

MEDICIONES DEL CAMPO MAGNÉTICO SOLAR

Pero, ¿Cómo medimos el campo magnético?

LA LUZ SE COMPORTA DE FORMA DISTINTA EN PRESENCIA DE UN CAMPO MAGNÉTICO, Y ÉSTE CONSTITUYE UNA DE LAS CLAVES PARA CONOCER A FONDO NUESTRO SOL

Por José Carlos del Toro (IAA-CSIC)



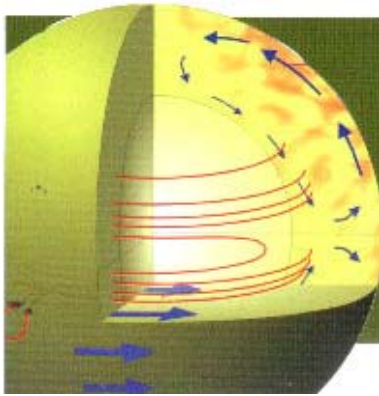
EN NUESTRA VIDA DIARIA, QUIEN MÁS Y QUIÉN MENOS TIENE CLARO QUÉ ES UN CAMPO MAGNÉTICO O, MEJOR, CUÁLES SON SUS EFECTOS, ES DECIR, CÓMO NOTAMOS SU PRESENCIA: las virutas de hierro se adhieren a los imanes a la menor proximidad, y una brújula "enloquece" ante un imán porque se orienta de manera natural en el campo magnético terrestre marcando los polos (magnéticos) Norte y Sur de nuestro planeta. Algunos también sabemos que el mismo campo magnético terrestre desvía las partículas cargadas provenientes del Sol con gran energía hacia los polos y produce las espectaculares auroras. Hasta nuestro lenguaje común está salpicado de magnetismo con frases como "los polos opuestos se atraen y los similares se repelen", por relación directa a lo que ocurre entre dos imanes. Como somos capaces de conocer los efectos del magnetismo, nos resulta fácil entender que los físicos midan dicho campo magnético.

Sin embargo, cuando pensamos en el Sol o en otro objeto astrofísico, la pregunta deviene más compleja. ¿Tiene efectos observables el campo magnético como para que los astrofísicos sean capaces de determinarlo?. La respuesta es, obviamente, afirmativa; pero, como también debe resultar evidente, no se puede recurrir ni a brújulas ni a imanes, ni a instrumentos más sofisticados conocidos como magnetómetros, porque simplemente es imposible acercarse al objeto de medida. Resulta preciso, pues, descubrir la huella que deja el campo magnético solar en lo que casi únicamente saben medir los astrónomos: la luz proveniente de los objetos celestes. En el caso del Sol, esa huella queda "impresa" en las líneas espectrales, esas marcas que distinguimos en el espectro y que nos indican la evidencia y el estado físico de los diferentes átomos presente en la atmósfera solar. En el rango de longitudes de onda visibles, las líneas espectrales del Sol y estrellas de su tipo son funda-

mentalmente en absorción (ver gráfico pág. 6), es decir, muestran un déficit de radiación como consecuencia de la absorción de la misma por un átomo: uno de sus electrones cambia de nivel energético tras absorber un cuanto de luz o fotón, de una longitud de onda (o energía) bien precisa y no otra.

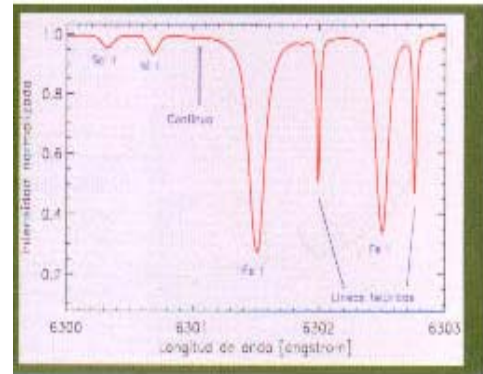
Pues bien, cuando ese proceso de absorción se produce en presencia de un campo magnético, las circunstancias cambian y las consecuencias también.

Esas consecuencias se manifiestan mediante dos efectos fundamentales: el efecto Zeeman y el efecto Hanle, llamados así en honor a sus descubridores respectivos en el laboratorio. Con mucho, el primero ha sido y es la principal fuente de información sobre campos magnéticos en la fotosfera; el segundo, por su parte, está increpando su importancia a medida que, en los últimos diez años, vamos conociendo más y con mayor sensibilidad el espectro del limbo solar y el de líneas cromosféricas y coronales. A pe-



<- La acción combinada de la convección-"ebullición" del gas -y la rotación diferencial - más rápida en el ecuador que en los polos-genera el campo magnético (líneas rojas).

