

Enseñanza

ENSEÑANZA Y DIVULGACIÓN DE LAS CIENCIAS

AURORA BOREAL. UN ESPECTÁCULO VISUAL DE LUZ Y MATERIA

A finales de diciembre de 2013 se celebró en Enontekiö (Finlandia) el Curso-Taller de Astronomía "Sun and Auroras Borealis in Teaching Astronomy", un evento internacional organizado conjuntamente por la EAAE (European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere) y la IAU (International Astronomical Union) y presidido por la Dra. Rosa M. Ros, profesora de la Universidad Politécnica de Cataluña, bien conocida en la Facultad de Ciencias de la UNED por sus pasadas colaboraciones con nuestro Grupo de Astronomía (ver, por ejemplo, Rosa M. Ros, "El Tránsito de Venus para determinar la distancia Tierra-Sol", 100cias@uned, nº 7, págs. 87-98, 2004).

El municipio de Enontekiö está situado en el noroeste de Finlandia, en plena región de Laponia, y es uno de esos privilegiados lugares desde los que puede contemplarse con frecuencia el que probablemente es el espectáculo visual

natural más hermoso y cautivador que puede observarse en nuestra atmósfera terrestre: la *aurora boreal*.

Durante los tres días de celebración del curso el cielo permaneció cubierto de nubes. Si bien ello impidió, afortunadamente, que las temperaturas descendiesen a los valores propios de la época (entre -10°C y -30°C), desafortunadamente también impidió la observación de auroras boreales, que era uno de los objetivos destacados y más esperados del curso. Para mí, éste no fue más que el primer intento; mientras llega el segundo, sirva este artículo para expresar mi admiración por este maravilloso espectáculo visual de luz y materia.

EL ENCANTO DEL FENÓMENO AURORAL

Las auroras son fenómenos luminosos que se observan en el cielo, fundamentalmente en las regiones polares del planeta, aunque también pueden darse en latitudes más bajas, incluso hasta en el ecuador, aunque esto ocurre muy raras veces. En el hemisferio norte reciben el nombre de *auroras boreales*, mientras que en el hemisferio sur se denominan *auroras australes*.



Figura 1: Fotografía de una espectacular aurora boreal y su reflejo sobre la superficie de un lago.

(Autor: Raymond Hoffmann. Aurora Borealis / Skaftafell National Park Island)

Las auroras aparecen de muy diferentes formas y evolucionan, a veces rápidamente, cambiando su aspecto, intensidad y coloración. La aurora suele aparecer en el horizonte como un arco de contornos indefinidos de tonos verdes y amarillos; también puede darse la combinación de tonos rojos y verdes, aunque es menos frecuente. En ocasiones el cielo se cubre de ondeantes bandas luminosas que adoptan formas de cintas, espirales, velos,... que pueden acabar ascendiendo por el firmamento como una lluvia de luz que forma finalmente una extraordinaria corona auroral, donde los rayos parecen salir de un solo punto [1].

La majestuosidad, belleza y escala de las auroras boreales han provocado siempre en el hombre gran fascinación, curiosidad, emoción, a veces temor y, por qué no decirlo, hasta un cierto embrujo. Prueba de ello son los diferentes mitos, creencias, testimonios e intentos de explicación científica que se encuentran a lo largo de la historia [1-4].



Figura 2: Pinturas rupestres del hombre de Cromagnon (Fuente: NASA - The History of Auroras - http://www.nasa.gov/mission_pages/themis/auroras/aurora_history.html#.VCJxoBbSnIK).

MITOS Y LEYENDAS, CREENCIAS FOLKLÓRICAS, TEORÍAS CIENTÍFICAS,...

Se cree que en algunas pinturas rupestres del hombre de Cromagnon (30.000 a.C.) ya aparecen representaciones de la aurora boreal, lo que supondría el primer testimonio sobre este fenómeno en la historia de la humanidad.

En China se conocen algunas referencias sobre la aurora boreal de gran antigüedad, pero destaca un índice que aparece a partir del año 687 a.C. en el que se recogen las observaciones de este fenómeno (se registra un promedio de una manifestación auroral cada 40 años).

También se cree que en el Antiguo Testamento algunas descripciones podrían referirse a la aurora boreal.

