

La Física de la Levitación Magnética

Sebastià Agramunt Puig

Resumen—*La levitación ha sido durante siglos objeto de curiosidad y fascinación a través de diferentes culturas. Ésta consiste en un objeto flotando en el aire de manera estática de tal forma que aparentemente la gravedad no ejerce ningún efecto sobre él. En este breve artículo divulgativo estudiaremos si realmente se puede conseguir la levitación. Revisaremos diferentes fuerzas o métodos para intentar conseguir la levitación de un objeto, pero haremos especial hincapié en fuerza magnética y en la levitación con superconductores.*

Palabras clave — magnetismo, electricidad, superconductividad, levitación, física

I. INTRODUCCIÓN

La levitación es el proceso por el cual un objeto queda suspendido en el aire en contra de la gravedad y sin estar en contacto con ningún otro objeto. Dicho así suena un poco complicado, pero todos tenemos en mente aquellas escenas de películas o trucos de ilusionismo donde se ve una persona “flotar” en el aire de tal manera que parece que la gravedad no le afecta en absoluto.

En la Fig. 1 podemos observar un cartel promocionando un espectáculo ilusionista del mago Harry Kellar en el siglo XIX, en éste se observa una mujer levitando por los trucos mágicos del ilusionista. En la ilustración se ve como unos “rayos mágicos” emanan de las extremidades del artista como si éstos ejerciesen una fuerza misteriosa para levantar el cuerpo de la joven. Sólo es un cartel para captar la atención del público, pero ya deja entrever un requisito indispensable para alcanzar la levitación: debe haber alguna fuerza que contrarreste a la gravedad para tener el objeto en una posición estable y estática. En la ilustración el mago representa dicha fuerza con unos “rayos eléctricos mágicos” que sólo él es capaz de producir.

Para contrarrestar la gravedad y conseguir que un objeto levite necesitamos otra fuerza que lo empuje hacia arriba, en el sentido opuesto a la gravedad. En este punto conviene recordar la segunda ley de Newton:

Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas impresas sobre él.

En efecto, si la fuerza de la gravedad es contrarrestada por otra fuerza de igual magnitud, pero sentido opuesto, que llamaremos de levitación, la fuerza total sobre el objeto será cero. En este caso el cuerpo se mantendrá en reposo levitando. Podemos clasificar la levitación según el origen de la fuerza teniendo así levitación aerodinámica, acústica, óptica, eléctrica y magnética. Las dos primeras son levitaciones mecánicas mientras que las tres últimas electromagnéticas.

La levitación de un objeto debe ser estable, es decir, si el objeto se desplaza ligeramente de su posición de levitación debe existir una fuerza que vuelva a colocar el objeto levitante en su posición

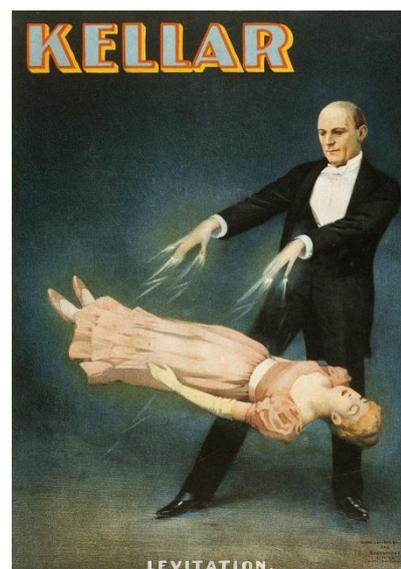


Fig. 1 Harry Kellar fue un ilusionista estadounidense de mediados del siglo XIX cuyos espectáculos de magia incluían la levitación de personas

original, de lo contrario el objeto terminaría cayendo ya que la fuerza neta sobre él no sería cero. Continuaremos con el ejemplo del ilusionista Kellar, que, aunque sólo se trata de un truco nos sirve muy bien para entender este concepto. Imaginemos que una tercera persona malintencionada decidiese empujar a la mujer que está levitando y desestabilizar la levitación. Kellar debería mover sus “rayos eléctricos mágicos” para ajustar la fuerza y hacer que la mujer vuelva a su posición original de levitación. El mago actuaría de manera dinámica ajustando su fuerza a pequeños cambios externos al sistema para hacer que la mujer vuelva a su posición de levitación original. Decimos que la levitación es activa si para mantenerla estable se requiere de un mecanismo externo de corrección de la fuerza (caso ilustrativo que acabamos de ejemplificar). Si la levitación no necesita de un sistema externo para mantenerse estable decimos que el mecanismo es pasivo. Dicho de otro modo, si para mantener la levitación estable necesitamos proporcionar energía al sistema, la levitación es activa.

Por otro lado, podemos distinguir entre levitación dinámica o estática según si para obtener la levitación del objeto una o varias partes del dispositivo está en movimiento, ya sea el objeto levitante o otros. Por ejemplo, un helicóptero manteniéndose a una cierta altura fija con respecto al suelo es un sistema levitante dinámico, ya que para mantener esa posición el helicóptero debe mover sus aspas. Asimismo, el helicóptero levitando es levitación activa ya que el piloto debe reajustar la potencia de las hélices ante rachas de viento ocasionales que pueden desplazarlo de su punto de levitación.

El sistema levitante perfecto sería un sistema pasivo y estático, es decir, un sistema donde el objeto volviese a la posición de equilibrio de manera natural y en el cual no haya que mantener un cuerpo en movimiento. En las siguientes secciones intentaremos explicar diferentes tipos de levitación según la naturaleza de la fuerza levitante y descubrir si se puede conseguir levitación pasiva y estática.

II. LEVITACIÓN AERODINÁMICA

Una de las formas más sencillas de conseguir levitación es mediante la presión que ejerce el aire. En la sección anterior ya hemos puesto un ejemplo de levitación aerodinámica, la que se produce en vehículos de despegue y aterrizaje en vertical como un helicóptero.

Pongamos un ejemplo sencillo de levitación aerodinámica. El experimento consiste en colocar una pelota de ping-pong en la salida de aire de un secador de pelo tal como se muestra en la Fig. 2. Es comprensible que el aire proporcionado por el secador ejerce una presión sobre la base de la pelota de ping-pong y así puede contrarrestar la fuerza de la gravedad. No obstante, si giramos el secador, la pelota parece levitar siguiendo el flujo de aire de éste, esto nos demuestra que existe una fuerza de restauración que hace que la levitación sea estable.

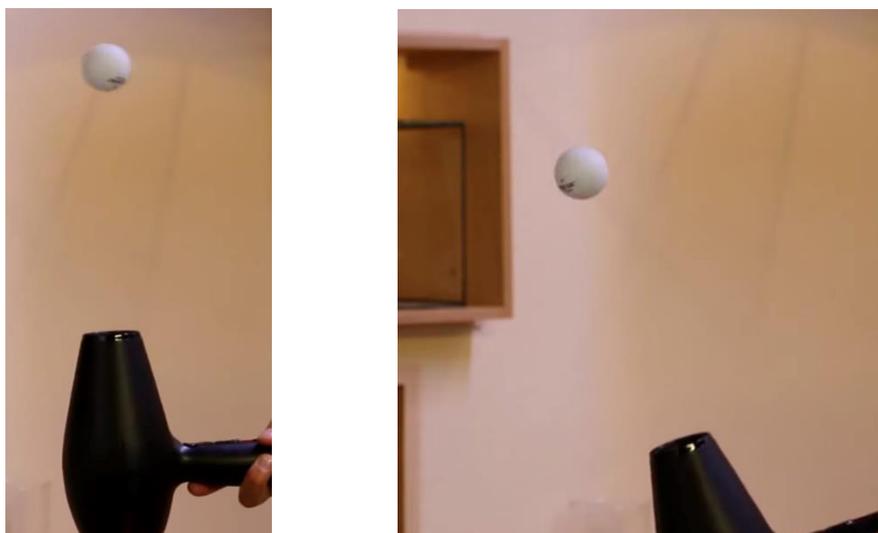


Fig. 2 Experimento de la pelota de ping pong y el secador

Podemos explicar este fenómeno con el efecto de Bernoulli que a grandes rasgos establece que allá donde un fluido (como el viento) aumenta su velocidad, la presión decrece y equivalentemente donde la velocidad de un fluido es menor la presión crece.