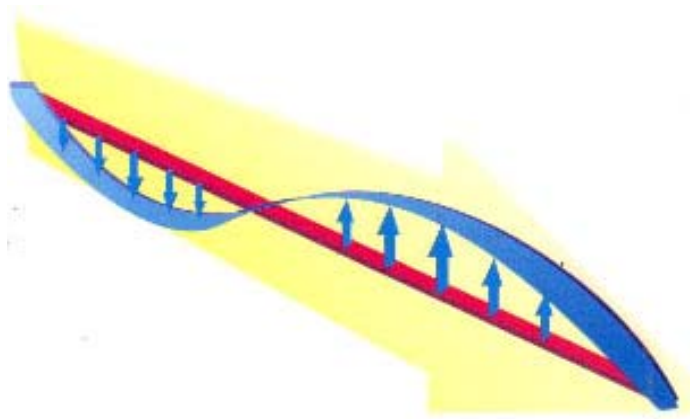
-> Porción del espectro del Sol en calma (en ausencia de campo magnético intenso). Se ven dos líneas de absorción del hierro neutro (las más anchas) acompañadas por otras dos telúricas (más estrechas y formadas en la atmósfera de la Tierra)



sar de ser distintos, ambos efectos tienen que ver con modificaciones de lo que conocemos como estado de polarización de la luz. Ésta, como cualquier onda electromagnética, viene definida por dos campos vectoriales, uno eléctrico y otro magnético, que oscilan en el espacio y con el tiempo. Como conocido el uno, tenemos unívocamente determinado el otro, nos basta con considerar uno de dichos campos; tradicionalmente nos quedamos con el eléctrico. La mejor represen-

tación gráfica que podemos tener del vector campo eléctrico es la de una flecha que oscila en amplitud o dirección; la propagación de esas flechas oscilantes es nuestro modelo de luz (imagen inferior). Cuando las oscilaciones se producen en un plano único o cuando el cambio de plano de oscilación se produce de ciertas maneras bien organizadas, decimos que la luz está totalmente polarizada. Este es el caso de la luz monocromática (de una sola longitud de onda o color). Sin em-

argo, la luz que percibimos más frecuentemente, incluida la que recibimos de los astros, además de ser policromática, presenta con igual probabilidad componentes que oscilan en todos los planos posibles. En tal caso decimos que la luz es natural o totalmente no polarizada. Entre ambos casos extremos, como el lector habrá intuido rápidamente, existe toda la gama de estados en los que decimos que la luz está parcialmente polarizada. Así pues, a modo de resumen, cuando hablamos de



Modelo geométrico de la radiación electromagnética, la luz. Las flechas azules representan la amplitud del campo eléctrico que se propaga oscilante en la dirección de la flecha amarilla. En el caso de la figura la luz está totalmente polarizada puesto que la oscilación del campo eléctrico tiene lugar en un único plano

polarización de la luz nos referimos a una dirección o forma preferente de oscilación, la cual sólo se mantiene si la luz es estrictamente monocromática o si existe algún mecanismo físico para que predomine tal estado de oscilación. Justamente, el mecanismo físico que nos ocupa en este artículo, el campo

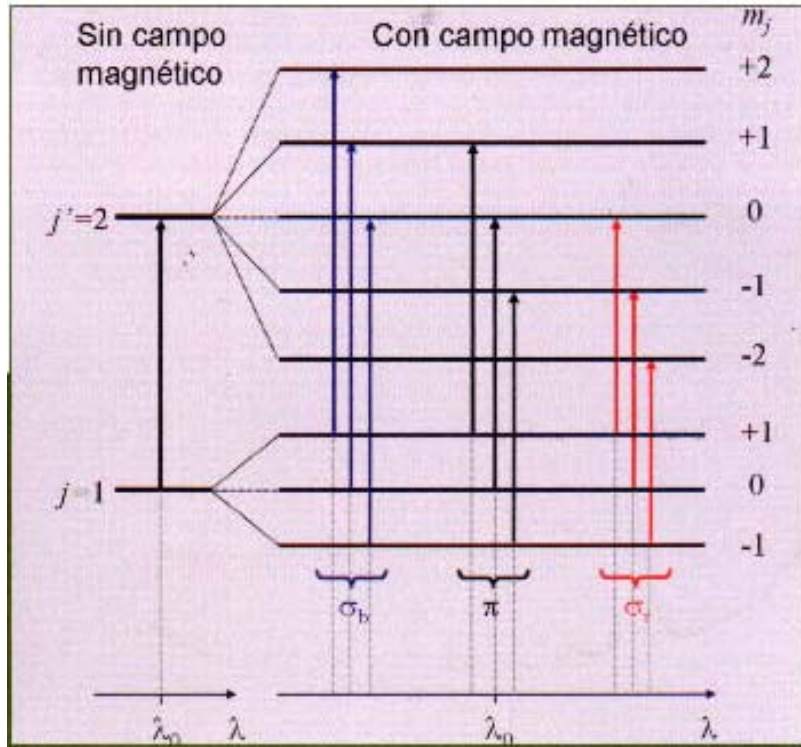
magnético, es el responsable de incrementar la polarización parcial de la luz en el caso Efecto Zeeman y de modificarla en el caso del efecto Hanle.