En la antigua Grecia el fenómeno auroral posiblemente se observaba de una a tres veces por década. Se conocen algunas descripciones (Anaxímenes, Xenófanes, Anaxágoras o Plutarco) e intentos de explicación del fenómeno (Hipócrates, Esquilo, Aristóteles), que no pasó desapercibido para los pensadores de la época. Según Aristóteles, el Sol hacía que emanara vapor de la Tierra, que al entrar en contacto con ciertos elementos presentes en el viento producía una deflagración que originaba las auroras boreales. Curiosamente, no volverán a darse intentos de explicación del origen de las auroras hasta 2000 años después.

También en la antigua Roma surgen algunas descripciones de auroras boreales, como la realizada por Séneca a partir de los trabajos de Aristóteles. Sin embargo, en este período las auroras son con frecuencia asociadas a anunciaciones de acontecimientos, como la muerte de Julio César en el año 44 a.C. ... El historiador Plinio el Viejo enumera hasta doce tipos de fenómenos luminosos diferentes que denomina "cometas", lo que ayuda más a la confusión que a la explicación del fenómeno.

Del oscuro período de la Edad Media, las escasas referencias encontradas sobre la aurora boreal son de carácter supersticioso (augurios de guerras y muertes).

Con algunos testimonios manuscritos procedentes de Inglaterra, Escocia y el pueblo vikingo concluyen los escasos registros sobre la aurora boreal anteriores a la aparición de la imprenta (mediados del siglo XV).

La última mitad del siglo XV y la primera mitad del siglo XVI fueron periodos de baja actividad solar y auroral (período conocido como *mínimo de Spörer*).

A partir del siglo XVII el fenómeno auroral despierta un gran interés en el sur de Europa. El nombre científico más utilizado entonces es el de *Aurora Borealis*, "amanecer boreal" (en la mitología clásica, *Aurora* era la diosa romana del alba y *Bóreas* era el dios griego del frío viento del norte; la palabra latina *borealis* significa norte). El nombre ya es usado por Galileo en 1619 y 1622 en sus descripciones de las auroras, aunque también se atribuye al matemático francés P. Gassendi, que lo emplea en 1649 en su libro "Physics".

Tras otro periodo de actividad solar y auroral inusualmente bajas comprendido entre 1645 y 1715 (conocido como *mínimo de Maunder*), el 16 de marzo de 1716 se produce en Londres una espectacular aurora boreal, que

es observada por E. Halley (el científico inglés que predijo la aparición del cometa que lleva su nombre), quien da la primera explicación científica del fenómeno relacionando los rayos aurales con partículas sometidas a la atracción del campo magnético terrestre.



Figura 3: Portada de un tratado publicado en España en 1605 en el que se interpreta la aurora como un milagro. En su título se lee: "Pronóstico de las grandes señales que aparecieron en el cielo el jueves a las 6 pm, el día de los mártires gloriosos Cisclo y Victoria, patronos de Córdoba, el 17 de noviembre del año 1605. Compuesto por el Doctor Reyes de Castro Medico". (<https://openlibrary.org/works/OL10332383W/Pronosticacion>).

En 1741, el científico sueco A. Celsius, conocido por su escala de temperatura, y su cuñado y colega O.P. Hiorter relacionan la aurora boreal con la actividad geomagnética (observando simultáneamente las perturbaciones de una aguja magnética y una aurora). Y en 1790, el científico inglés H. Cavendish precisa con gran exactitud la altura a la que se produce la aurora boreal.

En el siglo XIX todavía permanece la duda sobre si la aurora es luz reflejada o dispersada del Sol o la Luna. En 1817, el físico francés J.B. Biot estudia la luz de la aurora con un polarímetro y no encuentra trazas de polarización, concluyendo que el fenómeno no puede tratarse de una reflexión o una refracción (en contraste con los fenómenos del arco iris o las glorias). Aprovechando entonces el gran avance de la espectroscopía, se busca dar una expli-

cación a la emisión de luz del fenómeno auroral. En 1866-67, el astrónomo y físico sueco A.J. Ångström afirma que se trata de una luz producida al inflamarse un gas (no es producida por un líquido ni por un sólido y tampoco por reflexión) [5, 6].



Figura 4: Ilustración de una aurora boreal extraída de un libro de 1869 titulado "The World at Home, or Pictures and Scenes from Far-Off Lands" (Fuente: <https://archive.org/details/worldathomeorpi00kirbgoog>). Se trata de una aurora vista el 6 de enero de 1861 por I.I. Hayes desde el observatorio de Port Foulke, Groenlandia ("The Open Polar Sea", New York 1867 - <http://www.biodiversitylibrary.org/item/22506#page/9/mode/1up>).

