

Lección 10: Mediciones del campo magnético

Resumen

Los métodos de medición sensible de los campos magnéticos permiten detectar cambios muy pequeños en el campo magnético de la Tierra. En la superficie puede ser utilizado para detectar yacimientos de minerales, submarinos o estructuras arqueológicas. A distancia, hay que confiar en las detecciones indirectas, como la polarización de la luz y la descomposición de las líneas espectrales. Esto hace que los campos magnéticos se enfoquen en la formación de estrellas y galaxias, aunque el origen de los campos magnéticos en el universo sigue siendo un misterio.

Tabla de contenidos

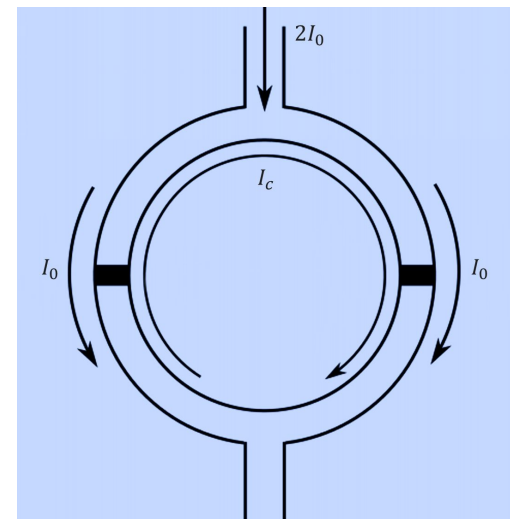
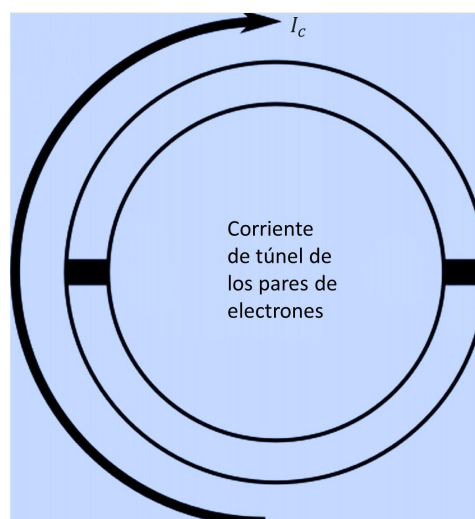
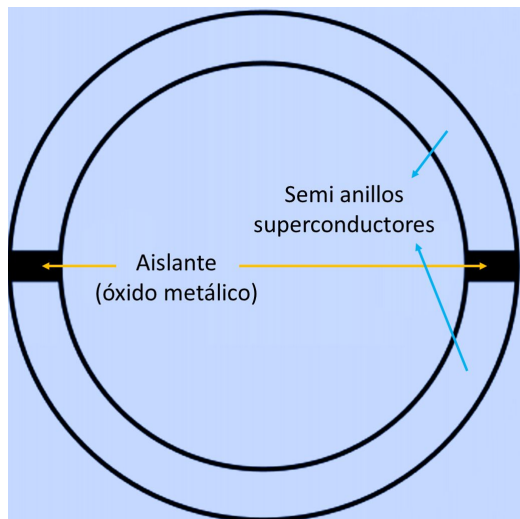
- Folio 2: El efecto Josephson
- Folio 3: El dispositivo SQUID
- Folio 4: El SQUID como patrón de interferencia
- Folio 5 – 8: El funcionamiento del SQUID (1-4)
- Folio 9 – 10: Aplicaciones del SQUID (1-2)
- Folio 11: Campos magnéticos lejanos
- Folio 12 – 14: El efecto Zeeman (1-3)
- Folio 15 – 16: Campos magnéticos de la superficie solar (1-2)
- Folio 17: Manchas solares
- Folio 18: Campos magnéticos en las estrellas
- Folio 19: Campos magnéticos en el universo

