

Mini aceleradores de partículas

MERLYN J. JUÁREZ GUTIÉRREZ
Y W. LUIS MOCHÁN BACKAL

Merlyn Jaqueline Juárez Gutiérrez obtuvo su licenciatura en Ciencias (Física) en la Universidad Autónoma de Morelos. Cursó su maestría en Ciencias Físicas en la Universidad Nacional Autónoma de México. Merlyn es la organizadora del "Seminario de estudiantes de ciencias de Morelos".

Luis Mochán es físico e investiga sobre propiedades ópticas de metamateriales en el Instituto de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Autónoma de México. El Dr. Mochán es miembro activo de la Academia de Ciencias de Morelos.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

Átomos

Uno de los descubrimientos que revolucionaron nuestra concepción de la naturaleza es que la materia está compuesta de átomos, tales como el carbón, el helio y el nitrógeno. Éstos están compuestos de partículas más pequeñas, neutrones, electrones y protones. A principios de 1900, estudiando rayos catódicos, descargas eléctricas en tubos casi vacíos como los que después se emplearon en los cinescopios de los viejos televisores, J.J. Thomson descubrió que estaban formados por chorros de veloces partículas más chicas que los átomos y con carga eléctrica negativa. Dicho descubrimiento condujo a una concepción del átomo como una estructura compuesta de partes más pequeñas, electrones y otras, y no como un cuerpo indivisible. Thomson imaginaba al átomo como un pudín de pasas como en la figura 1 en que las pasas serían como los electrones [1, 2].

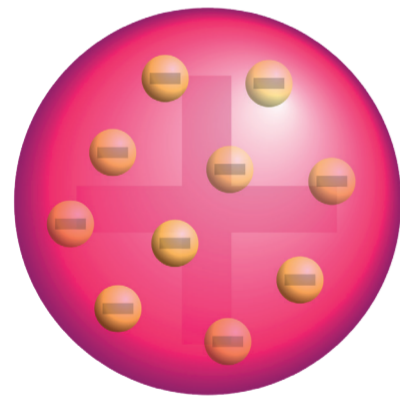


FIGURA 1. MODELO de pudín propuesto por J.J. Thomson para entender al átomo.

Unos años después, E. Rutherford, quien fue estudiante de Thomson, midió las desviaciones que sufría un haz de rayos alfa, formado de partículas cargadas positivamente, al chocar con una lámina muy delgada de oro. Éstas mostraron que la carga positiva de los átomos estaba concentrada en un pequeñísimo pero pesado núcleo alrededor del que los ligeros electrones orbitan, como los planetas alrededor del sol, dando nacimiento al modelo planetario del átomo [3, 4] ilustrado

en la figura 2.

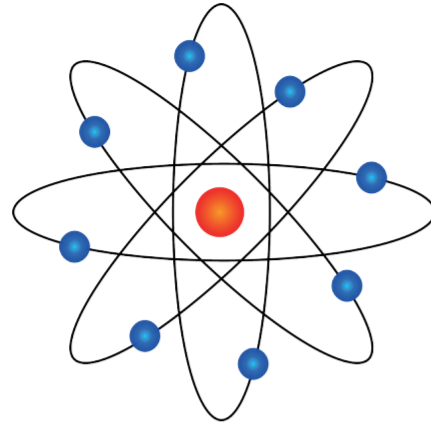


FIGURA 2. MODELO planetario para el átomo propuesto por Rutherford. La carga positiva se concentra en un núcleo masivo alrededor del cual giran los ligeros electrones de carga negativa.