En el esquema izquierdo de la Fig. 3 representamos la trayectoria de las partículas de aire provenientes del secador con flechas azules. Estas se curvan envolviendo la pelota de manera simétrica. En este caso, como las velocidades de las partículas de aire es igual por ambos lados, la fuerza lateral ejercida sobre la pelota es nula y por lo tanto no hay desplazamiento horizontal. Podemos decir que el punto de levitación estable de la pelota es en el centro del chorro de aire. Lo podemos corroborar dando pequeños empujones horizontales a la pelota para ver como ésta vuelve a su sitio original en el centro.

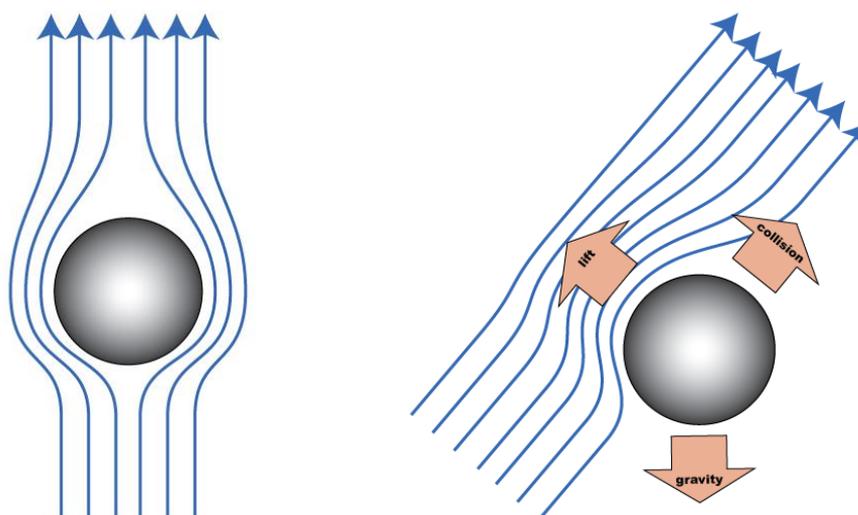


Fig. 3 Izquierda: Dibujo esquemático de las líneas de viento en torno a la pelota. Derecha: líneas de viento y fuerzas (flechas) al inclinar ligeramente el secador

Otra manera de comprobar que la levitación estable es en el centro del chorro de aire es girando el secador como se muestra en la Fig. 2 (derecha) y esquemáticamente en la Fig. 3 (derecha). En este caso la componente de la fuerza de la gravedad perpendicular al chorro de aire crece, intentando expulsar la pelota fuera del chorro. Como pasa en el caso anterior, la diferencia de presiones entre los dos lados de la pelota crea una fuerza restauradora que la empuja hacia el centro del chorro de aire.

Observemos más de cerca por qué existe esta fuerza restauradora: Imaginemos que desplazamos mínimamente la pelota hacia la derecha, eso significa que en ese lado la velocidad del aire va a decrecer ya que se encuentra más alejado del chorro de aire. Sin embargo, en el lado izquierdo la velocidad aumenta ya que ahora este lado está más centrado en el chorro. Por la ecuación de Bernoulli se ejercerá una fuerza neta hacia la parte izquierda restaurando la pelota hacia su posición original.

Otro ejemplo de levitación aerodinámica es la que se produce en un hovercraft. Éste es un vehículo anfibia terrestre y marítimo que crea una capa de aire en su parte baja, para así reducir la fricción entre el suelo y el vehículo.

En la Fig. 4 se muestra una fotografía de un hovercraft y el mecanismo que permite que este levite. Se observan unos propulsores en la parte trasera que proporcionan el empuje para moverse horizontalmente y unos ventiladores que propulsan aire hacia abajo para conseguir la levitación. Se trata de un sistema de levitación dinámico y activo.

Otro sistema quasi-levitante muy similar al del hovercraft es el que se produce por el efecto Leidenfrost que ocurre cuando un líquido está en contacto con una superficie cuya temperatura es mayor que el punto de ebullición del líquido. La parte de las pequeñas gotas del líquido que está en contacto con la superficie entra rápidamente en ebullición creando un cojín de aire que permite que

la gota tenga muy poca fricción con el suelo y se desplace rápidamente. Es una levitación aparente ya que rápidamente el líquido se evapora por completo y dejamos de tener objeto levitante. Ejemplos de este fenómeno lo podemos conseguir tirando agua poco a poco en una sartén muy caliente como se muestra en [1], o tirando nitrógeno líquido en el suelo a temperatura ambiente.

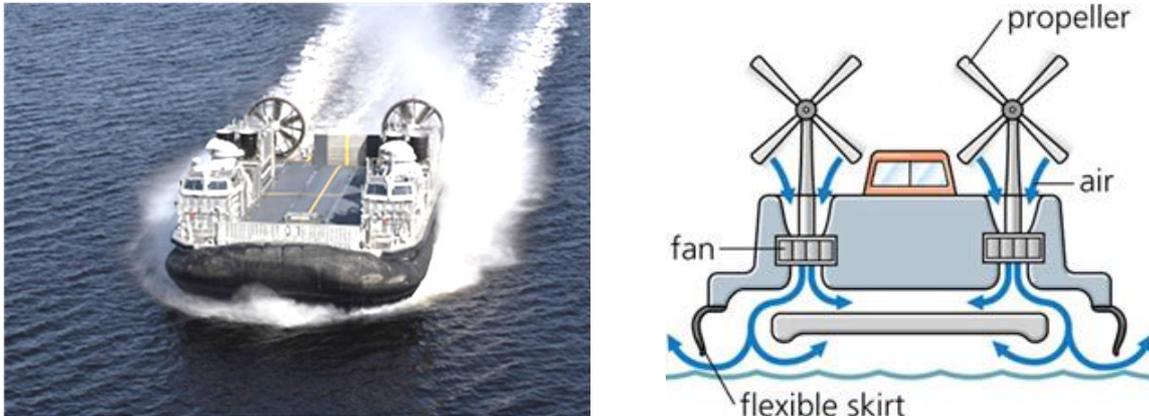


Fig. 4 (Izquierda) vehículo hovercraft "Ship-to-shore", en desarrollo. (Derecha) dibujo esquemático del mecanismo que hace levitar a un hovercraft

III. LEVITACIÓN ACÚSTICA

El sonido es otro mecanismo que puede producir fuerzas sobre objetos para poder alcanzar la levitación. En cierta manera es un mecanismo muy similar al de la levitación aerodinámica ya que también se basa en cambios de presión en el aire. En concreto estudiaremos cómo hacer levitar gotas de agua con ondas estacionarias.

Una onda es una perturbación que se propaga con cierta periodicidad en el vacío o en un medio físico. En el caso de las ondas acústicas, éstas se propagan sobre un medio material y la perturbación que originan son variaciones de la presión en el aire. La ecuación que describe una onda en una dimensión se puede expresar como: $p = A \sin(kx + \omega t)$.

Donde A es la presión máxima, x es la posición, t es el tiempo y las magnitudes k y ω se conocen como número de onda y frecuencia angular respectivamente. Si combinamos dos ondas iguales pero que viajan en sentido opuesto se produce una onda estacionaria cuya ecuación en una dimensión es: $p = A \sin(kx + \omega t) + A \sin(kx - \omega t) = 2A \sin \omega t \cdot \cos kx$.