El efecto Josephson

La superconductividad es un fenómeno cuántico macroscópico al que se añaden numerosos efectos. Uno de ellos es el efecto Josephson, según su descubridor Brian Josephson, que se basa en una corriente eléctrica muy pequeña a través de contactos superconductores separados por un aislante. El efecto sólo se produce en los superconductores cuando los electrones de conducción forman pares de electrones por interacción con la red. Para la mayoría de los pares de electrones, los espines en el estado superconductor están alineados de forma antiparalela, de modo que el espín total resultante es cero. Si el espesor del aislante está en el rango de 1-3 nm, los pares de electrones superan el aislante, lo que se denomina efecto de túnel (véase Lección 2 y 7). En conexión con este efecto túnel fue posible diseñar sensores extremadamente sensibles. Uno de ellos es el dispositivo de interferencia cuántica de superconducción, abreviado como SQUID, que es un sensor para la medición muy precisa de cambios del campo magnético extremadamente pequeños. El magnetómetro cuántico consta de 2 semi anillos superconductores conectados por aislantes muy delgados.

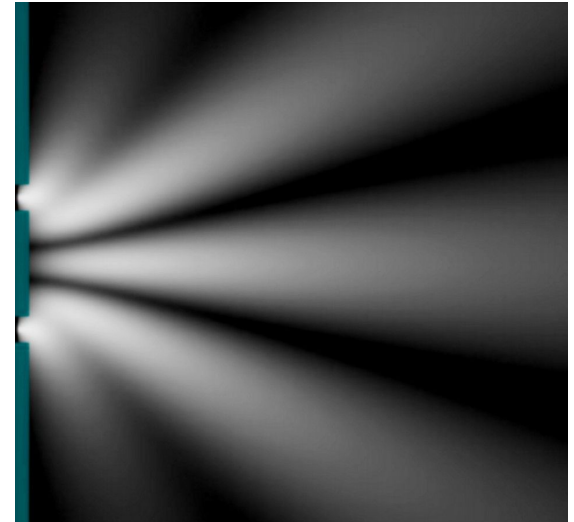
El dispositivo SQUID

Una corriente de túnel, $I_{\text{corriente característica}} (= I_c)$, de electrones en pares pasa por cada contacto. Esto se compensa con el movimiento de electrones individuales, por lo que no se puede medir ninguna voltaje externo. Si una corriente de aproximadamente la misma magnitud que la corriente de túnel I_c fluye a través del anillo superconductor desde una fuente de corriente externa, esta corriente se divide en 2 porciones de tamaño medio, $I_{\text{corriente externa}} (= I_0)$, que se reúnen después de pasar por los contactos.



El SQUID como patrón de interferencia

En cierto sentido, se trata de un análogo del experimento de la doble rendija óptica con la luz y el patrón de interferencia que resulta tras ella. En lugar de la luz, se consideran las corrientes de electrones, pero en forma de sus propiedades ondulatorias. Las ondas de electrones que se propagan a través de los contactos interfieren y el patrón de interferencia se expresa en un cambio de la corriente de túnel característica I_C .