Entender el átomo y luego al núcleo requirió muchos experimentos en los que la aceleración de partículas fue fundamental. Los rayos catódicos de Thomson son electrones acelerados. Las partículas alfa de Rutherford eran núcleos energéticos de helio producidos en reacciones nucleares, pero entender la estructura del núcleo y sus partes requiere partículas más energéticas aún, para lo que hay que acelerarlas. Además, la aceleración de partículas ha permitido muchos otros descubrimientos y actualmente tiene muchas aplicaciones en medicina, tecnología y seguridad. Por ejemplo, se emplea para generar los rayos X que usamos para diagnosticar huesos rotos, irradiar tejidos para erradicar el cáncer, esterilizar instrumentos médicos y alimentos, verificar que el equipaje no contenga armas ni explosivos, elaborar circuitos electrónicos miniatura y crear dispositivos fotónicos. Ahora se usan aceleradores como una de las fuentes más versátiles de luz. Los aceleradores nos permiten estudiar la estructura de la materia y tienen múltiples aplicaciones tanto tecnológicas, como en seguridad y en salud.

Historia

Un acelerador usa campos electromagnéticos para empujar y guiar partículas eléctricamente cargadas creando un haz de partículas cargadas con altas, muy altas velocidades. Para estudiar la estructura del átomo se usaron inicialmente sustancias radiactivas que emiten partículas cargadas en todas las direcciones y con diferentes velocidades en forma desordenada. En 1927 Rutherford manifestó la necesidad de desarrollar fuentes de electrones y de protones acelerados con energías y direcciones bien controladas [5]. Por ello, el desarrollo de los primeros aceleradores alrededor del año 1930 generó gran interés. En 1932, J. Cockroft y E. Walton construyeron una máquina en que un circuito con diodos y capacitores alimentados por un voltaje oscilante relativamente chico generaba un alto voltaje estático que emplearon para acelerar partículas (figura 3).



FIGURA 3. CIRCUITO multiplicador de voltaje diseñado por Cockroft y Walton. Tomado de <https://bit.ly/47dK6tI>

El empleo de campos electrostáticos en este tipo de aceleradores tiene una desventaja; se requieren campos muy grandes para acelerar a las partículas a altas energías, pero un campo demasiado grande produce descargas, chispas que lo vuelven inoperante. Este hecho fue señalado por E. Lawrence quien diseñó en la Universidad de California el *ciclotrón*. En éste, las partículas son aceleradas de poco en poco, con voltajes pequeños, mientras recorren una trayectoria espiral. El *ciclotrón* consiste en dos cavidades metálicas semicirculares con forma de letras D huecas, una frente a la otra, con una pequeña brecha entre ellas y conectadas a una fuente de voltaje alterno que empuja a las partículas que se hallen en la brecha (figura 4). Un campo magnético obliga a las partículas a seguir una trayectoria circular para regresar a la brecha y pasar de una cavidad a otra repetidamente. La partícula va cada vez más rápida, pero la circunferencia que recorre es cada vez mayor, de forma que el tiempo que tarda en cada media vuelta no cambia. Esto permite sincronizar las oscilaciones del voltaje para acelerar cada media vuelta a las partículas en la dirección correcta [6]. Así, tras muchos empujones pequeños se pueden obtener grandes energías (figura 4).

Actualidad

Los aceleradores convencionales actuales tienen mecanismos similares a los descritos arriba, toman en cuenta efectos como los relativistas y pérdidas por radiación electromagnética y emplean mecanismos para enfocar a las partículas. Con éstos se ha logrado impulsar partículas a una enorme energía, y con ello han aumentado de tamaño hasta llegar a ¡kilómetros de longitud! Por ejemplo, el acelerador lineal LINAC construido en 1966 por la Universidad de Stanford de E.U. mide 3.2 km de largo (figura 5) y puede acelerar partículas a energías de 50 GeV, cincuenta mil millones de eV's (un eV es la energía que gana un electrón sujeto a un voltaje de un volt; 50 GeV es la energía que ganaría un electrón al moverse a través de ¡50 mil millones de volts!).

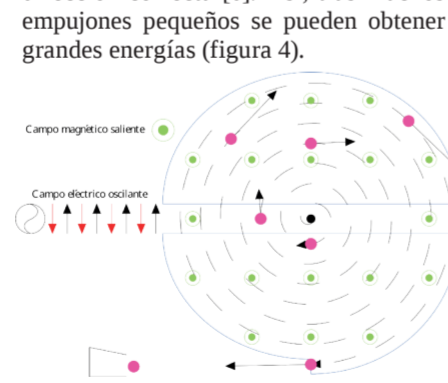


FIGURA 4. ESQUEMA básico de un ciclotrón.