A partir del año 1882, con motivo de la fundación del Primer Año Polar Internacional (1881-1884), se inician estudios científicos sistemáticos del fenómeno que conducen a descripciones bastante exactas del comportamiento de la aurora por parte, sobre todo, de científicos noruegos, suecos y finlandeses. Antes del Año Polar, en 1859, el científico danés S. Tromholt y otros colegas muestran con sus estudios la relación entre los periodos de actividad de las manchas solares y la aurora boreal. En 1886, el científico noruego K. Birkeland plantea la existencia de un sistema de corrientes eléctricas que fluyen por las líneas del campo magnético terrestre cubriendo el espacio próximo del planeta (corrientes de Birkeland) y, a principios del siglo XX, el científico C. Störmer, también noruego, calcula sus órbitas [7]. Igualmente, durante la primera mitad del siglo XX, el físico noruego L. Vegard descubre que no sólo penetran electrones en la atmósfera, también encuentra trazas de protones.

Finalmente, el inicio de la era de los satélites artificiales permite desvelar conocimientos básicos sobre nues-

tro planeta y confirmar las teorías correctas sobre el fenómeno auroral. Así, pues, sólo a partir de 1957, año en que se puso en órbita el primer satélite artificial (y también Año Geofísico Internacional), los secretos del maravilloso "amanecer boreal" comenzaron a quedar desvelados.

Paralelamente y en contraste con el avance científico en el conocimiento de las auroras resumido en los últimos párrafos (avance, como se ha visto, bastante tardío) se han dado todo tipo de teorías y creencias. Las más pintorescas son las creencias de los pueblos indígenas (escandinavos, esquimales, indios americanos, tribus de Siberia,...). Con frecuencia, el origen de las auroras boreales ha sido explicado a partir de diferentes tipos de reflexión de la luz, como reflexiones producidas en copos de nieve, en icebergs, en el lomo de los arenques (presagio de buena pesca),... Los presagios de sucesos, tanto buenos como malos, asociados a las auroras boreales, las explicaciones relacionadas con el mundo espiritual y las leyendas en torno a este fascinante e impredecible fenómeno son muy comunes entre los pueblos indígenas. Por citar sólo un ejemplo (y por ser Finlandia el destino del viaje que motivó este artículo), el término finés *revontulet* con el que se designa a las auroras boreales hace referencia al "zorro ártico de fuego" que, según la leyenda finlandesa, corre por todo el norte y al rozar las montañas con su cola hace saltar una lluvia de chispas que asciende hacia el cielo, la aurora boreal

TEORÍA ACTUAL SOBRE LA AURORA

Básicamente, las auroras se producen cuando una lluvia de partículas cargadas eléctricamente procedentes del Sol (electrones principalmente y también protones) interacciona con el campo magnético terrestre y acaba precipitándose sobre la atmósfera, excitando los átomos y moléculas presentes en la misma (fundamentalmente oxígeno y nitrógeno). La desexcitación de dichos átomos/moléculas da lugar a la emisión de luz que caracteriza a este fenómeno.

Como consecuencia de las reacciones nucleares que se producen en el interior del Sol, éste emite continuamente radiación electromagnética y partículas en todas las direcciones del espacio. El flujo de partículas da lugar al denominado viento solar, cuya velocidad es de 300 – 800 km/s. La interacción del *viento solar* con el campo magnético terrestre hace que éste adopte una forma similar a la de un cometa, que recibe el nombre de *magnetosfera* (ver figura 5).

La magnetosfera actúa, a su vez, como una especie de escudo protector, donde las partículas cargadas eléctricamente son frenadas o desviadas por la fuerza de Lorentz, evitando así su impacto directo en la atmósfera y la superficie terrestres. Las partículas cargadas de altas energías son desviadas a través de una región de la magnetosfera conocida como *cinturón de radiación de Van Allen*. Muchas partículas son temporalmente retenidas en la zona