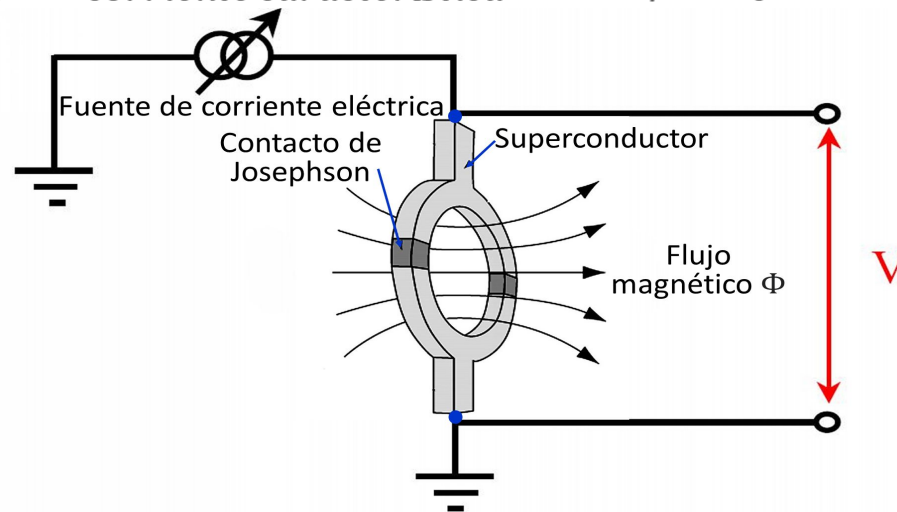


Sin un campo magnético externo, las trayectorias son las mismas y ambas ondas llegan sin diferencia de fase. En presencia de un campo magnético, una corriente superconductor circula por el circuito. Esta corriente se encuentra en uno de los contactos en contra de una de las corrientes parciales y debe sustraerse de ella y adicionarse correspondientemente a la segunda corriente parcial en el otro contacto. Esto hace que las corrientes en ambas secciones sean diferentes, lo que resulta en una diferencia de fase entre los contactos del túnel.

El funcionamiento del SQUID (1)

Dependiendo del campo magnético externo, la corriente del SQUID cambia, lo que puede medirse en forma de un voltaje a través del anillo superconductor. Siempre que la diferencia de fase $\Delta\varphi$ sea un múltiplo entero de 2π , es decir, $n \cdot 2\pi$, el flujo de corriente no se ve afectado. Si n es un semi entero, el estado superconductor se hace inestable, la resistencia y, por lo tanto, el voltaje que puede medirse externamente aumenta. El cambio de fase $\Delta\varphi$ determina la corriente superconductor de los electrones en pares.

$$I_0 = I_{\text{corriente característica}} \cdot \sin \Delta\varphi = I_c \cdot \sin \Delta\varphi$$



El funcionamiento del SQUID (2)

Debido a los fenómenos cuánticos, sólo un flujo magnético que sea un múltiplo entero del cuanto de flujo magnético elemental puede fluir a través de un anillo superconductor. El flujo magnético se llama Φ y tiene la dimensión campo magnético B multiplicado por el área A [Vs]. El cuanto de flujo magnético es Φ_0 .

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.067 \cdot 10^{-15} Vs$$

El estado superconductor está formado por pares de electrones, por lo que siempre hay que tener en cuenta la doble carga $2e$; h es la constante de Planck.

Si el campo magnético externo cambia, se genera una corriente eléctrica circular en el anillo que es exactamente lo suficientemente grande como para aumentar o disminuir el flujo magnético en el anillo superconductor hasta el múltiplo más cercano del quantum del flujo magnético.

El funcionamiento del SQUID (3)

El cambio de fase $\Delta\varphi$ en el tiempo Δt induce un voltaje V que se mide en los terminales de corriente del anillo superconductor.

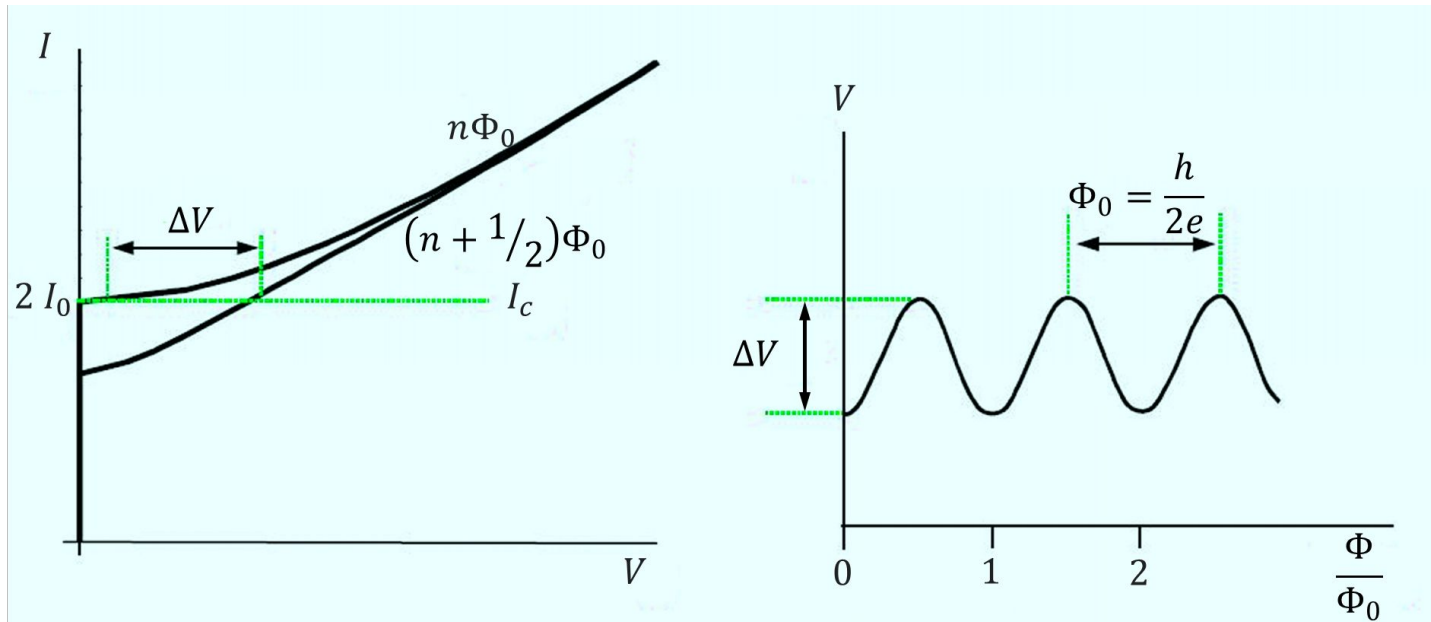
$$V(t) = \frac{\Phi_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{h}{2e} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\Phi}{dt}$$

