentos de investigación a gran escala con frecuencia comienzan por equiparse con este tipo de máquinas ¹.

También surge luz sincrotrónica cuando se hacen oscilar electrones con bajas amplitudes. Esto se logra mediante un dispositivo magnético denominado ondulator.

La brillantez de ésta —es decir, el número de interacciones que, gracias a las interferencias constructivas, puede experimentar la radiación sincrotrónica de una determinada amplitud, en un lugar y un instante precisos— puede ser muy grande. Alineando un elevado número de estos ondulator, la amplificación es análoga a la de un láser. Es el efecto llamado de láser de electrones libre. Las

¹ ALBA, un complejo de aceleradores de electrones, es la mayor fuente de radiación sincrotrónica en España. Las aplicaciones de este dispositivo, que se emplea para analizar las propiedades de la materia a nivel atómico y molecular, abarcan numerosos ámbitos: física, química, biología medicina, medio ambiente, patrimonio histórico, etc. El acelerador ALBA, que está emplazado en Cerdanyola del Vallès (Barcelona, España) y forma parte de la red de Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares (ICTS), es una instalación pública financiada a partes iguales por el Gobierno de España y la Generalidad de Cataluña. Está gestionado por el Consorcio para la Construcción, Equipamiento y Explotación del Laboratorio de Luz de Sincrotrón (CELLS) y forma parte de la Liga Europea de Fotones basados en aceleradores (LEAPS). El proyecto ALBA arrancó recién iniciada la década de 1990. Su primera piedra se puso en 2003 y se inauguró oficialmente en marzo de 2010, aunque la operatividad llegó un año más tarde [N del T].

últimas generaciones de aceleradores de radiación sincrotrónica de alta brillantez son máquinas lineales, de varios kilómetros de longitud, que aceleran electrones y luego los envían a través de largas series de ondulator.

Para irradiar objetos



La dirección, el tamaño y la energía del haz de partículas aceleradas puede ajustarse con mucha precisión y, en consecuencia, puede utilizarse directamente para irradiar objetivos diversos. Sabiendo que por encima de una cierta dosis puede destruir células, esta radiación puede emplearse para eliminar tumores malignos o esterilizar equipos médicos y conservas alimentarias. Hasta hoy, más de 75.000 pacientes han sido tratados con éxito mediante protonoterapia (haz de protones) y hadronoterapia (haz de iones), lo que representa una valiosa alternativa a la radioterapia de rayos X. Esta clase de aceleradores, en que se irradia un determinado blanco, también suele emplearse en la

industria para el tratamiento de superficies o el grabado de alta precisión. Los historiadores los utilizan para analizar obras de arte del pasado.

En general estos aceleradores son de tamaño modesto, desde unos pocos metros hasta decenas de metros y, por tanto, son los más extendidos. Recientemente se han instalado en centros de investigación científica grandes aceleradores, del orden de un kilómetro, lineales y circulares, para irradiar objetivos especialmente diseñados para producir neutrones (constituyentes eléctricamente neutros del núcleo atómico). Estos haces de neutrones pueden ser en sí mismos tema de estudio o servir como sonda para examinar materiales inertes u orgánicos. Sus aplicaciones, al abarcar un amplio abanico de temas científicos, industriales y médicos, benefician a múltiples grupos de usuarios.

También existen fuentes de neutrones más compactas, con aceleradores lineales² de pocos metros, destinadas al análisis neutrónico o para producir isótopos con aplicación en la medicina nuclear.

¿Dónde están los principales centros de aceleradores?

Los grandes centros de aceleradores, donde trabajan permanentemente más de un centenar de investigadores, ingenieros y técnicos, están ubicados principalmente en Europa Occidental, América del Norte y Asia Oriental. Aquí se recoge una lista no exhaustiva:

FRANCIA: IRFU / DACM (SACLAY), IJCLAB (ORSAY), SOLEIL (SAINT AUBIN), GANIL (CAEN), ESRF (GRENOBLE)

SUIZA: CERN (GINEBRA), PSI (VILLIGEN)

ALEMANIA: DESY (HAMBURGO), GSI (DARMSTADT), COSY (JULICH), BESSY (BERLÍN), ANKA (KARLSRUHE)

REINO UNIDO: DIAMOND (DIDCOT), RAL (OXFORD), STFC (DARESBURY)

SUECIA: MAX-LAB (LUND), ESS (LUND)

ITALIA: ELETTRA (TRIESTE), INFN (FRASCATI, LEGNARO, CATANIA)

ESPAÑA: ALBA (BARCELONA), CIEMAT (MADRID)

ESTADOS UNIDOS: ALS (BERKELEY), FNAL (BATAVIA), LANL (LOS ALAMOS), SNS (OAK RIDGE), ANL (CHICAGO), SLAC (STANFORD), BNL (UPTON), AJEDREZ (CORNELL)

CANADÁ: TRIUMF (VANCOUVER), CLS (SASKATOON)

BRASIL: LNLS (CAMPINAS)

JAPÓN³: SPRING-8 (SAYŌ-CHŌ), KEK (TSUKUBA), J-PARC (TŌKAI-MURA)

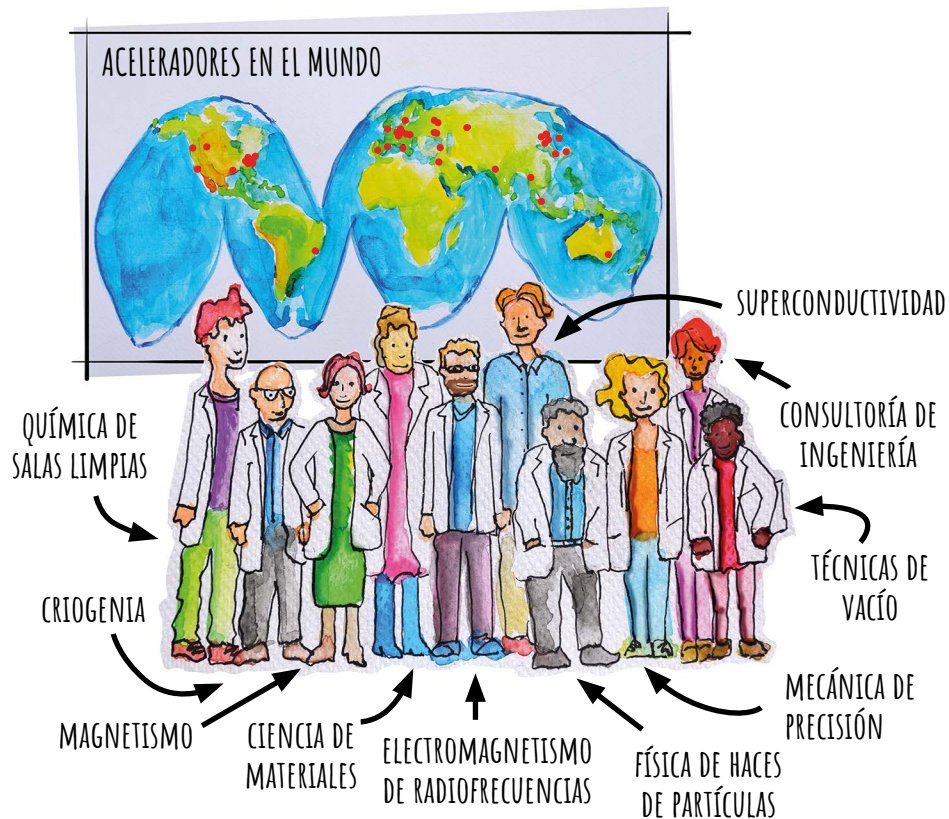
CHINA: SSRF (SHANGHÁI), IHEP, BEPC (PEKÍN), HLS (HEFEI), IMP (LANZHOU)

COREA DEL SUR: PAL (POHANG), PEPF (YUEONG)

TAILANDIA: SLRI (NAKHON RATCHASIMA)

² Y no sólo lineales [N del T]

³ Es interesante destacar también la instalación LIPAc, prototipo del futuro IFMIF, en Rokkasho [N del T].



Enclaves de los principales centros de investigación de aceleradores de todo el mundo y profesiones implicadas.

Los aceleradores abarcan ámbitos muy diversos: física de haces de partículas, magnetismo, electromagnetismo, radiofrecuencia, superconductividad, criogenia, química de salas limpias, ciencia de materiales, técnicas de vacío, mecánica de precisión, consultoría de ingeniería, etc.