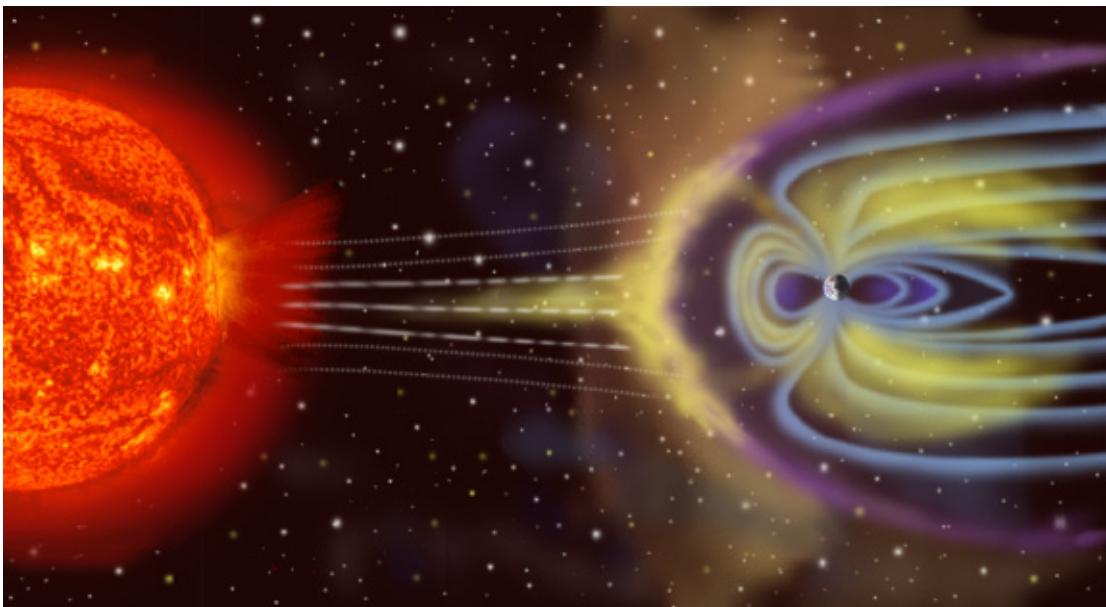


Figura 5: Ilustración de la acción del viento solar sobre la magnetosfera terrestre.
(Fuente: NASA - <http://sec.gsfc.nasa.gov/popscise.jpg>)

ecuatorial y más tarde conducidas paralelamente a las líneas del campo magnético hacia la atmósfera.

Por su parte, la atmósfera terrestre presenta cambios en sus propiedades según la altitud. Por ejemplo, a partir de una altitud de 100 km la disminución de su densidad y presión hace que los diferentes gases, por simple gravitación, comiencen a separarse, ascendiendo hasta capas más altas los más ligeros (como el hidrógeno). Debido a la ionización que la luz del Sol (la radiación electromagnética) produce en los átomos y las moléculas presentes, desde una altitud de 70 km el aire es un plasma conductor de electricidad; esta capa recibe el nombre de *ionosfera*. Tanto la lejana magnetosfera, por su propia naturaleza electromagnética, como el viento de la atmósfera neutral pueden producir flujos eléctricos en esta capa. Estos flujos eléctricos también se ven influenciados por la acción del viento solar (por su acción directa sobre la magnetosfera, por el movimiento de las partículas cargadas en el interior de la misma e incluso por la ionización que también producen dichas partículas al precipitarse hacia la atmósfera). Como resultado de toda esta interacción electromagnética se produce el movimiento de las auroras.

Cuando las partículas cargadas conducidas a lo largo de las líneas del campo magnético terrestre se precipitan en la atmósfera, van colisionando con átomos y moléculas

en su trayectoria hasta perder toda su energía. En el proceso, los átomos/moléculas pueden sufrir excitaciones, ionizaciones, disociaciones,... , lo que da lugar tanto a la emisión de luz como a cambios en la conductividad y composición de la atmósfera. Las colisiones se inician a una altura de unos 1000 km y finalizan a una altura de 90 km, donde la atmósfera resulta ya demasiado densa. Dentro de estos límites, las auroras se producen entre los 100 y 200 kilómetros de altura (la luz más brillante se produce a unos 110 km de altura).

Cuando la lluvia de partículas procedentes del Sol es suficientemente intensa (su velocidad e intensidad depende de la actividad solar) puede apreciarse visualmente la luz de las auroras. La más frecuente, intensa y mejor apreciada por el ojo humano es de color amarillo verdoso (557,7 nm) y corresponde a una emisión del oxígeno atómico, que también produce un rojo intenso (630,0 nm) en las mayores alturas de la aurora (ver figura 6). El nitrógeno molecular produce un color rojo carmesí (661,1-686,1 nm) en la parte inferior de la aurora y también es el responsable de dos emisiones que son detectadas con la instrumentación adecuada, un color azul (427,8 nm) y un color violeta (391,4 nm). Además de éstas, también pueden medirse otras muchas líneas y bandas espectrales, más débiles.