Y produce la distribución de presiones que se puede observar (Fig.5)

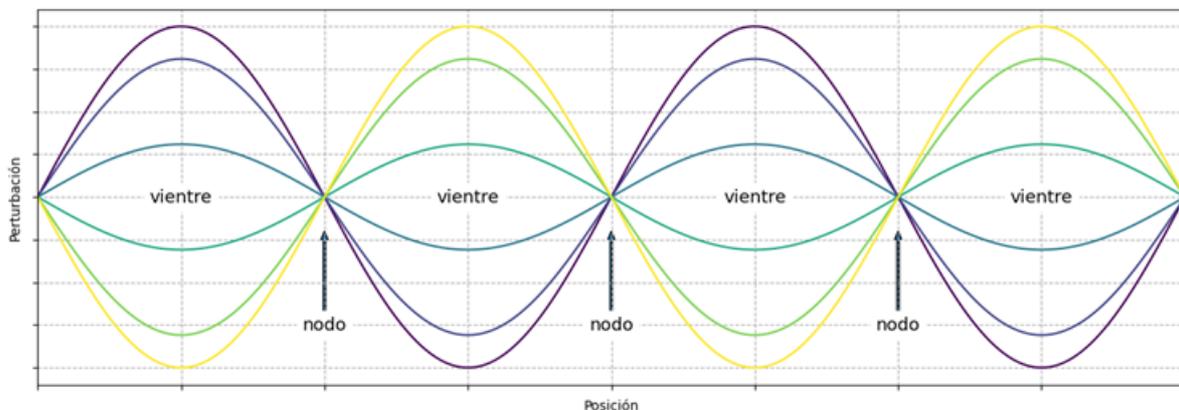


Fig. 5 Onda estacionaria en una dimensión. El eje de las x es la posición y el de las y la magnitud de la perturbación. Las diferentes curvas (colores) corresponden a diferentes instantes en el tiempo. Distinguimos los nodos como zonas donde la perturbación siempre es cero, y los vientres donde la perturbación varía el máximo en el tiempo

Aquí cada curva representa un instante en el tiempo diferente y en el eje de las x tenemos la posición y en el eje de las y s el valor de la perturbación. Podemos ver que hay puntos donde la perturbación varía en el tiempo con una amplitud máxima, a estos puntos se les llama vientres. Sin embargo, hay otros puntos en el espacio donde la perturbación siempre es cero, éstos se llaman nodos.

Las ondas estacionarias se pueden generar fácilmente con una cuerda atada a una pared (en Ref. [2] tenemos una buena demostración de ello). Desde el otro extremo de la cuerda la podemos hacer vibrar y cuando la perturbación llega al extremo de la pared debe volver de tal manera que crea la interferencia con la onda incidente generando la onda estacionaria.

Ahora bien, ¿cómo podemos generar levitación usando ondas acústicas estacionarias? Como hemos comentado antes las ondas acústicas propagan perturbaciones de presión en el espacio y el tiempo y las masas tienden a quedarse en las zonas de mínima presión, así pues, si tenemos pequeñas masas justo en las zonas de mínima presión de las ondas acústicas estacionarias (los nodos), estas tenderán a quedarse inmóviles allí.



Fig. 6 Experimento de levitación acústica en Argonne National Laboratory (Chicago, USA), [3]

Podemos ver en la Fig. 6 un experimento donde hay pequeñas bolas blancas levitando [3]. En el dispositivo que se muestran dos partes plateadas entre las que levitan las bolas. La parte plateada de abajo contiene un pequeño altavoz que produce las ondas acústicas que rebotan en la parte metálica de arriba produciendo así las ondas estacionarias. Como hemos comentado estas bolitas sólo pueden estar levitando en ciertos puntos correspondientes a las posiciones donde la onda tiene nodos. Si se desplazan por pequeñas perturbaciones (por ejemplo, viento) de los nodos, rápidamente son devueltas a estos ya que fuera de los nodos el aire tiene una mayor presión.

La levitación acústica se considera dinámica y pasiva. Es dinámica porque es controlada por la onda estacionaria generada, que puede variar las condiciones de levitación dependiendo de la frecuencia de la onda generada. Esta levitación también es pasiva ya que los objetos levitantes tienden a volver a los nodos si son ligeramente desplazados por lo que no necesitamos de un sistema de corrección de la posición de manera activa.

IV. LEVITACIÓN ELECTROSTÁTICA

Hasta ahora hemos usado fuerzas mecánicas para conseguir la levitación, básicamente jugando con las presiones de aire para atrapar los objetos levitantes en un pozo de presión. En esta sección usaremos la fuerza producida por cargas eléctricas para hacer levitar objetos.

Según la ley de Coulomb [4], dos objetos cargados eléctricamente experimentan una fuerza entre sí proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que

les separa. Es decir, cuanto mayor sea la carga más atracción o repulsión habrá entre dichos objetos y cuanto más lejos estén menos fuerza experimentan. Los objetos pueden tener carga eléctrica positiva, negativa o neutra. Si los dos objetos tienen la misma carga se repelen y por el contrario si tienen carga opuesta se atraen. Este comportamiento se puede observar en el esquema de la Fig. 7 donde representamos cargas positivas con color rojo y cargas negativas color azul. Las flechas indican la fuerza que experimenta cada carga.

Para conseguir dos cargas puntuales cargadas negativamente podemos usar dos bolas de aluminio y cargarlas frotando lana con un globo para posteriormente poner en contacto el globo con cada una de las bolas. Las bolas quedarán cargadas negativamente (exceso de electrones en ellas), y por tanto se repelen. ¿Podríamos usar la fuerza de repulsión entre ellas para conseguir hacer levitar una sobre otra?

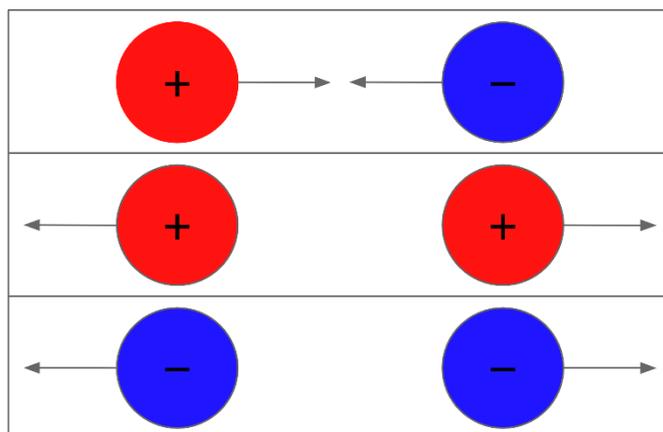


Fig. 7 Dibujo esquemático de las fuerzas de atracción y repulsión entre cargas eléctricas positivas y negativas

El físico inglés Samuel Earnshaw demostró en 1842 con el teorema que lleva su mismo nombre que es imposible conseguir levitación con cargas puntuales ya que es un sistema altamente inestable [5]. En nuestra proposición de experimento esto significa que la carga que estaría levitando rápidamente dejaría de hacerlo ya que pequeñas perturbaciones de su posición ocasionarían fuerzas de no restauración de la posición de equilibrio, es decir producirían inestabilidad. Esto se puede ver en la Fig. 8. En la figura de la izquierda tenemos una posición metastable o cuasiestable, al desplazarse un poco la carga "levitante" las componentes de la fuerza cambian y la levitación se vuelve completamente inestable (figura de la derecha).