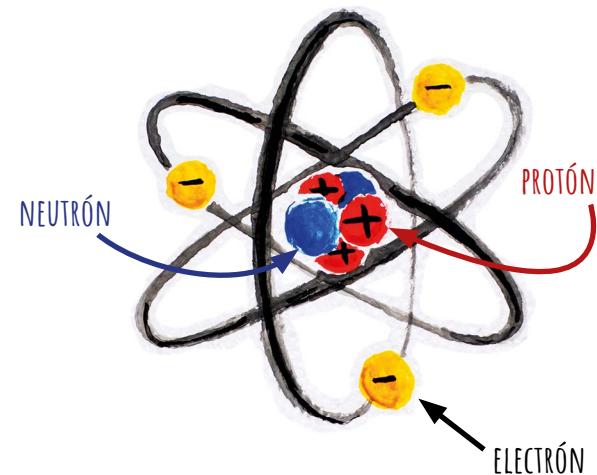
Los aceleradores, pues, son omnipresentes en nuestras vidas, pero falta saber cuál es el meollo del asunto: la física de los aceleradores de partículas. En otras palabras: ¿cómo funciona un acelerador?

Para responder a tal cuestión, después de examinar qué es un haz de partículas en un acelerador, presentaremos las dos fuerzas que pueden actuar sobre dicho haz: el campo eléctrico y el campo magnético. Más adelante veremos cómo generar tales campos y, luego, cómo producir esas partículas. Acabaremos mostrando los dispositivos que se utilizan para estos propósitos en un acelerador. Todo ello con algún paréntesis sobre diferentes objetos cotidianos y del Universo...

¿Qué es un haz de partículas?

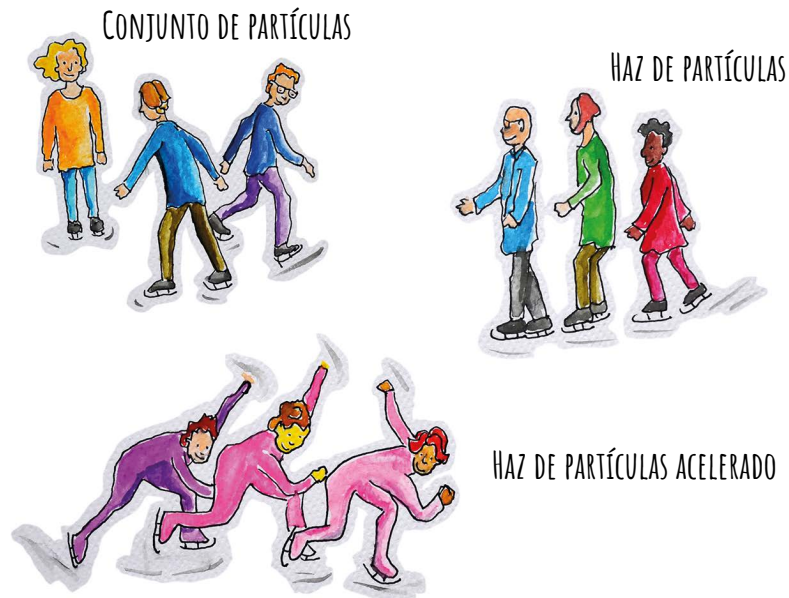
Aclaremos seguidamente que en un acelerador el término «partícula» designa una partícula cargada eléctricamente. Pero antes conviene advertir que la materia que nos rodea y de la que estamos hechos está formada por átomos, y que cada átomo está compuesto por un núcleo de carga eléctrica positiva (+), rodeado por electrones de carga eléctrica negativa (-). Por otro lado, las cargas del mismo signo se repelen entre sí, como entre + y +, o - y -. Y las cargas de signos opuestos se atraen, como en el caso de + y -. Este principio es el más importante que se encontrará a lo largo del presente manual.

Debido a este principio, un átomo estable suele ser eléctricamente neutro porque hay tantas cargas + como -. Gracias a esto, no nos electrocutamos cuando tocamos cualquier objeto a nuestro alrededor.



Átomo constituido por un núcleo (formado por cargas eléctricas positivas, llamadas protones, y partículas sin carga, llamadas neutrones) rodeado por cargas eléctricas negativas, llamadas electrones.

Si dejas a su suerte un conjunto de partículas cargadas, sus movimientos son aleatorios y desordenados, como en un patio de recreo donde los estudiantes entran y salen a placer. Cuanto más caliente esté aquel conjunto tanto más rápidos serán los movimientos de las partículas, que ocuparán mayor espacio. Esto se conoce como **agitación térmica**. Sin embargo, el conjunto en sí no ha cambiado de lugar. Un acelerador no se ocupa de este tipo de conjuntos de partículas. Sólo nos referiremos a los **haces de partículas**, es decir, a las partículas dotadas de un movimiento colectivo, cada una de las cuales puede tener distinta velocidad, pero todas marchando en la misma dirección y con el mismo sentido, como en una carrera pedestre. Lo que queremos producir es un haz de partículas para acelerarlo luego, es decir, deseamos aumentar la velocidad colectiva hasta que el haz de partículas adquiera el aspecto de una carrera de coches.

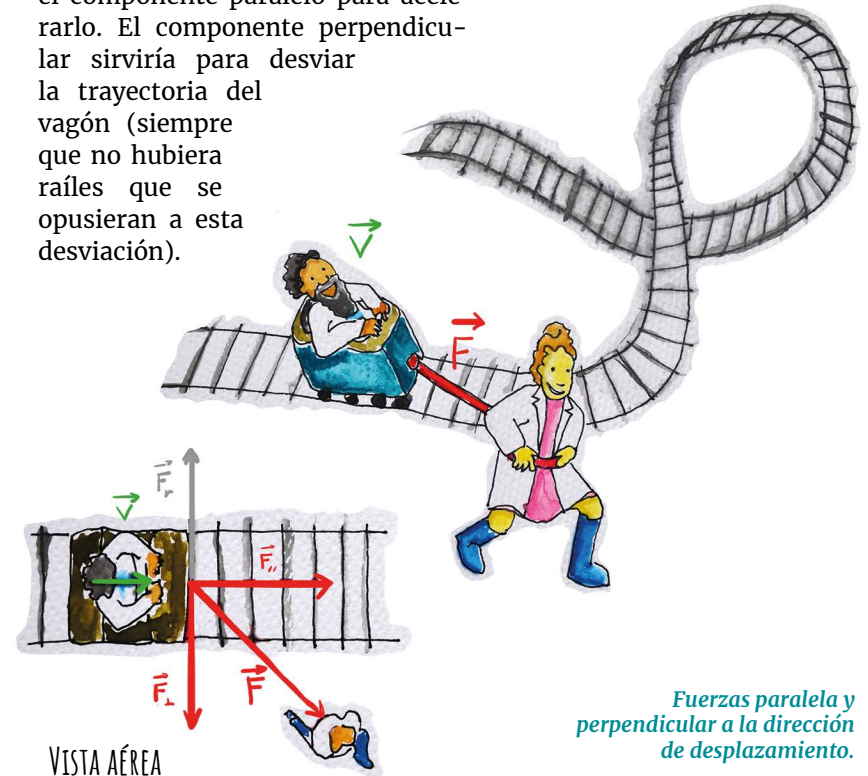


Conjunto de partículas y haz de partículas.

La velocidad total de las partículas es la característica principal de un acelerador. El término «energía» denota la energía cinética de las partículas, es decir **la energía vinculada a la velocidad colectiva**. Cuanto más veloz sea cada partícula, mayor será su energía.

¿Cómo aceleramos las partículas?

Para acelerar un objeto, es decir, para aumentar su velocidad, se precisa ejercer una fuerza sobre él. Esto sucede, por ejemplo, cuando vamos en bicicleta: si queremos ir más rápido tenemos que pedalear con más vigor. Representemos la partícula mediante un vagón que marcha sobre raíles a una cierta **velocidad**, representada por el vector designado por \vec{v} , que nos indica la dirección y el sentido del movimiento. Un personaje tira de él, es decir, ejerce una fuerza sobre el vagón para intentar acelerarlo. Su **fuerza**, representada por el vector designado por \vec{F} , puede dividirse en dos componentes, uno paralelo a la velocidad, es decir coincidente con la dirección del movimiento, y otro perpendicular a ella. Fácilmente se advierte que sólo se utilizará el componente paralelo para acelerarlo. El componente perpendicular serviría para desviar la trayectoria del vagón (siempre que no hubiera raíles que se opusieran a esta desviación).