Figura 6: Imagen de una aurora boreal de colores rojos y verdes (Fuente: Wikipedia - http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Red_and_green_auroras.jpg; Autor: Arctic light Frank Olsen, Norway; Licencia CC BY-SA 3.0 - <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)

Puesto que las partículas del viento solar son las que originan las auroras, la frecuencia e intensidad de estas últimas están estrechamente ligadas a la actividad solar. El campo magnético del Sol se genera debajo de su atmósfera y, debido a la rotación diferencial de la estrella (las regiones ecuatoriales rotan más deprisa que las zonas polares), sufre una distorsión gradual y periódica que le lleva a la inversión de sus polos cada aproximadamente once años. En esta transformación entre dos orientaciones opuestas del campo magnético (campo débil y de tipo poloidal), se pasa por un estado de máxima perturbación (campo fuerte y de tipo toroidal), en el que las líneas se retuercen y tienden a formar lazos y tubos magnéticos que pueden escapar al exterior de la superficie solar, produciendo en ella las características manchas solares (en estos efectos, además de la rotación diferencial también intervienen los movimientos convectivos y turbulencias del plasma solar bajo su superficie). En esta etapa se pueden llegar a producir tormentas solares explosivas (cortocircuitos de los lazos magnéticos que asoman al exterior), que originan eyecciones de masa coronal que pueden viajar hacia la Tierra a velocidades de más de 3 millones de kilómetros por hora (en [8] puede verse una interesante animación del fenómeno). Cuando estas ondas de choque de plasma solar alcanzan la magnetosfera terrestre provocan las denominadas tormentas geomagnéticas, cuya consecuencia más inmediata es la producción de subtormentas aurorales, colosales auroras activas, de gran intensidad y rápidos movimientos, debidos a las fuertes corrientes eléctricas producidas en la magnetosfera y en la ionosfera. En definitiva, la actividad auroral presenta mínimos periódicos que coinciden con los mínimos de actividad solar (campo magnético poloidal débil), mientras que estadísticamente la máxima activi-

dad auroral suele darse uno o dos años después del máximo solar. Por otro lado, debido a la propia rotación del Sol, también se observa un ciclo de aparición de la aurora ligeramente inferior a un mes (el período sinódico medio del Sol es de unos 27 días).

Las formas de las auroras también varían dentro del período de actividad solar. La aurora puede presentarse en forma difusa, forma radial o en forma de banda (ver figura 7); incluso pueden darse combinaciones de éstas de manera simultánea.

Una *forma difusa* puede ser un simple *resplandor* o brillo en el horizonte, sin bordes nítidos. O también una *mancha* auroral con forma de nube y débil luz.

Las *bandas* presentan un borde inferior continuo y extenso, que puede ser difuso o nítido, y una parte superior a modo de degradado ascendente de luz, que puede ser *homogéneo* o *rayado*. A su vez, la banda puede presentar forma de *arco*, en general estático y poco brillante, o una forma irregular, como una cinta o velo ondeante, que se origina a partir de un arco y es activa. En ocasiones se observan simples *rayos aurorales*, en mayor o menor cantidad, como si se tratase del inicio de formación de un arco rayado o de una banda rayada. Los rayos aurorales son haces paralelos a las líneas del campo magnético terrestre.

La forma radial o *corona de rayos* es la más espectacular de todas y ocurre con auroras activas cuando se encuentran en el cenit.

Finalmente, con relación a la localización y extensión de las auroras, éstas forman un anillo u *óvalo auroral* en cada hemisferio terrestre, a una altitud de entre los 100 y los 200-300 km y centrado en ambos casos en torno a los polos magnéticos de la Tierra (ver figura 8). Cada uno de