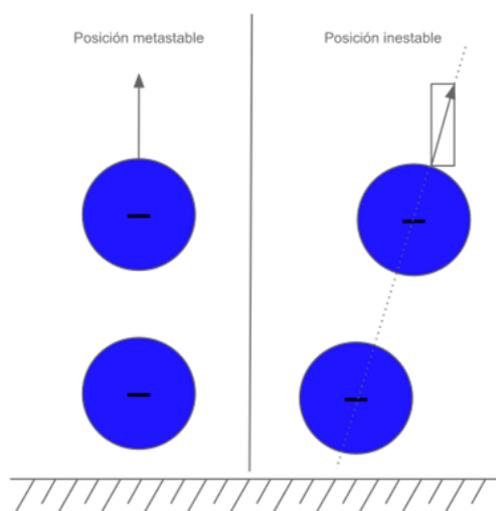


Fig. 8 Dibujo esquemático de las fuerzas de repulsión entre dos cargas eléctricas negativas asumiendo que la gravedad es perpendicular a la línea inferior

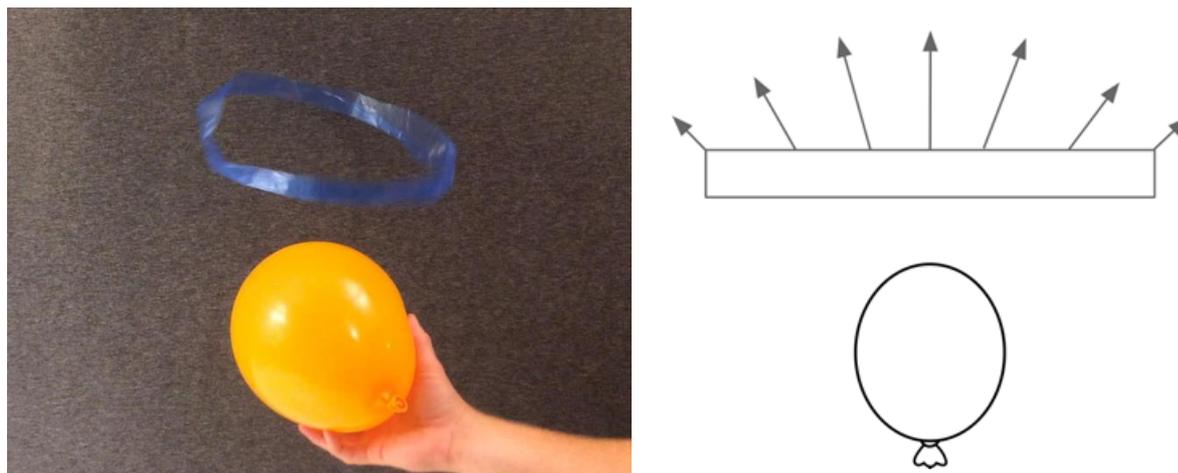


Fig. 9 Levitación electrostática de una cinta sobre un globo ambos con la misma carga eléctrica. (Izquierda) fotografía de demostración. (Derecha) dibujo esquemático de la dirección de las fuerzas electrostáticas que se ejercen sobre la cinta

No obstante, el teorema de Earnshaw sólo aplica a cargas puntuales así que estamos de suerte y podemos considerar otras geometrías. Por ejemplo, una cinta de plástico que podemos conseguir cortando una bolsa del supermercado y un globo como se muestra en la Fig. 9. El experimento consiste en frotar el globo hinchado con un pedazo de lana y hacer lo mismo con la cinta de plástico. Ambas quedarán cargadas con electrones (negativamente) y por lo tanto se repelerán. En la Fig.9 podemos ver una foto real del experimento y un esquema de la distribución de fuerzas sobre la cinta que hace posible la levitación estable.

El ejemplo de la levitación del globo nos da una levitación pasiva y estática, la levitación ideal que no requiere de mecanismos de control para mantener su estabilidad. Entonces, ¿hemos encontrado lo que buscábamos? Parcialmente si, la naturaleza de esta levitación es la que andamos buscando, pero hay un pequeño problema, la magnitud de las fuerzas de levitación en electrostática es muy pequeña, es decir, no podemos hacer levitar objetos de mucho peso. Esto supone un problema para potenciales aplicaciones como trenes levitantes. Sin embargo, la levitación electrostática se usa mucho hoy en día, por ejemplo:

- experimentos de microgravedad: Experimentos donde se expone a microorganismos a condiciones de gravedad cercana a cero para estudiar su comportamiento.
- Experimentos en el campo de la nanotecnología: se usa la levitación electrostática para manipular partículas con gran precisión.
- Experimentos en ciencia de materiales: Para estudiar propiedades de materiales a altas temperaturas, por ejemplo, el estudio de puntos de fusión de materiales.

En definitiva, este tipo de levitación es ampliamente usado para la investigación hoy en día, pero no tiene aplicaciones prácticas en tecnología de consumo.

V. LEVITACIÓN MAGNÉTICA

La fuerza magnética también puede ser usada para alcanzar la levitación de un objeto. Normalmente esta fuerza menos intuitiva de entender así que explicaremos brevemente que es la fuerza magnética para posteriormente entender cómo podemos usarla para conseguir levitación.

Cuando hablamos de magnetismo inevitablemente se nos viene a la cabeza la imagen de un imán, un objeto que atrae a los metales y que tiene dos partes, un polo norte (o positivo) y un polo sur (o negativo) tal como se muestra esquemáticamente en la figura de la izquierda. Las flechas dibujadas se

las conoce como líneas de campo e indican la dirección del campo magnético en cada punto, estas van de norte a sur. La separación entre líneas de campo indica la magnitud del campo magnético, así pues, justo en la superficie del norte y del sur el campo magnético es más intenso ya que sus líneas están más juntas. En la Fig. 11 se puede observar una fotografía de un imán real al cual se le ha añadido ferrita (virutas metálicas). Las partículas de ferrita dibujan las líneas de campo del imán, allá donde hay más ferrita el campo magnético es más intenso.

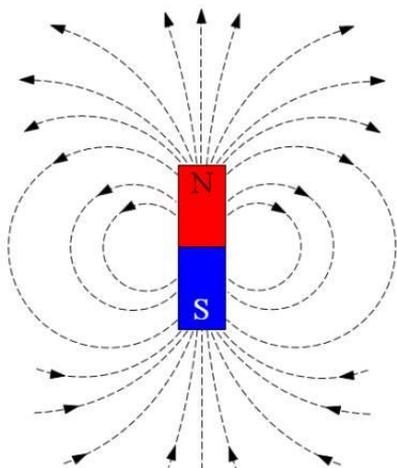


Fig. 10 Esquema de un imán. Tiene un polo norte y un polo sur y las líneas que se muestran son conocidas como líneas de campo (más en el texto)

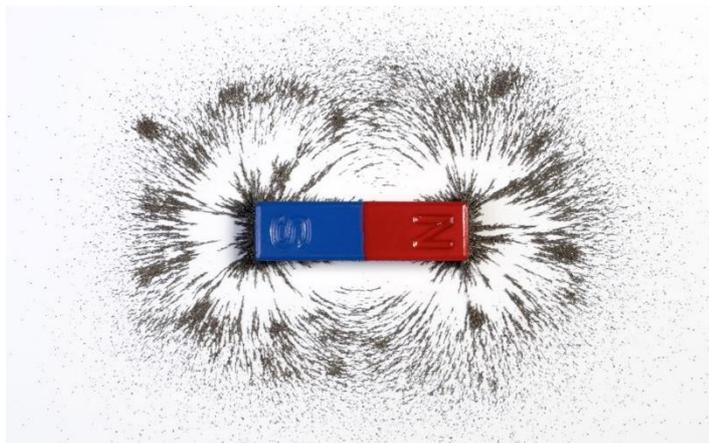


Fig. 11 Fotografía de un imán real, los colores son sólo para indicar los polos de este. Sobre el imán se han dejado virutas de ferrita que siguen el campo magnético generado por éste

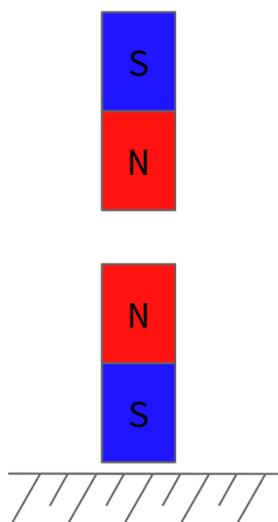


Fig. 12 Dos imanes con polos opuestos. Hay repulsión, pero no levitación

Los imanes no sólo atraen al metal, también experimentan fuerzas con otros imanes. De modo análogo a las cargas eléctricas, los polos opuestos se atraen mientras que los polos del mismo signo se repelen. ¿Podemos entonces poner dos polos opuestos de dos imanes uno encima de otro para conseguir levitación como se muestra en la Fig. 12? Lamentablemente no, ya que el teorema de Earnshaw del que hemos hablado en la sección anterior tiene la misma aplicación en este caso. En el caso de la Fig. 12 si tenemos el imán de la base sujeto el imán que intentamos hacer levitar se dará la vuelta y terminará sur (del imán superior) enganchado con norte (del imán inferior).