Fuerzas paralela y perpendicular a la dirección de desplazamiento.

En un acelerador se requieren fuerzas paralelas a la dirección del desplazamiento para acelerar las partículas. Pero también necesitamos fuerzas perpendiculares para guiarlas al lugar donde acelerarlas para hacerlas colisionar o irradiar un objeto, y también para enfocarl⁴ (= reagruparlas), pues, de lo contrario, se dispersarían muy rápidamente debido a las fuerzas repulsivas entre cargas eléctricas de igual signo.

De hecho, **un acelerador debe producir partículas cargadas, acelerarlas, enfocarl⁴ y guiarlas**. Pero el término «acelerador-productor-focalizador-guía de partículas» es demasiado largo. Por eso utilizamos la versión abreviada: «acelerador de partículas». No obstante, hay que tener en cuenta que todas las demás operaciones están presentes en un acelerador.

Averigüemos cómo se realizan todas estas acciones y cuáles son los dispositivos que permiten cumplirlas.

Primero, hay que aplicar una fuerza a las partículas cargadas, y esto sólo puede hacerse de dos maneras: usando un campo eléctrico o uno magnético.

Veamos a continuación los efectos de uno y otro campo sobre las partículas cargadas y, luego, cómo producir tales campos.

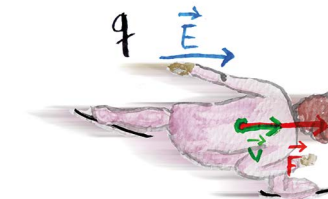
Efecto de los campos eléctrico y magnético

Los campos eléctricos y magnéticos no son visibles ni palpables. Sin embargo, todos nosotros y todos los objetos del Universo estamos constantemente inmersos en ellos. Es como el campo gravitatorio de la Tierra, que no podemos ver ni tocar, pero sí cabe entenderlo y aprehenderlo por su efecto: la fuerza de gravedad, que atrae cualquier masa hacia el suelo.

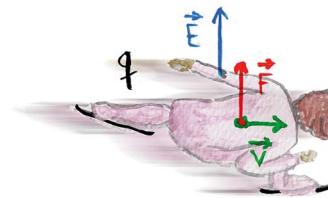
Análogamente, en lugar de intentar definir con precisión qué es un campo eléctrico o uno magnético, examinemos las acciones que ejercen ambos sobre una partícula cargada (eléctricamente) y veamos cómo producir estos campos para comprenderlos mejor.

Representaremos los campos eléctrico y magnético mediante sendos vectores designados por \vec{E} y \vec{B} , respectivamente. Si colocamos una partícula cargada en un campo eléctrico, representado por un

FUERZA ACELERADORA



FUERZA DESVIADORA (O FOCALIZADORA)



VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO \vec{v}



CARGA ELÉCTRICA q



CAMPO ELÉCTRICO \vec{E}



FUERZA $\vec{F} = q\vec{E}$



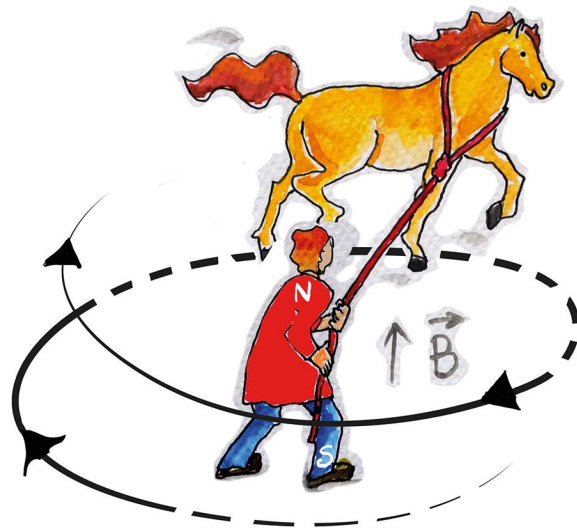
⁴ Que es algo parecido a lo que hacen los raíles en el anterior ejemplo del tren [N del T].

La fuerza del campo eléctrico puede acelerar, desviar (y enfocar) partículas.

vector designado por \vec{E} , la fuerza, \vec{F} , que ejerce este campo sobre la partícula es paralela al campo mismo. Entonces, si queremos acelerarla, basta aplicar un campo paralelo a la velocidad, \vec{v} , y si deseamos guiarla o enfocarla, hay que utilizar un campo perpendicular a esa velocidad. El campo eléctrico puede emplearse para acelerar, pero también para guiar o enfocar partículas cargadas.

Ahora podríamos estar tentados a decir que bastaría un campo eléctrico para que una partícula realizase cualquier movimiento que se quisiera. Pero, realmente, nunca pueden alinearse perfectamente este campo y la velocidad las partículas. Diminutas e inevitables perturbaciones hacen que un campo eléctrico aplicado para acelerar en una dirección y un sentido también ocasione pequeños desvíos, y viceversa.

Por otro lado, cuanto mayor es la energía cinética de la partícula más eficiente resulta la aplicación de un campo magnético, representado por un vector designado por \vec{B} , pues la fuerza que produce éste es proporcional a la velocidad de la partícula. Obsérvese que esta fuerza siempre es perpendicular a la velocidad. Un campo magnético, pues, sí puede usarse exclusivamente para guiar o enfocar partículas. También conviene recordar que un campo magnético nunca puede proporcionar (o recuperar) energía a (de) las partículas.



Guiar o enfocar con un campo magnético como un vaquero lazando a un caballo. Las partículas cargadas giran alrededor de las líneas del campo magnético.

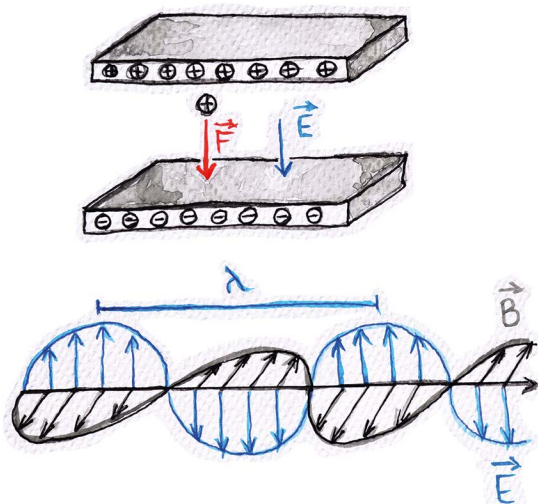
Pero, ¿cómo se mueven las partículas en un campo magnético? Importa saber que un objeto sometido a una fuerza perpendicular a su velocidad necesariamente describe un movimiento de rotación. Esto es fácil de entender. Imagínese un vaquero muy talentoso con la cuerda y, delante de él, un caballo que trota en paralelo. Entonces, el vaquero arroja su lazo, agarra al caballo y tira de él: en ese momento el vaquero ejerce una fuerza perpendicular a la dirección del movimiento del caballo. Supongamos que el caballo, muy terco —un poco como nuestras partículas cargadas...—, siguiese corriendo inalterable, a la misma velocidad. En consecuencia, el caballo, sin perder su energía, se pondría a girar alrededor del vaquero. Esto es lo que sucede con las partículas cargadas: rotan en círculos o espirales alrededor de las líneas del campo magnético.

Este principio se utiliza en los aceleradores. Para que el haz de partículas describa una trayectoria curva con un cierto ángulo determinado, se aplica un campo magnético sobre un tramo preciso de su recorrido. Para enfocar las partículas se aplica un campo magnético que las obliga a girar en espiral alrededor del campo. Cuanto mayor sea la intensidad de éste, más cerca del centro girarán en espiral y, por tanto, más se reagruparán.

¿Cómo producir un campo eléctrico?

La primera idea que acude a la mente es colocar cargas de signos opuestos, + y -, en sendas placas conductoras separadas por un aislante. Esto es lo que se hace en una pila, una batería o un condensador, creando dos polos, uno + y otro -. Una partícula cargada + colocada entre estas dos placas será repelida por la cargada + y atraída por la cargada -. Esto prueba que ha aparecido un campo eléctrico entre ambas placas y que la partícula está sufriendo una fuerza eléctrica.