Esta relación corresponde a la ley de la inducción. Hay que tener en cuenta que el superconductor portador de corriente está completamente libre de campos magnéticos en su interior como una sustancia diamagnética ideal. El voltaje inducida se origina en la energía cinética de los pares de electrones.

El voltaje como función del flujo magnético creciente es periódica (aproximadamente sinusoidal). Si el flujo magnético a través del anillo superconductor cambia por 1 cuanto de flujo, el voltaje externo varía entre el mínimo y el máximo de la oscilación sinusoidal. Esto se puede medir, lo que permite que la sensibilidad de la medición sea menor que un quantum elemental del flujo magnético.

El funcionamiento del SQUID (4)

El gráfico muestra la característica corriente-voltaje de un dispositivo SQUID. La curva superior representa múltiplos enteros de los cuantos del flujo magnético, la curva inferior representa múltiplos semi enteros. La oscilación del voltaje es detectable cuando la corriente suministrada por una fuente de corriente externa es similar en magnitud a la corriente del túnel.



Aplicaciones del SQUID (1)

Para aumentar el rango dinámico, se puede aplicar un circuito de retroalimentación. En este modo, se aplica un flujo magnético opuesto para mantener constante el flujo magnético a través del SQUID. La intensidad del flujo magnético aplicado es proporcional al campo magnético externo, lo que permite medir directamente un campo magnético B . La sensibilidad de medición que puede alcanzarse para campos magnéticos es menor que $10^{-15} T$.

Esto abre numerosas aplicaciones. Uno está en el campo médico, como la medición de corrientes eléctricas en el cerebro utilizando su campo magnético para exámenes neurológicos.

Los SQUIDS también sirven como sensores de movimiento de alta precisión como el cambio de una distancia de una fracción del diámetro de un protón por la detección de ondas gravitacionales.



Aplicaciones del SQUID (2)

Otras son mediciones a gran escala de las desviaciones más pequeñas en el campo magnético de la Tierra volando sobre las zonas con un detector SQUID. Se pueden ver patrones paleomagnéticos, que brindan información sobre la dinámica de la corteza terrestre. Las estructuras muy regulares pueden indicar peculiaridades arqueológicas que se han sedimentado y cubierto de vegetación durante milenios. Al volar sobre el mar, se podían descubrir submarinos debido a su casco de acero. Además, al volar sobre tierra y montañas, las desviaciones en el campo magnético terrestre dan indicaciones de depósitos de minerales, particularmente yacimientos de hierro. Estos pueden ser afirmados y explotados de antemano como un reclamo sin perforación de prueba.