No podemos conseguir levitación de manera estable y estática usando imanes permanentes. El teorema va más allá y nos dice que no importa cuantos imanes intentemos usar ni cómo los situemos entre ellos, nunca vamos a poder conseguir una levitación estable y estática usando imanes.

Podemos conseguir levitación con imanes de manera dinámica. Un ejemplo es el Levitrón (Fig. 13), éste está compuesto por dos imanes, uno que actúa como base y tiene forma circular y otro muy pequeño situado en la punta inferior de una peonza. El imán inferior produce un campo magnético cuyas líneas de campo están representadas en color verde. Estas líneas producen un campo magnético encima de él en sentido norte (recordemos que las líneas de campo salen del polo norte y entran en el polo sur). La peonza que está levitando está situada encima de este dispositivo y por lo tanto experimenta un campo magnético norte. Para conseguir repulsión entre la base y la peonza debemos tener un norte magnético en la base de la última, las líneas de campo producidas por la peonza están representadas

en azul siendo así un norte magnético de cara a la base. Tenemos entonces una situación muy similar a la representada en la Fig. 12, dos nortes repeliéndose.

¿Cuáles son entonces las diferencias entre dos imanes permanentes y el Levitrón? ¿Por qué uno es capaz de levitar y el otro no? La primera diferencia es la forma del imán de la base, esta produce un campo magnético en donde situamos la peonza mucho más constante, con menor componente horizontal que haga desestabilizar la levitación. La segunda diferencia y la más importante es que el objeto que levita es una peonza en rotación. Como sabemos una peonza es un objeto que rota sobre su mismo eje a una cierta velocidad angular. La peonza continúa rotando sin ladearse hasta que pierde velocidad y entonces cae al suelo. Al igual que las peonzas habituales el objeto levitante gira sobre sí mismo manteniendo una velocidad de rotación que impide que se ladee y por lo tanto evita la situación de inestabilidad que teníamos usando dos imanes inmóviles. Así pues, aunque por tendencia natural la peonza debería girarse y caer sobre el imán de la base, el hecho de que esté rotando impide que pase esto y por lo tanto se mantiene en una posición estable de levitación.

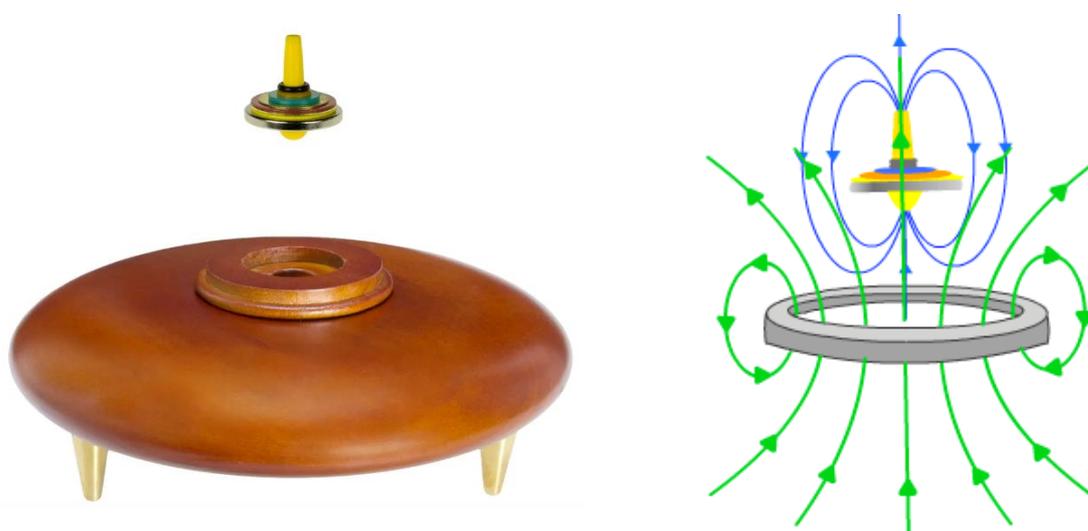


Fig. 13 El Levitrón consiste en una peonza con un imán la punta y una base con un imán permanente circular. (Izquierda) fotografía del dispositivo. (Derecha) Esquema del levitrón, en azul las líneas de campo producidas por el imán en la peonza y en verde las líneas de campo del imán de la base

El Levitrón es un caso de levitación dinámica y pasiva. Es dinámica porque hay partes en movimiento y pasiva porque no requiere de ningún mecanismo estabilizador de la levitación. Podemos conseguir levitación también con objetos que a priori no son magnéticos. Hablamos de materiales diamagnéticos. Éstos no tienen un norte y un sur magnético, pero cuando los acercamos a un imán producen un norte en la parte que experimenta un sur y un sur en la parte que experimenta un norte. Es decir, se polariza de manera opuesta al campo magnético al que está expuesto. Llegamos así a una situación similar a la que hemos descrito varias veces en la Fig. 12.

Como ejemplo tenemos la levitación de grafito sobre imanes, el grafito es el material del que se hacen las minas de los lápices y tiene una estructura cristalina laminar de átomos de carbono. Esta estructura hace fácil que el grafito se magnetice de manera opuesta al campo que se ejerce sobre él.

El agua también es un material diamagnético, y como tal, objetos compuestos por agua se pueden hacer levitar, es decir, podemos hacer levitar seres vivos. En la figura de la derecha tenemos un experimento realizado en la universidad de Nijmegen en Holanda, en esta se muestra una rana levitando en un campo magnético muy elevado producido por electroimanes. En teoría también podríamos hacer levitar humanos, pero para ello necesitaríamos campos magnéticos muy potentes, los cuales son imposibles de generar con la tecnología actual.

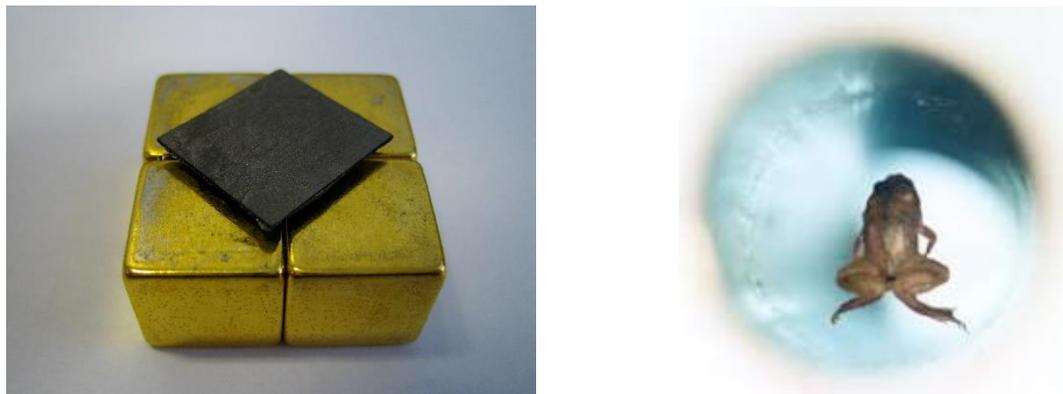


Fig. 14 Ejemplos de levitación diamagnética. (Izquierda) lámina de grafito levitando sobre imanes permanentes. (Derecha) Rana viva levitando en un campo magnético de 16 Tesla (alrededor de 250.000 veces mayor que el de la tierra) [6]

En resumen, aunque se puede conseguir levitación estable estática y pasiva con diamagnéticos (véase el caso de la lámina de grafito) el campo magnético necesario para ello es muy elevado y por lo tanto esta técnica es poco práctica. Podemos conseguir fuerzas de levitación mayores usando sólo imanes permanentes o electroimanes, pero entonces el problema es poder conseguir una levitación estática (sin piezas móviles) y pasiva.