Este sencillo principio se utilizó en los primeros aceleradores. Sin embargo, como ya se ha dicho, los científicos piden dispositivos cada vez más potentes. Para ello, parece que bastaría acumular más cargas en cada placa, pero esto tiene un límite más allá del cual el dispositivo es inestable: las cargas de signos opuestos se atraen paulatinamente con mayor fuerza y, entonces, saltaría una chispa entre las placas y las cargas se unen con gran estrépito. Este fenómeno de ruptura puede



Campo electrostático entre dos placas cargadas y oscilante en una onda electromagnética.

ser muy violento, como el rayo en una tormenta, cuando las nubes y el suelo están muy cargados eléctricamente.

Así pues, para generar campos eléctricos más intensos hay que usar el principio de ondas electromagnéticas confinadas.

¿Qué es una onda electromagnética? La onda más visible es una ola en la superficie del mar. Ésta es una onda de materia. Es decir, vemos materia, en este caso agua, oscilando rítmicamente y propagándose a enorme distancia. En una onda electromagnética, los que oscilan y se propagan son los campos eléctrico y magnético. La luz visible es una de estas ondas, al igual que las ondas de radio, televisión, telefonía móvil, Bluetooth, wifi, etc. El Universo también nos envía una inmensa cantidad de ondas que llamamos radiación cósmica. Ahora ya lo sabemos, estamos de continuo inmersos en un mar de ondas electromagnéticas, con diferentes nombres, pero todas de idéntica naturaleza.

¿Qué principios gobiernan tales ondas? De partida, hemos hablado de los campos eléctrico y magnético como si uno y otro fueran fenómenos completamente inconexos. Pero, de hecho, están vinculados y el comportamiento de ambos está descrito por las espléndidas

leyes de Maxwell, un científico inglés del siglo XIX que trabajó en la Universidad de Cambridge. Estas leyes afirman que, si un fenómeno eléctrico varía en el tiempo, siempre irá acompañado de un fenómeno magnético, y viceversa. Así, por ejemplo, para producir una onda electromagnética se usa una antena a lo largo de la cual se hacen oscilar cargas eléctricas.

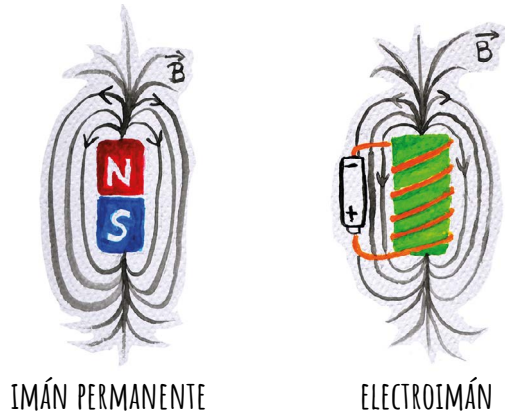
Para acelerar las partículas, se utiliza el componente eléctrico de la onda electromagnética, que puede amplificarse considerablemente atrapándolo en una cavidad resonante. Esto se hace comúnmente con las ondas sonoras (que son partículas de aire, oscilando y propagándose, que al llegar a nuestro oído provocan la vibración del tímpano y nos permiten escuchar el sonido). En efecto, todos los instrumentos musicales, ya de cuerda, ya de viento, ya de percusión, tienen cajas de resonancia sin las cuales su sonido no se amplificaría y no podría escucharse muy lejos. En los aceleradores, se utiliza una serie de cavidades, denominadas de radiofrecuencia (RF), para acelerar las partículas a energías cada vez más altas. Para poder resistir campos eléctricos muy elevados y, por tanto, corrientes superficiales de varios miles de amperios (adviértase que la corriente doméstica es del orden de unos pocos amperios), estas cavidades deben enfriarse a temperaturas criogénicas cercanas al cero absoluto.

¿Cómo generar un campo magnético?

Un campo magnético puede generarse mediante imanes permanentes, como las placas magnéticas que forman parte de los juguetes infantiles. Por fuera del imán el campo magnético está orientado del polo norte al polo sur. Se pueden construir imanes para crear campos de hasta 10.000 gauss, intensísimos en comparación con el campo magnético terrestre, de 0,5 gauss. Pero, con esta técnica no pueden obtenerse campos más altos y, lo que aún es más frustrante, su amplitud es fija, vetando cualquier flexibilidad o variación.

La mayoría de los aceleradores necesitan campos magnéticos capaces de ajustarse libremente y, para ello, se utilizan electroimanes. Para construir un electroimán basta hacer circular una corriente eléctrica en una bobina formada por devanados de hilo conductor. Con ello se crea un fenómeno eléctrico que varía con el tiempo y, por tanto,

según lo predicho por las leyes de Maxwell mencionadas antes, aparece un campo magnético orientado paralelamente al eje de la bobina. En términos de jerga, dicha bobina se llama solenoide. Estas bobinas, siempre que se enfríen a temperaturas criogénicas cercanas al cero absoluto, pueden generar campos de hasta 100.000 gauss.



Campo magnético fijo producido por un imán permanente y campo magnético variable de un electroimán.

Un electroimán no es más que una dinamo a la inversa. Las bicicletas suelen estar equipadas con uno de estos artilugios: un pequeño dispositivo que produce electricidad para hacer funcionar el faro. La dinamo está constituida simplemente por una bobina eléctrica en cuyo centro gira un pequeño imán, impulsado por la rueda de la bicicleta. Este fenómeno magnético, variable en el tiempo, produce la corriente eléctrica deseada. A mayor escala, las compañías eléctricas que producen electricidad y la suministran a nuestros hogares usan dinamos parecidos, pero mucho mayores. Esta vez, lo que hace girar al imán es una cascada que cae de una presa, en el caso de una central hidroeléctrica, o una turbina de vapor a alta presión, en el caso de una central térmica, ya de carbón, ya nuclear.

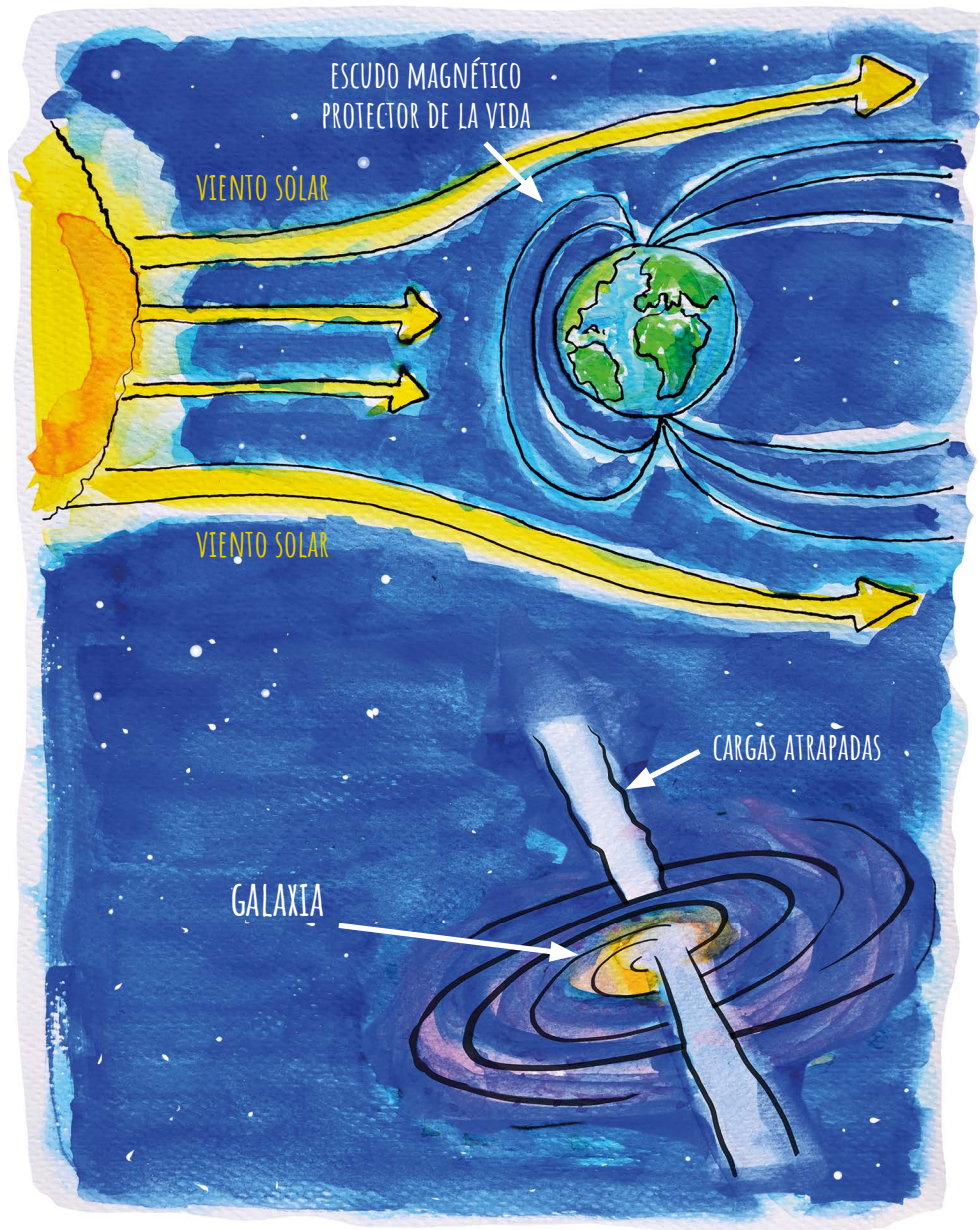
En una escala aún mayor, echemos un vistazo al ya mencionado campo magnético de la Tierra, que nos permite orientarnos con ayuda de las brújulas. ¿Qué lo causa? Importa saber que el centro de la Tierra está muy caliente, con una temperatura en torno a los 5.000°C. Por tanto, allí la agitación térmica es muy fuerte, lo que significa que los