Los primeros ciclotrones medían pocos decímetros de diámetro, pero para el año 1939 ya se había construido uno de metro y medio. Conforme aumentaba el tamaño aumentaba la energía de las partículas aceleradas. Sin embargo, el crecimiento

se vio limitado por el costo de los grandes imanes. Además, hay efectos relativistas cuando las partículas alcanzan velocidades cercanas a la velocidad de la luz que limitan la utilidad de este diseño. Otros aceleradores con mecanismos similares fueron el *betatrón* y el *microtrón*, los que permitieron alcanzar mayores energías. Tras la segunda guerra mundial, E. McMillan y V. Veksler tuvieron por separado la idea de aumentar gradualmente al campo magnético para mantener a las partículas en un mismo círculo conforme ganaran energía, creando nuevas máquinas llamadas *sincrotrones*.

Además de conducir a las partículas sobre una trayectoria, el campo magnético se emplea para enfocarlas vertical y horizontalmente, empujándolas para producir un rayo útil de partículas y no una nube difusa. Curiosamente, enfocar verticalmente desenfoca horizontalmente y viceversa debido a las propiedades intrínsecas de los campos magnéticos. E. Courant sugirió alternar el campo periódicamente para enfocar y luego desenfocar a las partículas vertical y horizontalmente lo cual conduce en promedio a enfocarlas en ambas direcciones. Esto permitió además el uso de electroimanes más pequeños, un gran avance en el diseño de aceleradores que permitió construir aceleradores más poderosos [7].

Actualidad

Los aceleradores convencionales actuales tienen mecanismos similares a los descritos arriba, toman en cuenta efectos como los relativistas y pérdidas por radiación electromagnética y emplean mecanismos para enfocar a las partículas. Con éstos se ha logrado impulsar partículas a una enorme energía, y con ello han aumentado de tamaño hasta llegar a ¡kilómetros de longitud! Por ejemplo, el acelerador lineal LINAC construido en 1966 por la Universidad de Stanford de E.U. mide 3.2 km de largo (figura 5) y puede acelerar partículas a energías de 50 GeV, cincuenta mil millones de eV's (un eV es la energía que gana un electrón sujeto a un voltaje de un volt; 50 GeV es la energía que ganaría un electrón al moverse a través de ¡50 mil millones de volts!).



FIGURA 5. FOTOGRAFÍA aérea del LINAC en Stanford (Peter Kaminski, US Geological Survey, Public Domain. <https://bit.ly/47amwpp>

El LINAC consta de cavidades metálicas (figura 6) en que oscilan ondas de radio atrapadas cuyo campo impulsa a las partículas.



FIGURA 6. CAVIDADES metálicas del LINAC. Tomada de SLAC-LCLS

Su gran tamaño se debe a que el campo en las cavidades no puede ser demasiado grande para evitar descargas eléctricas que dañen sus paredes. Un campo más pequeño requiere una distancia más larga para llegar a una energía alta. El acelerador más poderoso, el llamado *gran colisionador* [8], es un anillo cuyo perímetro mide 27 km y consiste en múltiples estructuras aceleradoras, un enorme anillo en que giran partículas ultra energéticas en direcciones opuestas, grandes electroimanes superconductores para guiar y enfocar los montones de partículas, estaciones experimentales para observar las colisiones entre partículas y centros de control, de servicios y de infraestructura [9]. Los aceleradores convencionales de alta energía son proyectos enormes que necesitan equipos de muchas personas, mucho dinero y soporte gubernamental. Por esto, no es fácil acceder a estas máquinas. Siendo importantes herramientas de investigación científica y con tantas aplicaciones ¿acaso nadie ha pensado en nuevos mecanismos para desarrollar aceleradores menos aparatosos y costosos pero útiles? Sí, y es de éstos de los que ahora les contaremos.