VI. LEVITACIÓN CON SUPERCONDUCTORES

En esta última sección veremos cómo se puede conseguir levitación estable, estática y pasiva de manera natural con materiales superconductores.

Antes de hablar de la superconductividad tenemos que entender qué es un material conductor y cómo se define la resistencia eléctrica. Los materiales que conducen la electricidad se llaman conductores eléctricos, el cobre es un ejemplo común de material conductor que tenemos en cualquier cable en casa. En cualquier material podemos definir una magnitud llamada resistencia eléctrica, cuanto mayor es la resistencia eléctrica menos corriente eléctrica puede transportar el material (a un mismo voltaje) y por tanto conducirá menos energía y ésta se gastará en forma de calor. Por poner un límite, un material con resistencia muy grande puede ser considerado material aislante, es decir, un material que no conduce la electricidad.

La resistencia eléctrica de un material puede depender de la temperatura a la que esté sometido. El físico neerlandés Heike Kamerlingh Onnes realizaba en 1911 experimentos para medir la resistencia eléctrica de diferentes materiales a temperaturas muy bajas cuando descubrió que la resistencia del mercurio cae drásticamente a casi cero a una temperatura de apenas 4.2 Kelvin (-269 grados centígrados), en la Fig. 15 podemos ver la gráfica original del artículo publicado por Onnes [7]. Se había descubierto el fenómeno de la superconductividad, por el cual Onnes recibió el premio Nobel de física del año 1913. La superconductividad no sólo se produce en el mercurio, hay otros elementos que transicionan a diferentes temperaturas (que llamaremos temperatura crítica), por ejemplo, el aluminio tiene una temperatura crítica de 1.2K (-271,95 °C), el plomo de 7,19K (-265,96 °C) y algunas cerámicas como YBCO de 93K (-180,15 °C).

Uno de los problemas del transporte de energía eléctrica es la gran disipación de energía que se produce al transportarla mediante los cables de alta tensión. Como era de esperar el descubrimiento de la superconductividad abrió un nuevo campo para potenciales aplicaciones en el transporte de energía ya que los superconductores presentan resistencia eléctrica cero. No obstante, hay un obstáculo claro, para conseguir superconductividad en un material se necesitan temperaturas muy bajas. De hecho, los superconductores con temperaturas críticas más altas se les llama superconductores de alta temperatura y tristemente, por alta nos referimos a temperaturas del orden

de los 90K (-183,15°C), que se puede conseguir con Nitrógeno líquido. Hasta el momento no se ha conseguido desarrollar ningún material que presente propiedad superconductor a temperatura ambiente aunque se hayan publicado artículos recientemente.

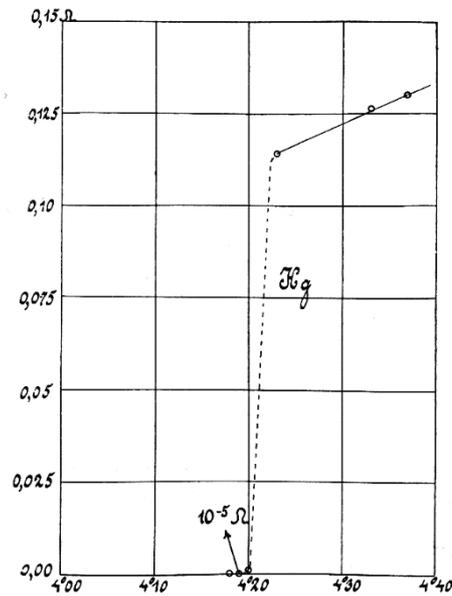


Fig. 15 (Izquierda) Heike Kamerlingh Onnes. (Derecha) Gráfico original del artículo de Onnes donde se muestra la resistencia eléctrica en función de la temperatura y cómo a los 4.2K hay una bajada brusca de resistencia

Otra propiedad interesante del superconductor surge cuando lo sometemos a un campo magnético externo. Imaginemos un superconductor que está sometido a un campo magnético constante como se muestra en la ilustración de la izquierda (líneas de campo rectas y paralelas). Cuando el superconductor está a una temperatura más alta que la temperatura de transición, el campo magnético no se ve afectado. Sin embargo, si seguimos disminuyendo la temperatura, el material transiciona a superconductor y expulsa el campo magnético de su interior, lo que se conoce como efecto Meissner [8]. Es decir, a la temperatura de transición el superconductor genera un campo magnético de tal forma que cancela el campo magnético que experimenta en su interior, esto es, se convierte en un diamagnético perfecto.

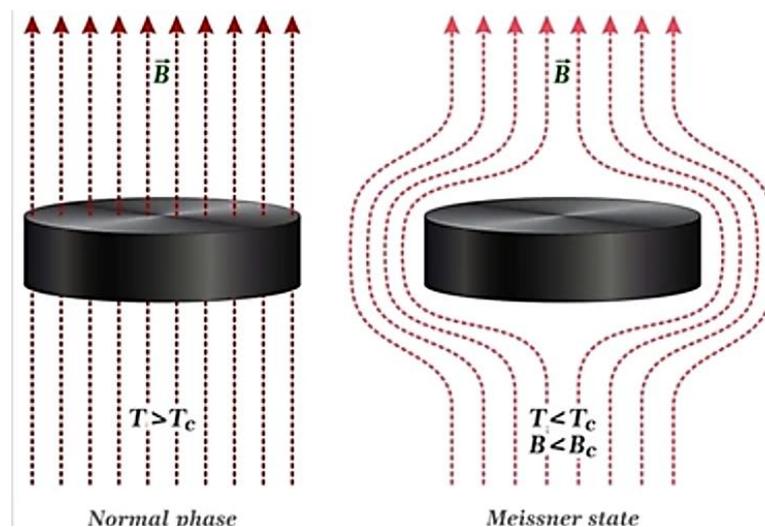


Fig. 16 Dibujo ilustrativo del efecto Meissner. (Izquierda) Superconductor por encima de la temperatura crítica en un campo magnético uniforme. (Derecha) Superconductor por debajo de la temperatura crítica, las líneas de campo son expulsadas

Al someter al superconductor a un campo magnético hemos dicho que éste genera un campo magnético tal que contrarresta el campo magnético externo y así conseguir campo nulo en su interior. Ahora bien, ¿cómo genera el superconductor un campo magnético? Resulta que, se puede generar un campo magnético usando corrientes eléctricas y como hemos visto los superconductores son muy buenos en mantener corrientes eléctricas. André-Marie Ampère descubrió en 1826 que dos cables paralelos por los que discurre la corriente en sentido opuesto se repelen mientras que si lo hacen en el mismo sentido se atraen. Es decir, la corriente eléctrica de uno produce un campo magnético en el otro, lo que genera una fuerza entre ellos. Usamos el campo magnético producido por corrientes eléctricas en muchas aplicaciones prácticas: motores, generadores y transformadores eléctricos, discos duros, altavoces, etc.

Si volvemos a la figura anterior, Fig. 16, el superconductor en estado Meissner ha generado unas corrientes eléctricas que a su vez han generado un campo magnético en el interior del material de tal manera que el campo total en el interior sea cero. En la figura vemos que no hay líneas de campo dentro de la muestra en estado Meissner, es decir, el campo es cero.