Producción de corriente eléctrica mediante una dinamo, en una bicicleta y en una central hidroeléctrica.



átomos se rompen, separándose las cargas eléctricas. La Tierra, pues, al girar sobre sí misma, es un sistema equivalente a una bobina gigante atravesada por una corriente eléctrica que crea un enorme campo magnético. Y, una gigantesca dinamo a la inversa da lugar a un colosal electroimán.

Vayamos algo más lejos. El Sol, aún mucho más caliente y que también gira sobre sí mismo, alberga fenómenos magnéticos de una magnitud ciclópea. También expulsa al espacio, en particular hacia la Tierra, prodigiosas cantidades de partículas cargadas que, de incidir en la Tierra, a largo plazo habrían arrasado nuestra atmósfera, además de haber dañado intensamente a las células e impedir la aparición y la evolución de la vida tal como la conocemos. Sin embargo, como aquel vaquero que laceaba reses, el campo magnético de la Tierra atrapa esas partículas, obligándolas a girar en espirales alrededor de las líneas del campo, en un movimiento de vaivén de un polo al opuesto. Durante las fuertes tormentas solares, y sólo por sus mayores cantidad y energía, esas partículas pueden llegar a la superficie terrestre, especialmente a los polos, origen de las líneas de campo, produciendo las auroras boreales y australes. Las mayores tormentas solares,



Dínamo inversa y captura de partículas cargadas gracias a los escudos magnéticos terrestre y galáctico.

además hacen que las partículas más energéticas procedentes del Sol penetren a mayor profundidad en la atmósfera de la Tierra, pudiendo dañar gravemente a nuestros satélites espaciales y a la infraestructura eléctrica. Así sucedió el 13 de marzo de 1989, cuando colapsó el sistema eléctrico de Quebec (Canadá), privando de electricidad durante 9 horas a 6 millones de usuarios.

Sin el campo magnético de la Tierra, muy adecuadamente llamado escudo magnético, no estaríamos aquí y ahora para discutir todos estos fenómenos.

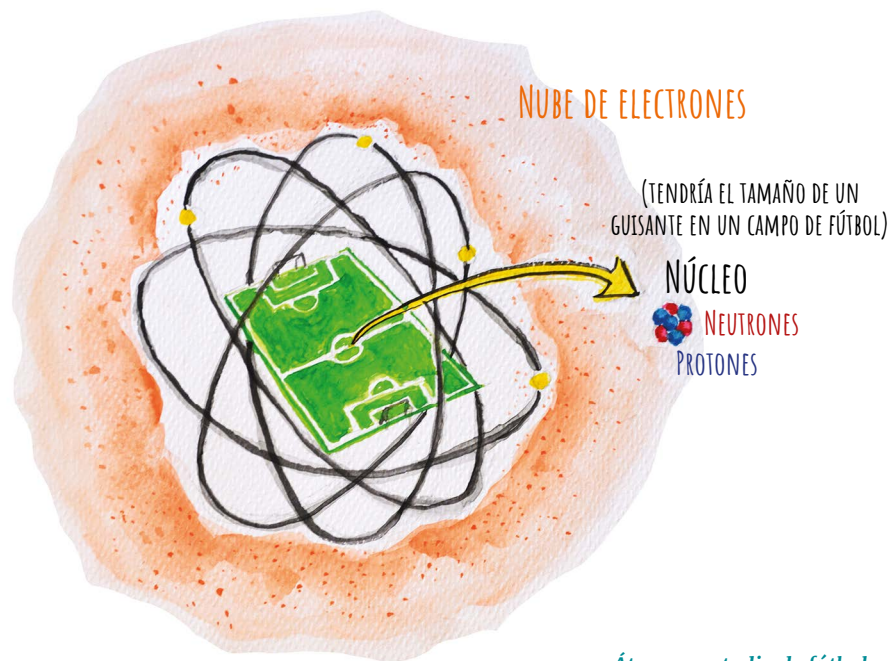
Tales interacciones entre partículas cargadas y campos magnéticos se observan en escalas aún mayores en el Universo. Por ejemplo, ciertas galaxias, esos conjuntos de trillones de estrellas, cada una de las cuales es más o menos equivalente a nuestro Sol, se asemejan a un objeto luminoso que consiste en un disco algo difuso de cuyo eje surge una estela rectilínea (ver imagen). La razón es que, al rotar la galaxia sobre sí misma, se genera un campo magnético axial que atrae a las partículas, haciendo de este eje una vía privilegiada para que esas partículas entren y salgan de la galaxia. Como éstas se ven obligadas a girar alrededor de ese eje, emiten luz sincrotrónica que hace que este eje sea luminoso.

Podemos ver claramente que todos los ingredientes de los aceleradores, a saber, partículas cargadas, corriente eléctrica, campo magnético, dínamo, dínamo inversa y radiación sincrotrónica, se encuentran en cualquier escala de nuestra vida diaria y el Universo.

¿Cómo producir partículas cargadas?

Antes se dijo que los átomos son eléctricamente neutros porque los protones cargados + en el núcleo y los electrones cargados - a su alrededor se compensan y están unidos por la fuerza electromagnética que atrae entre sí cargas de signos opuestos. En consecuencia, producir partículas cargadas equivale a separar tales cargas.

Los electrones están realmente muy lejos de los protones. Si creciera el núcleo de un átomo hasta igualar el tamaño de un balón de fútbol, entonces los electrones estarían en el lugar que ocupan los espectadores de las últimas gradas de un gran estadio de fútbol. Es



Átomo y estadio de fútbol.

muy débil, pues, la fuerza que atrae entre sí a protones y electrones. Apenas se precisan pequeños movimientos para separarlos. Basta frotar, calentar o agitar un poco. Adviértase que estas tres acciones son parecidas, porque frotar genera calor (como restregarse las manos) y, como se mencionó antes, el calor induce agitación térmica.

Por consiguiente, todos los días y todos producimos partículas cargadas. Basta caminar, y una leve fricción de los zapatos sobre cualquier alfombra, para engendrar partículas cargadas que luego se distribuyen por nuestro cuerpo, ¡lo que provoca una chispa eléctrica al dar la mano o besar!

Un juego infantil muy popular consiste en frotar una varilla de plástico y acercarla a pequeños trozos de papel para hacerlos bailar y saltar. Son las partículas cargadas producidas por la fricción del plástico las que atraen las partículas del papel con carga opuesta.