Campos magnéticos lejanos

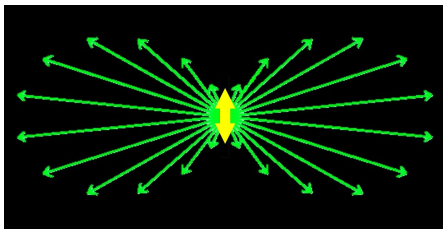
Para objetos luminosos distantes, la presencia de campos magnéticos con su intensidad y dirección puede determinarse a partir de su espectro de emisión óptica. Se trata típicamente de estrellas como el Sol y de nubes de gas luminosas en el espacio. La detección se consigue mediante un análisis preciso de las líneas espectrales, que se dividen en varios componentes bajo la influencia de un campo magnético. Este fenómeno lleva el nombre de su descubridor y se denomina efecto Zeeman. Los desplazamientos de energía resultan del efecto del campo magnético sobre el momento dipolar magnético de la capa atómica, formado por el momento angular orbital y el espín de los electrones. El efecto también existe para el espín nuclear, en este caso aproximadamente 2000 veces menor debido al momento dipolar magnético de los espines nucleares.

El desplazamiento de energía debido a un campo eléctrico se denomina efecto Stark.

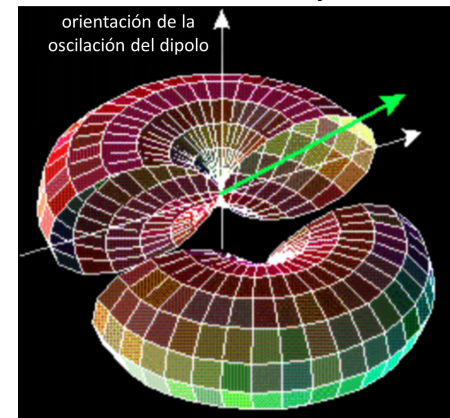
Por razones históricas, se habla del efecto normal para los átomos con número cuántico $S=0$ para el espín total; cuando se tiene en cuenta el espín semi entero del electrón o los múltiplos medio enteros, se habla del efecto Zeeman anómalo.

El efecto Zeeman (1)

Un electrón en una órbita circular forma una corriente circular y por lo tanto tiene un momento angular y un momento dipolar magnético. En general, cualquier movimiento de un electrón en órbita puede descomponerse en una componente paralela a un campo magnético existente y una componente perpendicular a él. El componente vertical puede ser sustituido por 2 movimientos circulares con sentido de circulación opuesto. La componente que oscila en paralelo al campo magnético no siente ninguna fuerza, es decir, la frecuencia de la luz emitida por el electrón no cambia. Según las propiedades de radiación de un oscilador lineal (característica dipolar), no hay radiación de energía en la dirección del campo magnético, sino sólo perpendicular a él.



El campo eléctrico de la onda electromagnética oscila en paralelo a la dirección del campo magnético y, por lo tanto, aparece linealmente polarizado.



El efecto Zeeman (2)

El efecto del campo magnético sobre las dos componentes que oscilan circularmente consiste, según la dirección orbital, en un aumento o disminución de la frecuencia orbital. A la frecuencia angular ω del movimiento orbital de los componentes circulares se suma o sustrae la fuerza de Lorentz en el campo magnético y, por tanto, cambia la frecuencia $\Delta\omega$ de la luz emitida.

$$m_{el} \cdot \omega^2 r \pm e \cdot v \times B = m_{el} \cdot (\omega \pm \Delta\omega)^2 r$$

$$(\omega \pm \Delta\omega)^2 = \omega^2 \pm 2 \cdot \Delta\omega \cdot \omega + \Delta\omega^2 \approx \omega^2 \pm 2 \cdot \Delta\omega \cdot \omega$$