Miniaturización

Se han ideado nuevos mecanismos que utilizando láseres prometen aceleradores de tamaños que miden desde de pocos metros hasta centímetros. En los años 1970-1980 Tajima y Dawson propusieron acelerar partículas usando el campo eléctrico generado en *plasmas*, gases de partículas eléctricamente cargadas formadas por átomos ionizados positivos y los electrones que se les arrancaron (figura 7).

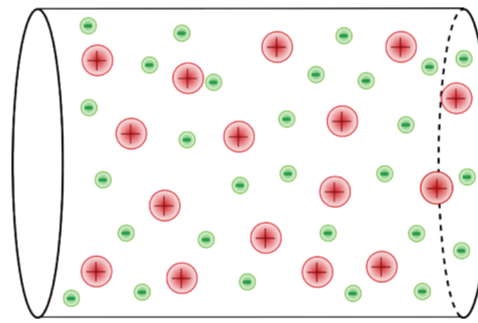


FIGURA 7. CILINDRO encerrando un plasma formado por partículas cargadas positivas y negativas.

Ejemplos de plasmas son el Sol y el interior de los relámpagos. Un campo no puede dañar a un plasma, por grande que sea. Al iluminar

el plasma con un intenso pulso de luz láser, los ligeros electrones (pesan miles de veces menos que las otras partículas del plasma) son expulsados de la trayectoria del láser, pero una vez que pasa el pulso luminoso, son fuertemente atraídos por las pesadas cargas positivas dejadas atrás y regresan rápidamente, acumulándose en el centro del rayo, repeliéndose unos a otros y volviéndose a alejar, generando así una onda que consiste en fuertes oscilaciones de carga conocidas como la *estela de plasma* por su parecido a la estela que deja un bote al moverse sobre un cuerpo de agua (figura 8). Las partículas por acelerar se inyectan en el plasma, haciéndolas *surfear* en la estela de plasma, siendo empujadas por las cargas acumuladas detrás y jaladas por las cargas del signo opuesto acumuladas adelante.

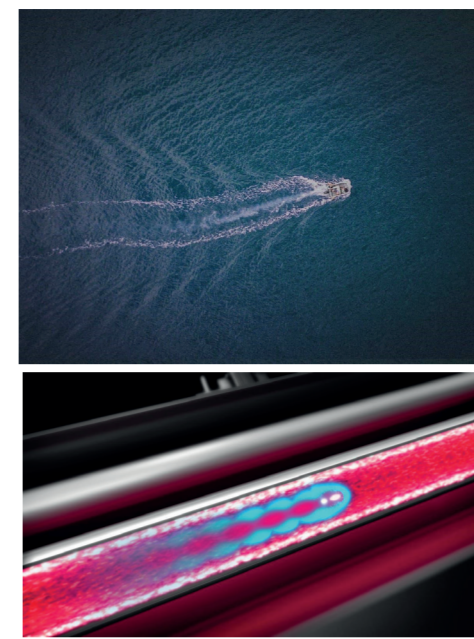


FIGURA 8: (A) Estela de agua producida por un bote pasando sobre la superficie de un cuerpo de agua. (b) Estela de partículas eléctricamente cargadas producida por un pulso láser atravesando un plasma (tomado de Greg Stewart/SLAC, National Accelerator Laboratory).

Estas oscilaciones de carga viajan casi a la velocidad de la luz y producen un campo hasta mil veces mayor que en los aceleradores convencionales, reduciendo su tamaño y costo. Con plasmas confinados en tubos que miden unos cuantos centímetros se ha logrado acelerar electrones hasta energías de unos cuantos GeV. Las implementaciones recientes sobre una mesa de laboratorio han demostrado que este mecanismo funciona y es útil. Muchos grupos alrededor del mundo trabajan intensamente en mejorar la calidad de los haces de partículas producidos en estos aceleradores [10].