El superconductor en estado Meissner es un diamagnético perfecto, en la sección anterior describíamos como los diamagnéticos pueden levitar. Del mismo modo podemos hacer levitar un superconductor (diamagnético perfecto) usando imanes permanentes, no obstante, cualquier distribución geométrica de imanes no nos sirve, debe ser una que genere un pozo de campo magnético allá donde se quiera hacer levitar el superconductor [9].

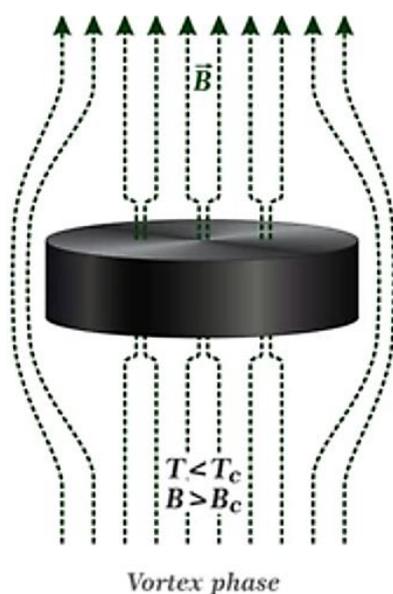


Fig. 17 Superconductor en estado mixto, el campo magnético puede atravesar la muestra

Hay otro tipo de superconductores que permiten la levitación en cualquier tipo de campo magnético, por ejemplo, el campo magnético producido por imanes permanentes en una posición arbitraria. Esto es mucho más útil ya que la levitación es perfectamente estable. Los superconductores tipo II transicionan a un estado llamado mixto. En este estado el superconductor recuerda el campo magnético en el que fue congelado y generará corrientes eléctricas para mantenerlo en su interior (Fig. 17). Cabe hacer hincapié en la diferencia con el estado Meissner donde el superconductor generaba corrientes para que en el interior del mismo el campo total fuese cero. En la figura de la izquierda se muestra un superconductor en estado mixto que ha sido congelado a un campo magnético constante no nulo, se ve cómo deja pasar parte del campo magnético a través de él.

Podemos usar la superconductividad en estado mixto para hacer levitar la muestra de manera estable, estática y pasiva gracias a las corrientes eléctricas que se generan en ella. En la Fig. 18 se muestra la sección rectangular de dos barras muy largas (en la dirección perpendicular al papel) de material superconductor (SC) e imán permanente (PM). En este caso el superconductor es enfriado por debajo de su temperatura crítica lejos del imán permanente de manera que inicialmente el campo magnético es cero dentro del superconductor. Posteriormente acercamos poco a poco el superconductor al imán permanente, el primero tiende a querer conservar el campo cero en su interior, para ello genera unas corrientes internas (que se muestran en gris y negro y van en dirección perpendicular al papel en la figura) que apantallan o cancelan el campo magnético del imán permanente.

Hablando con poco rigor, en este caso el superconductor en estado mixto fue congelado a campo cero, a medida que lo acercamos va generando corrientes para intentar hacer cero el campo en la máxima región (zona en blanco, donde no hay líneas de campo).

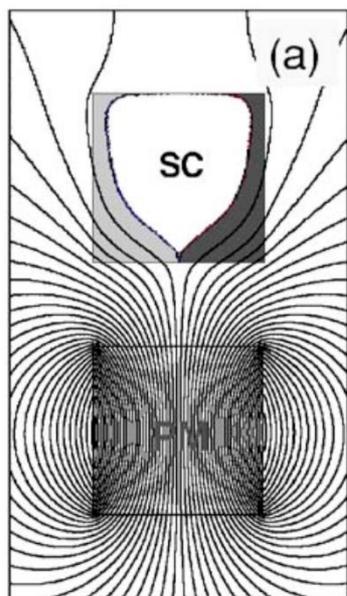


Fig. 18 Imán permanente (PM) y superconductor en estado mixto (SC). El campo magnético penetra parcialmente en el superconductor, esto permite la levitación del superconductor. (Ref. 9)

El superconductor se mantiene levitando de manera estable en la posición que se muestra en la figura, el campo magnético del imán interactúa con las corrientes eléctricas del superconductor y así generan una fuerza de levitación. Dicha fuerza es muy grande ya que las corrientes que se generan en el superconductor son muy elevadas. Asimismo, la levitación es estable, si desplazamos ligeramente el superconductor un poco hacia la derecha o a la izquierda, éste generará corrientes que harán que el superconductor vuelva a su posición original centrada.

Hemos encontrado lo que buscábamos, la levitación con superconductores en el estado mixto es estática y pasiva. Es estática porque no hay ningún elemento en movimiento en el sistema y es pasiva porque no hay ningún mecanismo para mantener la estabilidad de la levitación.

La levitación con superconductores tiene aplicaciones muy interesantes como por ejemplo los trenes magnéticos levitantes o MagLevs. Éstos al no tener ningún punto de contacto con el suelo, pueden alcanzar mucha más velocidad con la misma cantidad de energía.

Uno de los trenes levitantes en activo más famosos es el Shanghai Transrapid, una línea que une el aeropuerto de Shanghai con la ciudad, su velocidad máxima de crucero es de 300 kilómetros por hora y se abrió al público en 2004. Se muestra una fotografía del tren en la Fig. 19.

Otros proyectos MagLevs son el Linimo en Japón y el del aeropuerto de Incheon en Korea del Sur. Cabe decir que todos los proyectos hasta ahora requieren de algún sistema estabilizador de la levitación, es decir, se trata de levitación activa. La promesa de los superconductores es la levitación pasiva, veremos en el siguiente ejemplo cómo funciona con un ejemplo de laboratorio.



Fig. 19 Fotografía del MagLev Shanghai Transrapid en Shanghai

En la Fig. 20 mostramos una fotografía real de un pequeño experimento de levitación con superconductores. La pequeña pastilla de color negro es el material cerámico superconductor compuesto por Ytrio, Bario, Cobre y Oxígeno (YBCO). Esta pastilla está colocada sobre cuatro imanes

permanentes de Neodimio (color metálico). Podemos ver cómo el superconductor está levitando encima de los imanes permanentes.

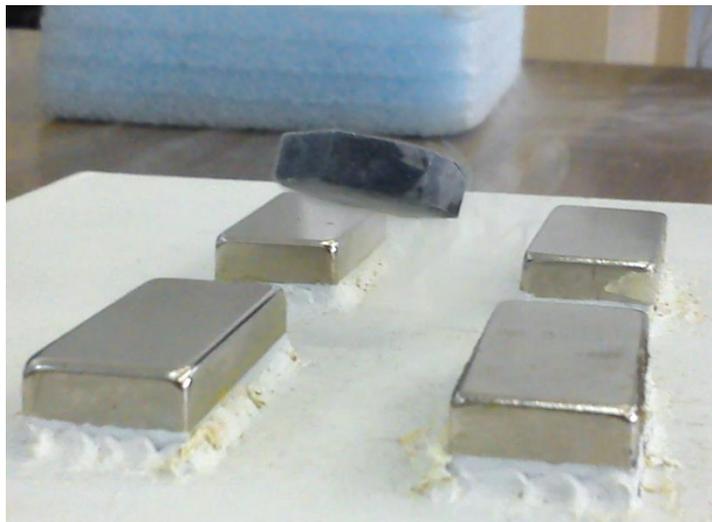


Fig. 20 Pastilla de superconductor YBCO levitando sobre unos imanes permanentes

En la Fig. 21 se muestra una maqueta de un tren levitante de un laboratorio del departamento de física de la Universitat Autònoma de Barcelona. El dispositivo consiste en dos partes, un pequeño vehículo hecho de porexpan con una pequeña ranura donde colocamos la pastilla de YBCO y una vía de imanes permanentes.