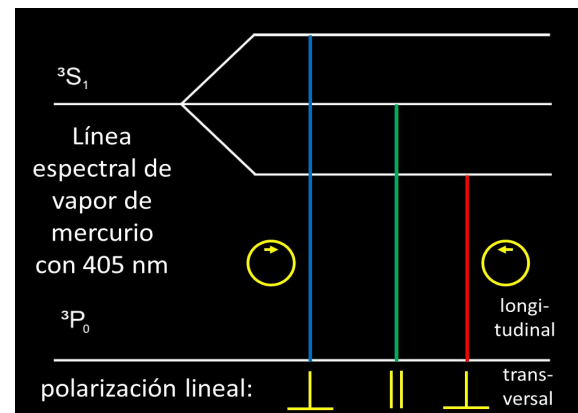
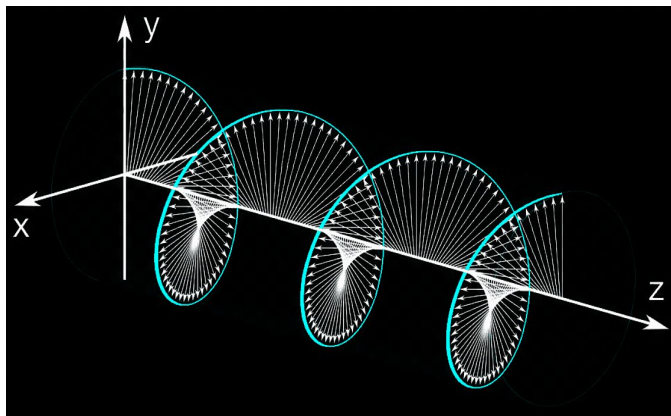
$$\Delta\omega = \pm \frac{1}{2} \frac{e}{m_{el}} B$$

$$\Delta\nu = \pm \frac{e}{4\pi \cdot m_{el}} B$$

Estos cambios de frecuencia $\Delta\nu$ – idénticas a la frecuencia de Larmor $\pm\nu_{Larmor}$ – junto con la frecuencia de emisión inalterada, resultan en el triplete de Zeeman.

El efecto Zeeman (3)

Con la consideración del modelo de 3 componentes del movimiento de los electrones, una línea espectral se divide en 3. Cuando se ven transversalmente, es decir, perpendicularmente a la dirección del campo magnético, las líneas están linealmente polarizadas. Las líneas laterales están orientadas perpendicularmente y la del medio (línea original) paralela al campo magnético. Cuando se observa longitudinalmente, la línea del medio desaparece porque una oscilación dipolar no irradia energía en la dirección de la oscilación, mientras que las líneas laterales están polarizadas circularmente hacia la derecha y la izquierda debido al movimiento circular de los electrones.



Campos magnéticos de la superficie solar (1)

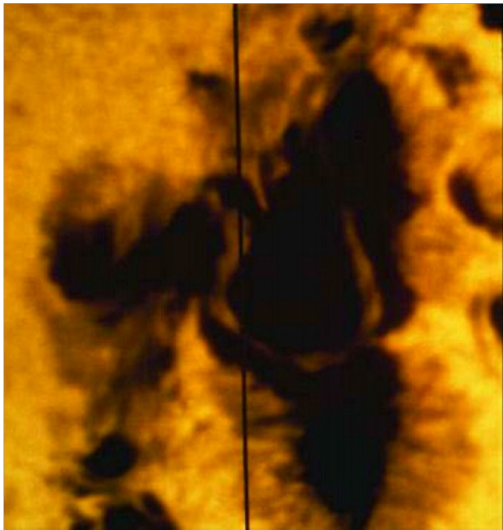
Según el momento angular de la órbita y el espín de los electrones, las líneas espectrales también se dividen en cuartetos, quintetos, sextetos, etc. Sin embargo, también se aplican reglas de selección por la conservación del momento angular, que limitan el número de transiciones en la emisión de radiación electromagnética. Para campos magnéticos muy fuertes, la multiplicidad de las líneas espectrales se reduce normalmente a un triplete.

En el análisis espectral de la luz del Sol, esta multiplicación Zeeman puede observarse con preferencia en las manchas del Sol, siempre que sea mayor que el efecto Doppler debido a los movimientos de la materia (véase Lección 7). La separación de frecuencias es proporcional al campo magnético, a partir del cual se puede calcular su intensidad al lugar de origen. La actividad del Sol se vigila tanto con observatorios terrestres como con satélites. Las líneas espectrales seleccionadas que muestran los multipletes Zeeman se codifican directamente en la intensidad del campo magnético. La orientación del campo magnético se deriva del tipo de polarización de la luz.