Aceleradores dieléctricos

Recientemente se han explorado propuestas alternativas para aprovechar la luz láser en la aceleración de partículas. Una de ellas consiste en emplear materiales dieléctricos, pues éstos soportan campos miles de veces mayores que los metales usados en los aceleradores convencionales. Se han diseñado y fabricado arreglos de nanoestructuras (estructuras que miden millonésimas de milímetro) que al ser iluminadas con pulsos láser producen un campo electromagnético que acelera partículas cargadas y se sincroniza con ellas. Experimentos recientes realizados en el Laboratorio Nacional de Aceleradores de la Universidad de Stanford han confirmado la viabilidad de esta propuesta.

Plasmones de superficie

Los metales son materiales con electrones de conducción que se mueven libremente entre los iones positivamente cargados, como si fueran plasmas sólidos de altísima densidad, en vez de tenues gases ionizados (figura 7). Existen ondas de plasma en que oscila la densidad de carga en la cercanía de la superficie del metal, y cuyo campo electromagnético se propaga a lo largo de la superficie y decae en la dirección perpendicular (figura 9). Estas ondas se conocen como *plasmones de superficie* (PS), tienen una velocidad menor que la velocidad de la luz y podrían emplearse para acelerar partículas desde velocidades muy pequeñas hasta velocidades cercanas a la de la luz.

Esta es la propuesta que hemos elaborado y trabajado en el Instituto de Ciencias Físicas, UNAM.

El mecanismo que proponemos es emplear el campo de un PS para acelerar partículas en el espacio vacío cercano a la superficie, a la vez que se aceleran los mismos PS para sincroni-

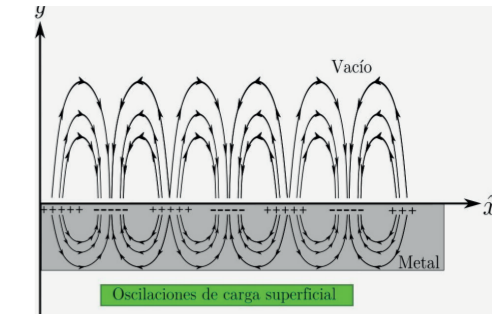


FIGURA 9. DENSIDAD de carga asociada a un plasmón de superficie y líneas del campo eléctrico que se producen en un momento dado.

zar su propagación con la de las partículas. El diseño propuesto está ilustrado en la figura 10 y consiste en dos metales, uno frente al otro, formando un canal de ancho que depende de la posición a lo largo del mismo. Este sistema tiene un plasmón de superficie *simétrico* cuya velocidad cambia conforme cambia el ancho y cuyo campo en el centro empuja a las partículas en la dirección longitudinal del canal (flecha morada en la figura 10).

Que la velocidad del PS depende de la separación entre las placas se puede entender cualitativamente mediante un análisis *dimensional*, de unidades. La velocidad tiene unidades de distancia entre tiempo y siendo que la única distancia relevante es la separación L entre las placas y el único tiempo relevante es T , el que tarda un plasmón en oscilar, la velocidad con que viaja el PS debe ser proporcional a L/T . A mayor separación más rápido van los PS's. Resolviendo las ecuaciones que rigen al campo electromagnético junto con la ecuación de movimiento de las partículas aceleradas, encontramos la forma ideal (figura 10) del canal para que su plasmón de superficie se acelere al igual que una partícula inyectada de manera idónea, manteniendo sincronía mientras la acelera hasta alcanzar velocidades relativistas, cercanas a la de la luz.

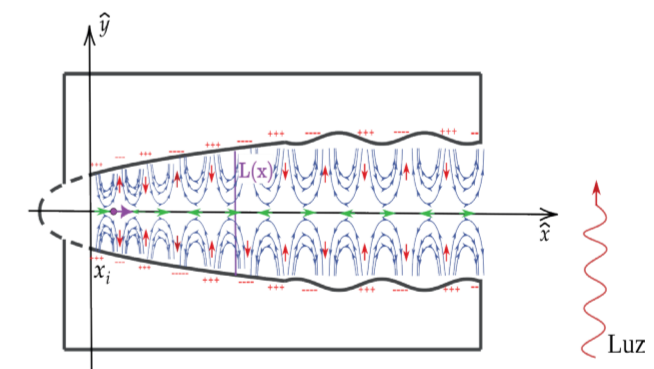


FIGURA 10. CANAL con apertura variable a lo largo de su eje. Se muestra la luz, el campo del PS que produce y una partícula cargada acelerada por el mismo.