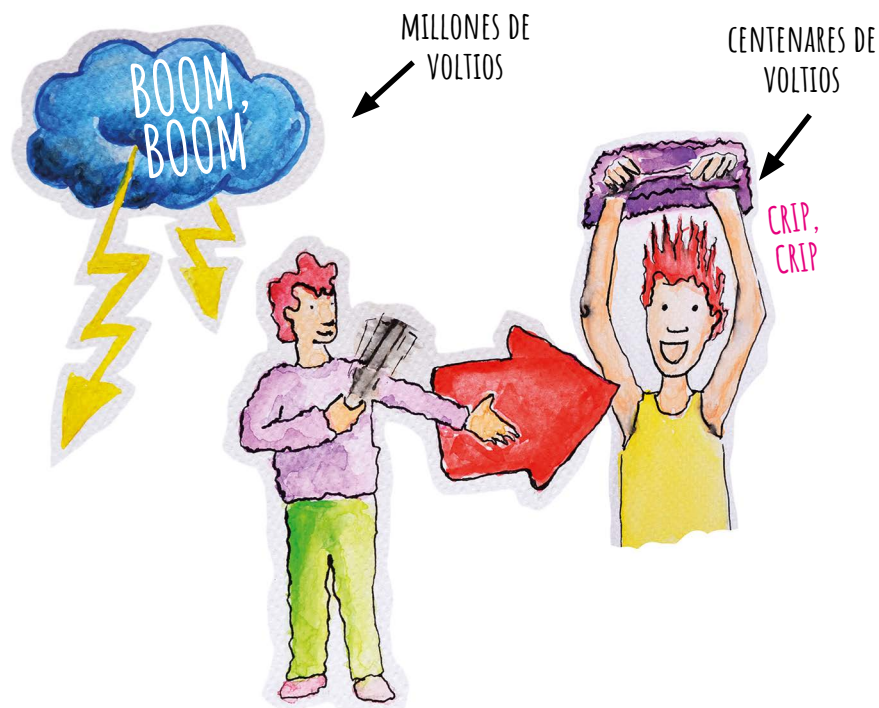
Otro ejemplo con el que nos topamos a diario sucede al quitarnos el suéter pasándolo por la cabeza. De inmediato todo el pelo se eriza. Es obra de las cargas del mismo signo que se producen cuando la prenda roza los cabellos, que se repelen entre sí. Si se producen suficientes cargas, también podemos escuchar pequeños chasquidos «crack»,

incluso pequeños destellos, tanto en el pelo como en el suéter. Se debe a que las cargas de signos opuestos logran abrirse paso a través del aire para encontrarse, a pesar del carácter aislante de la atmósfera.

Estos fenómenos, denominados de electricidad estática, también se encuentran en todas las escalas. Por ejemplo, tenemos el caso de las tormentas eléctricas. Éstas suelen estallar en países tropicales cuando hace calor y humedad, a veces en momentos específicos al caer la tarde. Este hecho, que se debe a la producción y la acumulación de partículas cargadas, se activa tan pronto como hay suficientes. Cuando el clima es muy caluroso y el sol abochorna, el suelo absorbe la mayor parte de la energía solar y abrasa. Entonces la capa de aire en contacto con él se calienta más que las capas superiores y, por tanto, la agitación térmica allí será mayor. El aire, pues, se dilata, ocupando mayor volumen y, consecuentemente, su densidad, es decir, el número de moléculas por unidad de volumen, disminuye. Y este aire más cálido se elevará muy rápidamente en el seno del aire más frío.

Este fenómeno se conoce como empuje de Arquímedes, en honor al científico griego que vivió hace 2.300 años. Cuenta la leyenda que, estando Arquímedes un día en su bañera, al preguntarse por qué el trozo de jabón se hundía hasta el fondo mientras la esponja flotaba en la superficie del agua, comprendió que un cuerpo menos denso sube y flota sobre el que es más denso: la esponja, al contrario que el jabón, tiene menos densidad que el agua. Estaba tan feliz que salió a la calle gritando ¡Eureka! (¡Lo encontré!). Por ejemplo y sin ir tan lejos, todo el mundo puede experimentar esto en una piscina, intentando sumergir una boya llena de aire en el fondo del agua. No sólo es difícil, pues hay que ejercer una fuerza significativa, sino que una vez logrado si se suelta la boya sube veloz a la superficie.

Esto es lo que sucede con nuestra capa de aire más cálido y menos denso: se elevará muy rápidamente en la atmósfera para formar enormes nubes cargadas de agua. Durante dicho proceso, debido a la fricción con las capas de aire circundantes, se generará una voluminosa cantidad de partículas cargadas. El aire terminará muy repleto de electricidad, pero son las nubes sobre todo las que acumularán más cargas. Éstas atraerán otras de signo opuesto que, a su vez, se habrán depositado a ras del suelo. Tenemos el equivalente a las dos placas del condensador mencionado antes para producir un campo eléctrico. A partir de cierto umbral, el aire ya no puede desempeñar su papel de aislante y las cargas se abrirán camino para encontrarse: surge así



Diferentes manifestaciones de partículas cargadas.

el rayo de la tormenta, que se desencadena con un gran trueno. Este fenómeno es idéntico al del suéter y el cabello citado más arriba, excepto que, en lugar de desarrollar unos cientos de voltios, en este caso estamos en presencia de cientos de millones de voltios (como recordatorio, la electricidad doméstica funciona a 220 voltios). En lugar de un «crip, crip», suena un «boom, boom».

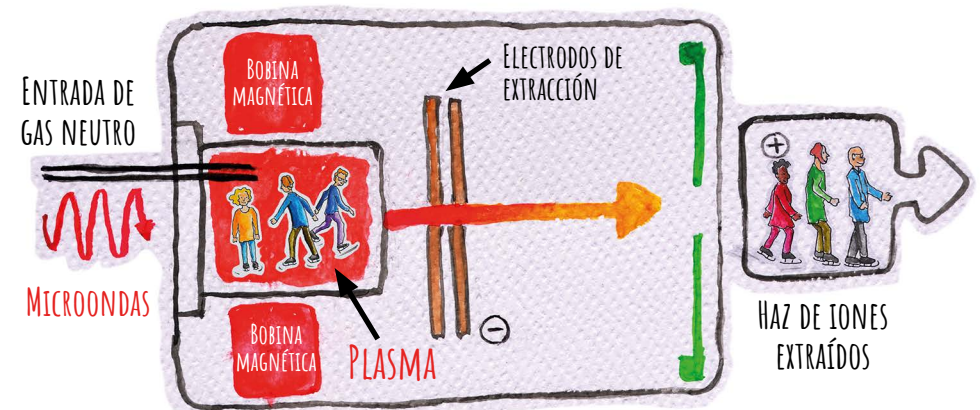
La tormenta es la naturaleza quitándose el suéter. Pero el suéter está en su escala, es decir descomunal.

Dispositivos para producir, acelerar, guiar y enfocar partículas cargadas

Con la pequeña digresión anterior hemos mostrado otra vez que los mismos fenómenos físicos se encuentran en escalas muy diferentes. Regresemos ahora a nuestro camino principal: los aceleradores, para ver cómo se producen las partículas cargadas en dispositivos llamados cañones de electrones (con carga -) o fuentes de iones (con carga +, porque son átomos neutros privados de algunos electrones).

En el caso de los electrones, que son mucho más ligeros que los iones, si calentásemos al rojo blanco un hilo conductor (por ejemplo, de tungsteno) proporcionaríamos suficiente agitación térmica para expulsar unos cuantos electrones. Si cerca de ese hilo pusiésemos una placa conductora con una abertura y cargada positivamente para atraer electrones obtendríamos un haz de electrones acelerados.

Una fuente de iones funciona de modo muy parecido al horno de microondas utilizado para calentar alimentos: Una onda electromagnética, cuyo componente eléctrico oscilante es capaz de separar los



Esquema de una fuente de iones.

electrones de los núcleos atómicos, proporciona la agitación (el calentamiento). No obstante, para producir muchos iones no basta con aumentar la potencia de las microondas. En estos hornos se sabe que incrementar la potencia exageradamente hará que los alimentos se calienten más rápido, claro, pero también provocará que se hinchen (también por efecto de la agitación térmica) y acaben explotando, adhiriéndose sus restos a las paredes del horno. Para evitarlo se instalan bobinas eléctricas en torno a la fuente de iones, generando un campo magnético axial que obliga a los iones a girar en espiral alrededor del eje para no desperdiciarse en las paredes.