Campos magnéticos de la superficie solar (2)

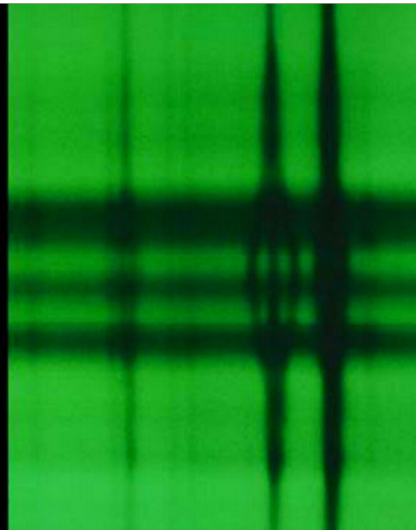
Los fuertes cambios magnéticos van acompañados de expulsiones de materia. Si estos se desplazan hacia la Tierra, los sistemas de comunicación pueden ser afectadas. La imagen del satélite muestra en falsos colores los campos magnéticos ligados a las manchas solares. Los colores naranja/azul representan la dirección de los campos magnéticos en sentido norte-sur y viceversa.

mancha solar

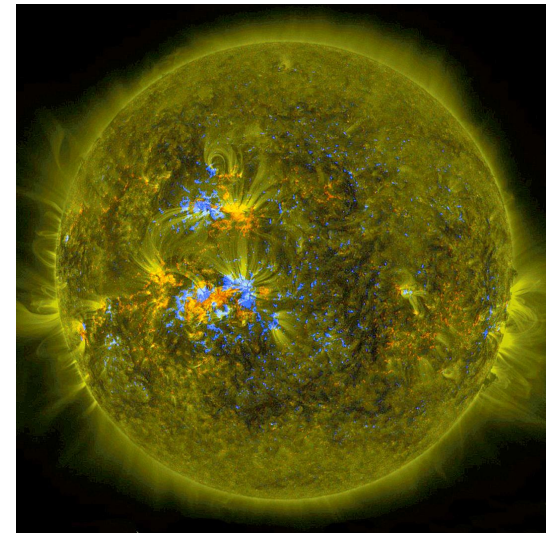


rendija del espectrógrafo

sección del espectro

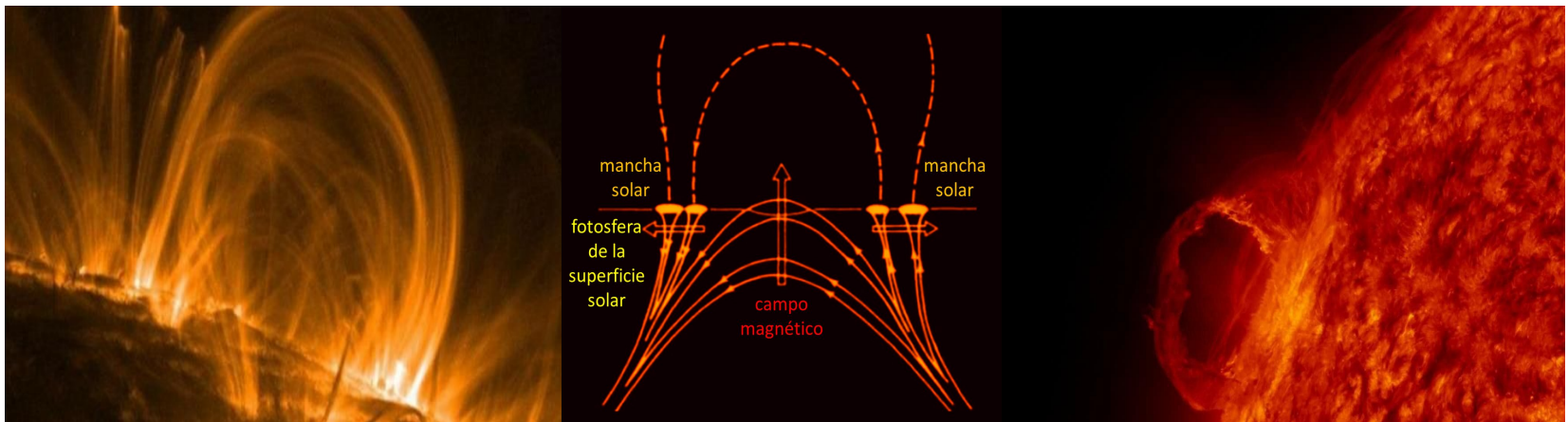


tripleto de Zeeman de una línea espectral



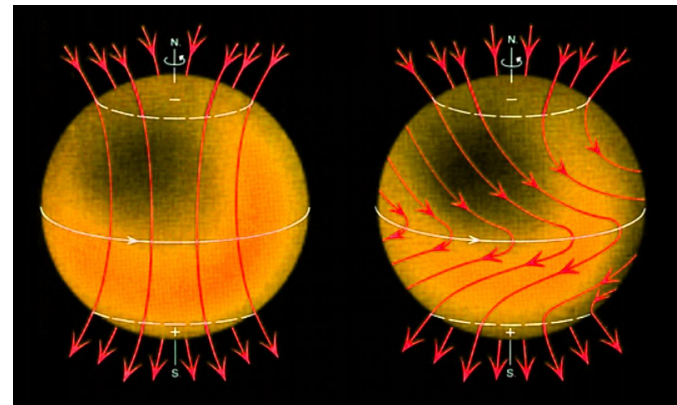
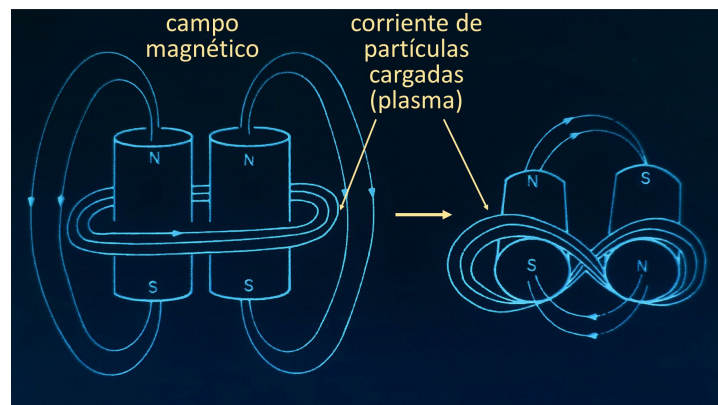
Manchas solares

Para la formación de las manchas solares, se supone que el plasma asciende desde una profundidad de unos 200.000 kilómetros por convección, transportando con él partes del campo magnético del centro del Sol. Cuando las líneas de campo atraviesan la superficie, los fuertes campos magnéticos impiden que siga subiendo el plasma caliente. En comparación, esta zona tiene una temperatura unos 1000 K más baja en una depresión y, por lo tanto, parece oscura. Este fenómeno se denomina mancha solar y, en su mayoría, se forman pares cercanos con direcciones del campo magnético opuestas.



Campos magnéticos en las estrellas