Efecto Zeeman

En presencia de un campo magnético, los niveles energéticos del átomo se desdoblan en

subniveles y las posibilidades de salto electrónico por absorción de fotones se multiplican (imagen inferior): donde había una sola línea espectral, ahora pueden haber varias que están separadas en longitud de onda, con una separación que es proporcional al campo magnético. Pero además de estar sepa-

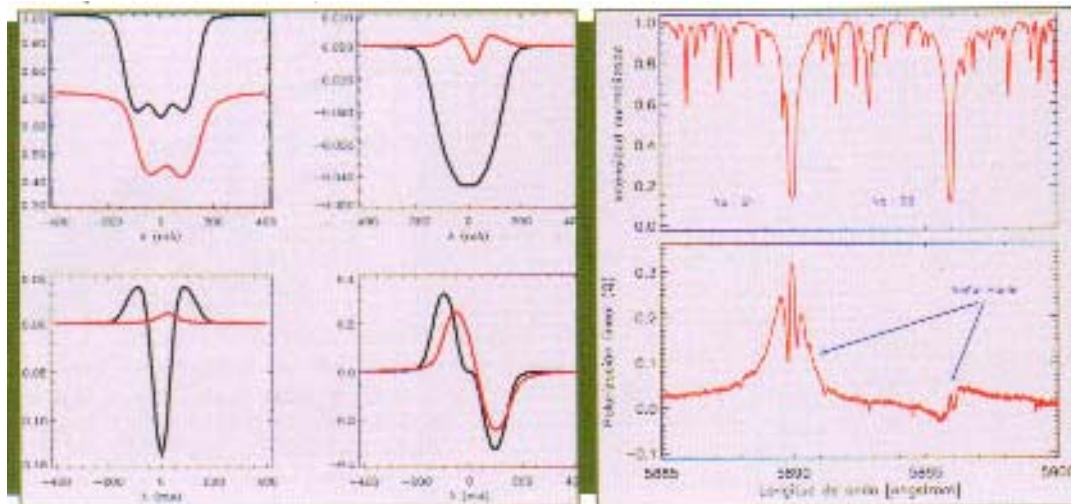
Esquema de generación de una línea de absorción en ausencia (izquierda) y en presencia de campo magnético. Las líneas horizontales gruesas representan los niveles atómicos de energía entre los que se producen saltos electrónicos representados por las flechas. Cuando no existe campo magnético, el electrón solo tiene una posibilidad de salto y ello se traduce en una única línea espectral de la longitud de onda λ_0 . El campo magnético desdobla los niveles en subniveles y, ahora, los electrones tienen más posibilidades de salto lo cual conduce a que produzcan más líneas espectrales (componentes) separadas en longitud de onda y con un estado de polarización bien definido.



radas en longitudes de onda, cada una de las nuevas componentes tiene un estado de polarización bien definido. Gracias al desdoblamiento y a la polarización somos capaces de medir el campo magnético y otras magnitudes importantes que definen el estado físico de la

atmósfera solar. En la imagen inferior derecha tenemos una simulación de los parámetros de Stokes correspondientes a una línea espectral en dos condiciones atmosféricas distintas. El distinto aspecto de los perfiles que se representan en ambos casos ya es una identificación de

la diferencia. De izquierda a derecha y de arriba abajo tenemos por orden, I, la intensidad total de la luz, Q y U, que nos hablan de la polarización lineal, y V, que da cuenta del grado de polarización circular. Sin entrar en detalles sobre esos dos nuevos términos



El estado de polarización de una línea espectral ficticia se mide con los cuatro parámetros de Stokes, I, Q, U y V. Los perfiles negros y rojos simulan dos atmósferas solares diferentes: una más caliente y con un campo magnético más intenso e inclinado (la negra) que la otra (la roja).