Entonces, la aceleración más eficiente se logra instalando una serie de cavidades resonantes donde quedan atrapadas las ondas electromagnéticas. Primero se fracciona el haz de partículas en pequeños paquetes que pasarán en fila a través de estas cavidades para ser acelerados. Es un poco como en los parques de atracciones donde se divide a las personas en pequeños grupos para que quepan en los carritos para poder acelerarlas en dispositivos tipo montaña rusa. En las cavidades resonantes, el componente eléctrico utilizado es oscilante. Su sentido unas veces coincide con el del haz y, por tanto, lo acelera,

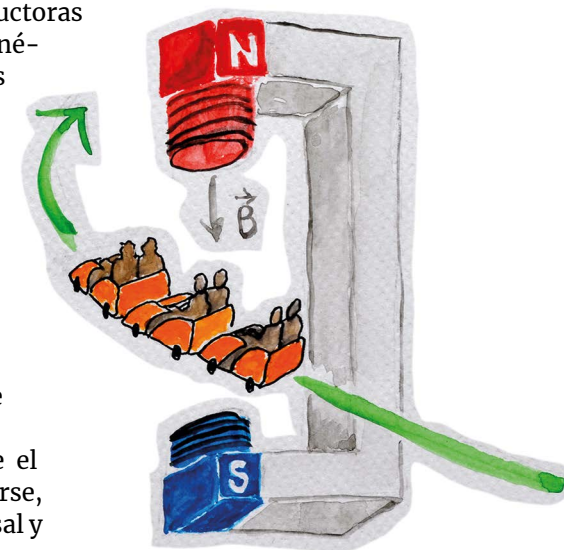


Aceleración de partículas mediante un tren de cavidades resonantes de RF.

y otras, es opuesto, y lo desacelera. La frecuencia de esta oscilación, de varios megaciclos por segundo, es igual que la de la onda de radiofrecuencia. Para que este componente sea siempre acelerador del haz, los paquetes de partículas deben llegar con la misma frecuencia que tiene la onda, sincronizados con ella para que el campo eléctrico esté siempre orientado en la dirección de la aceleración. Obsérvese también que las partículas de un mismo paquete no tienen exactamente la misma velocidad. Por ello, si damos la misma energía a todo el paquete, las partículas más energéticas irán cada vez más adelantadas y, por el contrario, las menos energéticas irán gradualmente más retrasadas, con lo cual el haz se irá alargando progresivamente y, al cabo, la estructura bien ordenada en paquetes se destruirá para dejar sólo un haz continuo. Para evitarlo, hay que sincronizar la llegada del haz de modo que las partículas que lleguen primero vean un campo eléctrico ligeramente más débil que la media y las que lleguen después vean un campo ligeramente más fuerte que la media. De este modo, las partículas de un paquete se agruparán longitudinalmente.

El haz de partículas también se debe desviar y guiar a lugares específicos para acelerarlo, sea para hacerlo chocar, sea para producir radiación sincrotrónica, sea para irradiar un objetivo. Para ello se emplea un dipolo, es decir un electroimán provisto de dos bobinas conductoras para crear así un campo magnético asociado a los dos polos magnéticos, sur y norte. En general, se produce un campo magnético vertical que hace rotar al haz, es decir, lo desvía horizontalmente un ángulo preciso, correspondiente a la aplicación de un campo magnético no nulo durante una determinada longitud de la trayectoria del haz.

No olvidemos también que el haz de partículas debe focalizarse, es decir, reagruparse transversal y reiteradamente, para contrarrestar las fuerzas repulsivas que se



Guiado de partículas con un dipolo magnético.

establecen entre cargas de igual signo. Para ello se utilizan electroimanes, bien de tipo solenoide, que obligan a las partículas a rodear axialmente su campo magnético, bien de tipo cuadrupolo, con cuatro bobinas conductoras que generan un campo magnético de cuatro polos. Con una estructura de este tipo, el haz se enfoca en un plano determinado (por ejemplo, horizontal) y se desenfoca en el plano perpendicular (por ejemplo, vertical). Al igual que con las lentes de los teleobjetivos convencionales, una sucesión de cuadrupolos de enfoque y desenfoco, cuidadosamente colocados, proporciona un enfoque muy potente. Y, asimismo, para actuar sobre los bordes externos del haz más que en su centro, pueden utilizarse electroimanes de 6, 8, 10 polos, etc.



Un cuadrupolo que enfoca el haz horizontalmente y lo desenfoca verticalmente.

Las fuerzas de repulsión entre partículas resultan enormes incluso para los iones de baja energía recién surgidos de la fuente. Por ello son inadecuados los dispositivos separados de aceleración y enfoque. De hecho, apenas aceleradas, las partículas ya estarían dispersas. Para impedirlo se utiliza un artefacto especial llamado cavidad RFQ

(cuadrupolo de radiofrecuencia). Es una cavidad electromagnética resonante con cuatro polos, fabricada con tal precisión que el campo eléctrico axial es sucesivamente, y cada pocos centímetros, paralelo y luego perpendicular a la dirección del haz. Tal cavidad, de varios metros de largo, permite, en primera instancia, empaquetar temporalmente el haz continuo que sale de la fuente y, luego, enfocarlo y acelerarlo alternativamente cada pocos centímetros, hasta dotarlo con una energía que hace relativamente despreciables las fuerzas de repulsión. De este modo las cavidades y los electroimanes de varias decenas de centímetros pueden desempeñar más eficientemente las tareas de aceleración y enfoque.

¿Qué sucede con el haz de partículas?

En primer lugar, conviene advertir que en un acelerador el haz de partículas circula por un conducto donde se ha creado un vacío muy alto, logrando que el número de partículas de aire sea millones de veces menor que en la atmósfera. Así se minimizan las colisiones entre las partículas de aire y del haz, lo que provocaría su merma. De hecho, la pérdida de partículas aceleradas a menudo debe limitarse a una millonésima o milmillonésima parte del haz, sea para restringir la activación de los materiales, lo que posteriormente generaría radiación ionizante, sea para reducir el calentamiento de los equipos que, a pocos centímetros de distancia, rodean el haz y necesitan estar enfriados a temperaturas criogénicas.

Por tanto, como la trayectoria del haz en este escenario es intrínsecamente complicada, todos los dispositivos que hemos descritos antes deben funcionar de modo muy preciso: el haz tiene que girar alrededor del eje de un solenoide; tiene que enfocarse en un plano y desenfocarse en otro al transitar por un cuadrupolo; tiene que apresurarse más cuando se enfoca en el plano longitudinal al pasar por una cavidad aceleradora, y tiene que hacer todo lo anterior en una cavidad RFQ.

Además, este complejo proceso ocurre en un espacio de seis dimensiones, humanamente no visualizable. Cada uno de los miles de millones de partículas en un paquete puede describirse en el espacio tridimensional, por su posición y su amplitud angular, parámetros,

todos ellos, necesarios para saber de dónde viene y hacia dónde irá. Asimismo, cada grupo de partículas se caracteriza por su tamaño en los tres planos, más su divergencia en esos mismos tres planos. El centro del paquete evoluciona en seis dimensiones como lo haría una partícula ficticia. Bajo la acción de los dispositivos de aceleración y enfoque, el centro del paquete oscila en las seis dimensiones alrededor de la trayectoria ideal teórica, y las partículas oscilan en las seis dimensiones alrededor de este centro, cada una a su propio ritmo y con su propia frecuencia. Un comportamiento que cambia, cualitativa y cuantitativamente, de modo bastante violento al cruzar cada dispositivo.

En los aceleradores la física del haz puede describirse como «deliciosamente enrevesada». Su estudio resulta en sí mismo fascinante. El físico que trabaja en este campo es como un domador de partículas salvajes, ciertamente no muy feroces, pero sí con un comportamiento complejo. Especialmente cuando hay millones o miles de millones que domesticar.

En conclusión

A veces, para rematar una discusión, es más interesante ampliarla que resumirla, y la física de los aceleradores es un campo proclive a esto. Así, al introducirnos en esta disciplina, que a priori cabría suponer muy específica, nos hemos internado simultáneamente en la vida cotidiana y en el Universo. Es cierto que un estudiante, al entender en clase un fenómeno físico muy concreto, cuando llega a casa puede notar que comprende otras muchas cosas que, de hecho, sólo son distintas manifestaciones, a veces a diferentes escalas, de ese mismo fenómeno físico. Sin duda, esto es cierto para la ciencia en general. Los científicos se imponen a sí mismos el muy estricto principio de parsimonia, que equivale a describir el máximo número de fenómenos con el mínimo número de leyes. Dicho de otra manera, las leyes científicas deberían abarcar un área lo más amplia posible, lo que en pocas palabras significa que pretenden ser universales. Para las personas, que, curiosas por naturaleza, siempre buscan saber cada vez más, la ciencia resulta fascinante porque, gracias a ella, logran explicarse muchas cosas: desde lo infinitesimalmente pequeño hasta lo infinitamente grande, incluso con muy pocos conocimientos.