La razón de la aparición de un campo magnético en las estrellas se explica frecuentemente con el efecto dínamo, es decir, un flujo circular de partículas cargadas llamado plasma. Así, al principio aparece un dipolo magnético que, sin embargo, se vuelve inestable en un plasma buen conductor. El resultado es una división en el centro para formar un cuadrupolo que, empujado por las fuerzas magnéticas de repulsión, cambia a una configuración estable mediante una inclinación de 180 grados. Hasta qué grado el campo magnético está firmemente fijado en el centro estelar y puede cargarse energéticamente o renovarse por la rotación diferencial de la materia estelar son cuestiones de investigación actual.



Campos magnéticos en el universo

Se pueden extraer conclusiones sobre la presencia de campos magnéticos y su dirección midiendo el estado de polarización de la luz emitida por las estrellas y las nubes de gas radiante en el espacio. Además, la detección de brillantes relámpagos de radiación electromagnética se atribuye al comportamiento de los estados extremos de la materia. En la serie de descubrimientos de los llamados quásares, púlsares y magnetares (magnetoestrellas), uno de los resultados más recientes es la imagen indirecta de un agujero negro con su campo magnético.

Los campos magnéticos se encuentran entre los campos de fuerza de mayor alcance dentro de las galaxias y fuera en forma de flujos de gas luminoso en el espacio interestelar. La respuesta a las preguntas sobre cómo se generan y siguen los campos magnéticos a escala astronómica proporcionará, sin duda, muchos conocimientos y contribuirá a la comprensión de la evolución cosmológica.