Porción del espectro del Sol cercano al limbo que incluye las dos líneas D del sodio. El perfil de polarización lineal Q, sólo se puede interpretar en términos del efecto Hanle y del campo magnético subyacente.

que, a fin de cuentas, reflejan distintos "modos de oscilación" de nuestra radiación electromagnética, puedo afirmar que cualquier físico solar mínimamente avezado en estos asuntos podría decir con un simple vistazo de la figura que los perfiles negros corresponden a una zona del Sol más caliente, porque I es mayor, y con un campo magnético más intenso, porque V es mayor, y más inclinado con respecto a la vertical, porque Q y U son mayores que en el caso de los perfiles rojos. Esta interpretación cualitativa se basa en que el campo magnético es suficientemente intenso en esas simulaciones para que lo que distinguamos sea el efecto Zeeman.

Efecto Hanle

La dispersión de la luz por pequeñas partículas materiales también polariza la luz. Si nos

imaginamos un fotón que emerge vertical de la superficie del Sol y es desviado a 90° por una partícula de las capas altas de la atmósfera hacia el observador, la luz, que inicialmente era natural, deviene linealmente polarizada. Ese proceso ocurre de forma natural en las proximidades del limbo solar. Pero si ese proceso de dispersión se produce en presencia de un pequeño campo magnético orientado en la dirección hacia o desde el observador, el resultado es que el grado de polarización de la luz desviada disminuye y, además, el plano de polarización rota. Este es uno de los casos del mencionado efecto Hanle. Si el proceso de dispersión de luz en cambio se realiza a 0° , es decir, si la luz dispersada continúa en la misma dirección en que incidió en la partícula, la luz es natural. Sin embargo, un campo magnético

perpendicular a la dirección de propagación produce en este caso una polarización lineal neta de la luz dispersada. En resumen, el efecto Hanle puede modificar (disminuir o aumentar) el grado de polarización de la luz y con estas modificaciones, medibles, somos capaces de inferir los valores del campo magnético. Quizá el ejemplo más característico del efecto Hanle lo tenemos en la imagen anterior izquierda, donde se muestran las dos componentes del doblete D del sodio. Las características de los perfiles de polarización lineal sólo pueden explicarse con un nuevo mecanismo intrínseco al efecto Hanle.

En definitiva, la respuesta a la pregunta del título puede ser bastante sencilla si la resumimos: somos capaces de medir el campo magnético interpretando las señales de polarización en las líneas espectrales.

El IAA es uno de los cuatro institutos españoles* implicados en el diseño, desarrollo y construcción del magnetógrafo solar IMAx (siglas inglesas de Imaging Magnetograph eXperiment: magnetógrafo experimental con imagen). Éste es uno de los tres Instrumentos posfocales del telescopio de un metro embarcado en el globo estratosférico ártico Sunrise, una colaboración entre la agencia espacial alemana, DLR, la estadounidense NASA y el Programa Nacional de Espacio, español. Como su propio nombre indica IMAx pretende producir mapas del campo magnético de regiones extensas de la superficie solar. Ello será posible, como podrán comprender los lectores del artículo, porque el



*Los otros son el Instituto de Astrofísica de Canarias, el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial y el Grupo de Astronomía y Ciencias del Espacio de la Universidad de Valencia

instrumento medirá la polarización de la luz en líneas espectrales. El análisis de polarización lo hace con unos dispositivos denominados RO-CLI (retardadores ópticos de cristal líquido) que se encuentran a la entrada del instrumento (parte inferior izquierda en color rosa fucsia) y el análisis espectral lo lleva a cabo con un interferómetro Fabry-Perot (parte superior izquierda en color rojo). Tras un doble paso por este último, la luz se dirige hacia las cámaras (hacia el centro de la imagen en color amarillo) tras ser desdobladas por un divisor del haz polarizante (en color verde). La caja superior corresponde a la electrónica de proximidad.

Este artículo se publica en el número 21, febrero 2007, de la revista Información y Actualidad Astronómica, del Instituto de Astrofísica de Andalucía-CSIC, pp 5-8.