No obstante, resulta curioso observar la muy ardua relación entre los seres humanos y la ciencia. Se supone que el conocimiento científico ha allanado el camino para que la humanidad fabrique productos artificiales y, por tanto, no naturales. Esta oposición artificial/natural parece tan obvia que solemos atribuir automáticamente juicios de valor opuestos a lo uno y lo otro, a menudo en detrimento de lo artificial. Tomemos como ejemplo un acelerador de partículas, un objeto de tamaño bastante imponente, fabricado íntegramente por humanos y, por tanto, artificial por definición. Sin embargo, hemos visto que toda la física puesta en juego es la misma que gobierna los objetos de la naturaleza. Entremos aún más en detalle para examinar todos los materiales y componentes de un acelerador. Partimos de sustancias existentes en la naturaleza, que, en virtud de sus leyes, transformamos para obtener el material criogénico más sofisticado. De una manera mucho más general, la ciencia, ya sea física, química, biológica u otra, da cuenta exclusivamente de las leyes de la naturaleza.

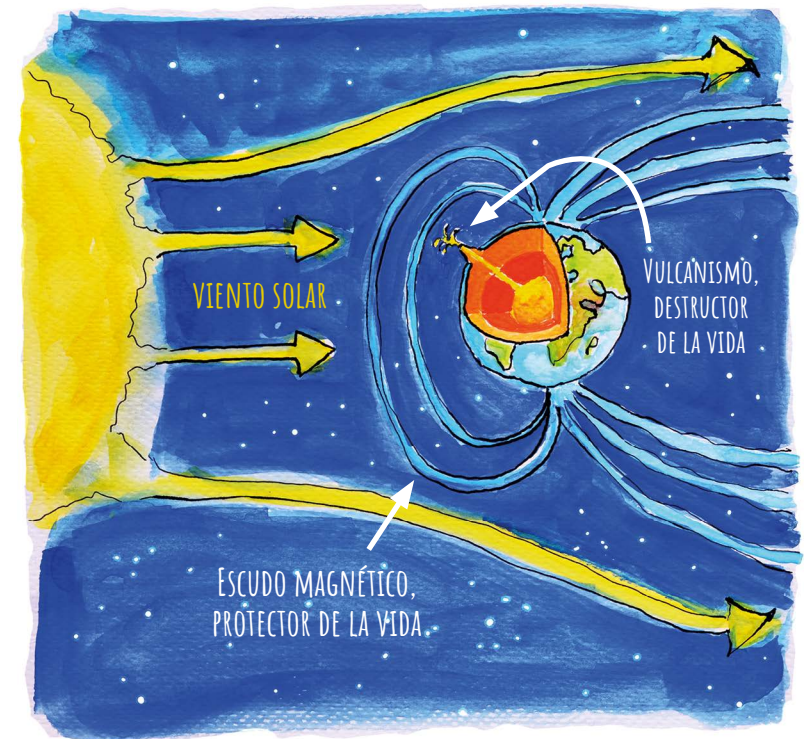
Ninguna de las leyes científicas es inventada o hecha por humanos. Finalmente, los humanos mismos, hasta que se pruebe lo contrario, son un producto de la naturaleza. Entonces es muy difícil, si no

imposible, concebir que un puro producto de la naturaleza, que utiliza productos naturales asociados con leyes naturales, pueda elaborar objetos automáticamente antinaturales. ¿No es esta oposición artificial/natural algo de origen puramente antropocéntrico?

¿Quién otorga a los humanos ese lugar en la naturaleza mucho más importante del que realmente les corresponde? En cualquier caso, podemos pensar que esta oposición natural/artificial es más bien... artificial.

Pero, de suyo, ¿es buena o es mala la ciencia? Formidable pregunta. Considerémoslo sólo en el contexto de nuestra discusión. Sabemos, por ejemplo, que el centro de la Tierra está muy caliente. Esto ha generado el escudo magnético que protege la vida en la superficie terrestre. Pero también hace que los materiales del centro del planeta estén licuados. Las placas tectónicas sólidas flotan libremente en este líquido, y cuando chocan o se separan provocan terremotos o sucesos volcánicos ¡que destruyen la vida! En general y sin excepción, cualquier fenómeno de la naturaleza: la lluvia, el viento, la radiación cósmica, la rotación de las galaxias, etc., puede favorecer o destruir determinado objeto o proceso. Dependiendo de la circunstancia, el beneficio puede importar más que el perjuicio, protegiendo o inhibiendo el desarrollo de ese objeto o proceso. Un simple objeto punzante, fabricado o no por el ser humano, puede servir como defensa o para cortar los alimentos que comemos, pero también para herirnos. En resumen, los fenómenos naturales (o artificiales, que tanto da) siempre producirán efectos potencialmente buenos y malos dependiendo del sujeto determinado. La ciencia permite distinguir cualitativa y cuantitativamente estos efectos, pero al cabo, sólo la conciencia puede ordenar y elegir los efectos deseados.

Así, la física de los aceleradores, a través de los fenómenos naturales tratados, puede conducirnos a la física del mundo que nos rodea, e incluso a reflexiones sobre nuestras relaciones con ese mundo.



Dos consecuencias del núcleo caliente de la Tierra: escudo magnético protector de la vida y vulcanismo destructor de la vida.

Autor: Phu-Anh-Phi Nghiem, físico de la CEA
Maquetación e ilustraciones: María Torres Senes.
Asesoramiento científico: Phu-Anh-Phi Nghiem (CEA) y
Juan Carlos Sanz Martín (CIEMAT)
Traducción: Juan Carlos Sanz Martín (CIEMAT)
Revisión: Moisés Weber Suárez e Iván Podadera Aliseda
(CIEMAT)

Licencia: este manual está disponible bajo licencia
«Atribución - Sin uso comercial - Sin modificación 2.0
España».

Para ver una copia de esta licencia, visite el sitio web:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/deed.es>

Edita Acentoline Comunicación Editoria SL

Impresión finalizada y encuadernada en octubre de 2021
por Gráficas La Madraza, en Granada (España).

DEPÓSITO LEGAL: GR 1282-2021

ISBN: 978-84-938881-6-9

AGRADECIMIENTOS

Vaya un enorme agradecimiento para Angèle Sene, por su aliento incansable y por facilitar la redacción posterior edición de este manual. También queremos agradecer calurosamente su relectura crítica y amistosa a: Claire Antoine, Philippe Briet, Manuel Durand-Barthez, Sophie Kerhoas-Cavata, Angèle Sene y Didier Uriot. La publicación del original en francés contó con el apoyo financiero de la red de laboratorios de excelencia P2IO (Physique des 2 Infinis et des Origines). Un sincero agradecimiento a Aurélie Bordenave por su creatividad y excelentes ilustraciones en la versión original en francés.

EL AUTOR

Phu-Anh-Phi NGHIEM lleva a cabo su trabajo de investigación científica en los campos de la física del plasma, la astrofísica y la física de aceleradores, en el CNRS y luego en el CEA. Ha publicado más de 120 artículos científicos en revistas especializadas y congresos internacionales. Experto CEA en física de aceleradores, ha sido responsable del diseño de aceleradores nacionales e internacionales.

LA ILUSTRADORA

María Torres Senés es ilustradora y diseñadora. Su exitosa trayectoria profesional se ha desarrollado en un campo multidisciplinar: prensa, literatura infantil y juvenil, aplicaciones móviles, publicaciones científicas europeas, etc. Desde 2005 trabaja en Acento Comunicación, Fresolina Editorial y Eralpps, firmas pertenecientes a Acentoline Comunicación Editora SL.

PARA SABER MÁS

Sitio web de CEA

- cea.fr/comprendre/Pages/matiere-univers/accelerateurs-de-particules.aspx

Algunos sitios de aceleración en Francia y España

- ganil-spiral2.eu
- synchrotron-soleil.fr/fr/qui-sommes-nous/quest-ce-que-soleil
- www.ijclab.in2p3.fr/poles-scientifiques/physique-des-accelerateurs
- france-hadron.fr/fr/projets/hadrontherapie.html
- ALBA, <https://www.cells.es/es/>, es la mayor instalación de aceleradores en España [N del T].