El procedimiento para conseguir levitar el tren de la maqueta es el siguiente: Primero enfriamos la pastilla sumergiéndola en nitrógeno líquido a -196 Celsius para que transicione a estado superconductor. Lo hacemos lejos de la vía para que se enfríe a campo magnético cero. Seguidamente colocamos la pastilla en la ranura dentro del vehículo y éste encima de la vía. Presionamos un poco el vehículo hacia la vía para que se formen las corrientes superconductoras dentro de la pastilla y así conseguir una levitación estable. Posteriormente dejamos el vehículo levitando y podemos darle un pequeño empujón para ver cómo sigue las vías del tren levitando. El vehículo dejará de levitar a medida que la pastilla de superconductor se vaya calentando con el ambiente y finalmente dejará de levitar y caerá sobre las vías.

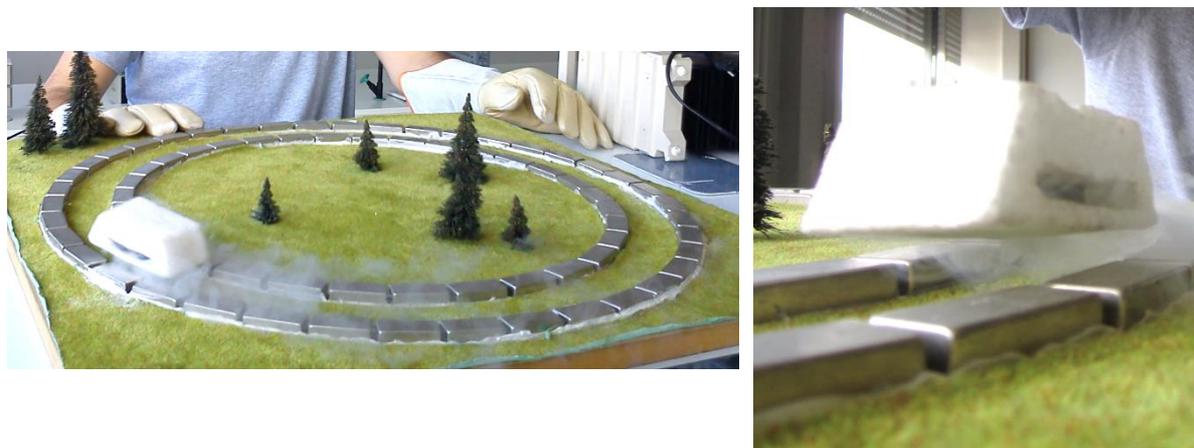


Fig. 21 Maqueta del tren levitante superconductor del departamento de física de la Universitat Autònoma de Barcelona

Lamentablemente aún no existe ningún tren comercial que presente levitación pasiva y estática, el experimento anterior es muy básico y la implementación a escalas más grandes no es tarea fácil, es

un campo de investigación activo. La levitación con superconductores no sólo sirve para los MagLevs, también existen unos dispositivos llamados “flywheels” que son ruedas superconductoras que rotan a una velocidad muy alta sin apenas fricción, estas sirven para almacenar energía de rotación. Si dejamos el foco de la levitación los superconductores tienen aplicaciones en:

- Transporte de electricidad: Su baja resistencia los hace ideales en puntos críticos de la red eléctrica donde hay mucha potencia.
- Imagen médica: La gran corriente que llevan los superconductores hace que puedan generar campos magnéticos muy elevados. Estos campos son necesarios para aplicaciones como la resonancia magnética.
- Investigación fundamental: En los grandes colisionadores de partículas necesitamos campos magnéticos muy grandes para poder cambiar la trayectoria de partículas con carga eléctrica.
- Procesamiento de materiales y minería: Se pueden usar los superconductores como imanes para separar metales en procesos de separación de materiales.
- Computación cuántica: La superconductividad es un fenómeno cuántico macroscópico y como tal presentan propiedades interesantes para la construcción de superordenadores cuánticos.

VII. CONCLUSIONES

En este artículo divulgativo hemos hecho un resumen de qué es la levitación, esta consiste en mantener un cuerpo suspendido en el aire sin ningún contacto con otros objetos en contra de la gravedad. Hacer levitar un objeto no es tarea fácil ya que muchas veces el objeto levitante queda en una posición poco estable, no obstante, hemos visto varios ejemplos donde conseguimos una estabilidad razonable con fuerza aerodinámica, acústica, eléctrica e incluso magnética. En muchos casos, necesitamos de mecanismos activos para mantener la estabilidad, por ejemplo, en el caso de los trenes magnéticos levitantes comerciales o necesitamos piezas móviles para la estabilidad como sería el caso de la peonza del Levitrón. El único caso que hemos visto de levitación estática y pasiva es la levitación con superconductores en estado mixto. Los superconductores son unos candidatos excelentes para nuevas tecnologías de levitación debido a que su fuerza de levitación es muy grande, así como su estabilidad. No obstante, estos materiales tienen el problema que para alcanzar el estado superconductor necesitan de temperaturas muy bajas difíciles de conseguir lo cual dificulta y encarece su aplicación en nuevas tecnologías.

Actualmente el campo de la superconductividad sigue siendo muy activo a nivel de investigación científica. Los investigadores buscan maneras de aumentar la temperatura crítica de éstos, así como la cantidad de corriente que pueden llevar. A nivel más técnico se busca cómo fabricar superconductores de alta calidad a escala industrial o mejores aislamientos térmicos para gastar menos energía en criogenización.

IX. REFERENCIAS

- [1] Efecto Leidenfrost en [Youtube](#).
- [2] Demostración de ondas estacionarias en [Youtube](#)
- [3] Demostración de experimento de ondas acústicas estacionarias en Argonne National Laboratory (Chicago). [Youtube](#)
- [4] Paul A. Tipler, Gene Mosca. “Física para la Ciencia y la Tecnología”
- [5] Samuel Earnshaw, “On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether,” *Trans. Cambridge Philos. Soc.* 7, 97–112, 1842.
- [6] Levitating frog <https://www.ru.nl/hfml/research/levitation-explained/diamagnetic-levitation/>
- [7] Heike Kamerlingh Onnes, Koninklijke Academie van Wetenschappen, Communications 124c, 30 December 1911.
- [8] Meissner y R. Ochsenfeld, *Naturwissenschaften* 21, 787 (1933). Traducción del original a inglés A. M. Forrrest Eur. J. Phys. 4, 117 (1983).
- [9] Magnetic Levitation of Superconducting Bars. *Journal of Applied Physics* 99, 113904 (2006). A. Sánchez, N. Del Valle, E. Pardo, Du-Xing Chen, C. Naval.

X. AUTOR



SEBASTIÀ AGRAMUNT PUIG nació en Vinaròs en 1987. Se licenció en ciencias físicas en la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) en el año 2009 donde posteriormente cursó el master de Ciencia y Tecnología de los Materiales y se doctoró en 2013 en el departamento de física de la misma universidad. Posteriormente hizo breves estancias de investigación en el departamento de materiales y el Insitut Català de Nanociència i Nanotecnologia situados en el mismo campus de la UAB. En fase investigadora hizo notables avances en el campo de la levitación con superconductores y del estudio teórico de imanes nanoscópicos para el almacenaje de información. Sebastià dejó la investigación académica para trabajar en el sector privado donde se ha focalizado en varios temas desarrollando software y algoritmos en inteligencia artificial, privacidad en inteligencia artificial y biofísica. Actualmente trabaja en Eikon Therapeutics, una startup de Silicon

Valley (California) cuyo objetivo es encontrar fármacos para la cura del cáncer mediante microscopía de fluorescencia. En Eikon, Sebastià desarrolla algoritmos de visión por computador, software de alto rendimiento para el procesamiento de imágenes y teoría sobre dinámica de proteínas.