Podemos excitar al PS mediante luz láser. Por ejemplo, en la figura 10 se muestra luz por ejemplo hacia arriba con un campo eléctrico horizontal que apunta instantáneamente a la izquierda. Este empuja a los electrones del metal hacia la derecha haciéndolos acumularse en algunas de las laderas de una región rugosa cerca de la salida del canal, generando regiones positivas y negativas alternadas y oscilantes que originan un PS simétrico que viaja hacia el interior de la cavidad. El PS simétrico tiene la peculiaridad de que cuando su energía viaja hacia la izquierda, su fase (el patrón de líneas de campo en la figura 10) viaja hacia la derecha, y por tanto, puede acelerar a las partículas hacia la boca del canal.

Hemos calculado la excitación del PS mediante luz láser y obtuvimos que un acelerador de medio centímetro podría acelerar protones hasta energías de varios millones de eV's [11].

En la figura 10 mostramos a una partícula en una región *empaquetadora* en la que, si una partícula se retrasara se encontraría con una fuerza mayor que la empujaría más hasta recuperar su posición. Análogamente, si se adelantara, sentiría una fuerza que la empujaría menos hasta que las demás partículas la alcancen. Sin embargo, notamos en la misma figura que si la partícula se saliera del centro del canal, moviéndose un poco para arriba o para abajo, encontraría un campo que la haría alejarse aún más. De manera que las zonas empaquetadoras son inestables en la dirección transversal, "desenfocadoras". Poco atrás de las zonas empaquetadoras hay zonas "desempaquetadoras", inestables en la dirección longitudinal, pero enfocadoras, estables en la dirección transversal.

Para saber si nuestra propuesta es viable aún falta incorporar mecanismos para garantizar la estabilidad de nuestros haces de partículas frente a varias perturbaciones y en todas direcciones y elegir el mejor material que tenga las excitaciones superficiales óptimas.

En resumen, hemos echado un vistazo a las tecnologías de aceleración existentes y a las que están en proceso, incluyendo nuestra propuesta de coacelerar partículas y plasmones de superficie en dispositivos miniatura, y hemos discutido algunas de las dificultades y retos de ésta.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por DGAPA-UNAM a través del proyecto PAPIIT IN109822. MJJG agradece el apoyo de CONACyT y de DGAPA-UNAM.

Referencias

- The Nobel Prize in Physics 1906, J.J. Thomson – Biographical, <https://bit.ly/3FXK0HF>
A Look Inside the Atom, AIP, <https://bit.ly/3szmwak>
The Nobel Prize in Chemistry 1908, Ernest Rutherford – Biographical, <https://bit.ly/3M-HfXt8>
Rutherford and the Discovery of the Atomic Nucleus, APS News, May 2006, <https://bit.ly/46k8YgX>
Address of the President, Royal Society, Nov. 1927, <https://bit.ly/46gmqlV>
The Manhattan Project, an Interactive History, DOE, <https://bit.ly/40Bb-Ww8>
How particle accelerators came to be, Knowable Magazine, Mar., 2022, <https://bit.ly/3MHTiwQ>

- Gerardo Herrera Corral, *El gran colisionador de hadrones* (Ed. Proceso, México, 2013)
The Large Hadron Collider, CERN, <https://bit.ly/3SGvYmV>
Cascade Laser Plasma Wakefield Acceleration for TeV Collider, U. Strathclyde, <https://bit.ly/46hsk69>
M. J. Juárez Gutiérrez, *Co-Acceleration of Particles and Surface Plasmons in Nanostructures*, Tesis de maestría, PCF-UNAM (2023), <https://bit.ly/49yEZOa>

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.