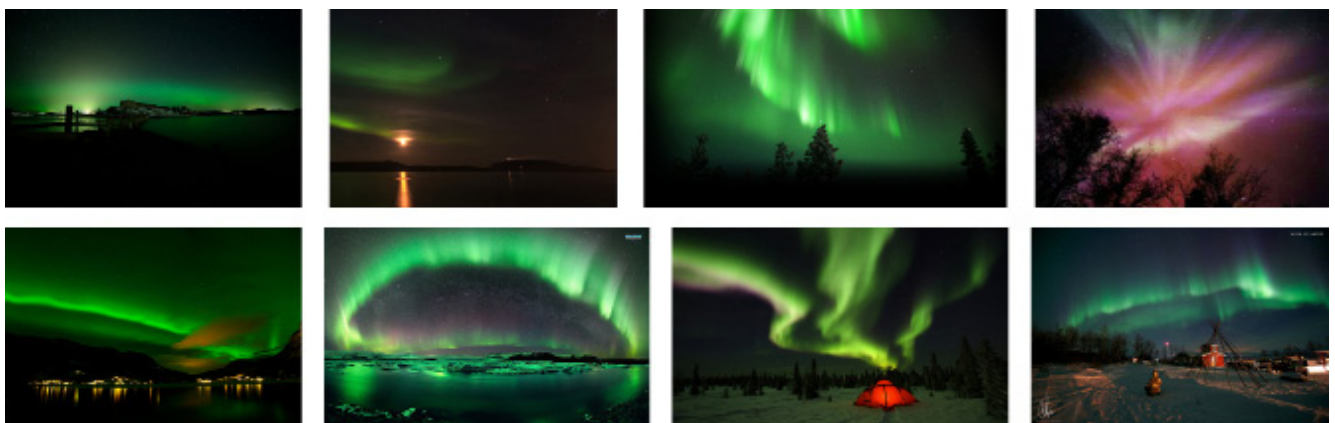


Figura 7: Ejemplos de formas aurorales. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: resplandor, mancha auroral, rayos, corona de rayos, arco homogéneo, arco rayado, banda homogénea y banda rayada.

estos óvalos suele situarse sobre una región anular de la superficie terrestre comprendida entre los 2000 y los 3000 kilómetros de distancia desde los respectivos polos magnéticos; es la denominada *zona auroral*. Los óvalos aurales permanecen en posición fija respecto al Sol, mientras la Tierra gira bajo ellos; lo que se observa desde un punto concreto de la Tierra es sólo una porción del óvalo. Cuando se producen tormentas solares, los óvalos aurales pueden aumentar considerablemente su tamaño, llegando a ocupar latitudes más bajas.

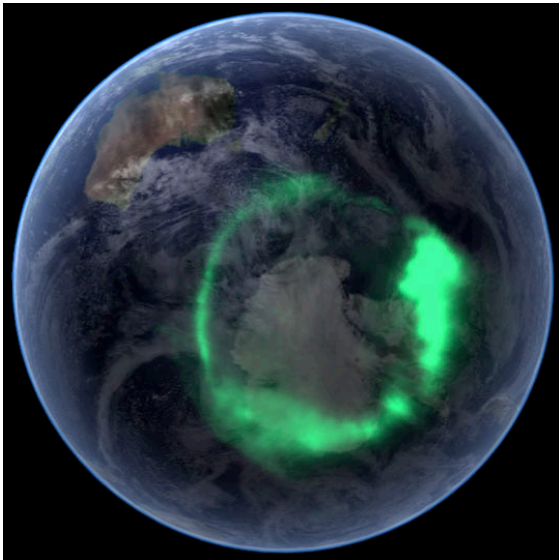


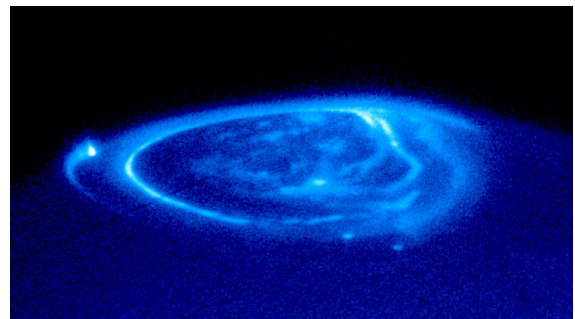
Figura 8: Imagen del óvalo auroral sobre la Antártida (Fuente: NASA - IMAGE Spacecraft Pictures Aurora: Image of the Day - <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=6226>).

El fenómeno auroral también se produce en otros planetas del Sistema Solar, como en Júpiter, Saturno y Urano, como prueban las fotografías tomadas por sondas y satélites artificiales (ver figura 9); estos planetas poseen fuertes campos magnéticos globales, como la Tierra. Sin embargo, también se han observado posibles auroras en Marte, que no posee un campo magnético global; en este caso, se cree que las auroras están asociadas a zonas de fuertes campos magnéticos en la corteza.

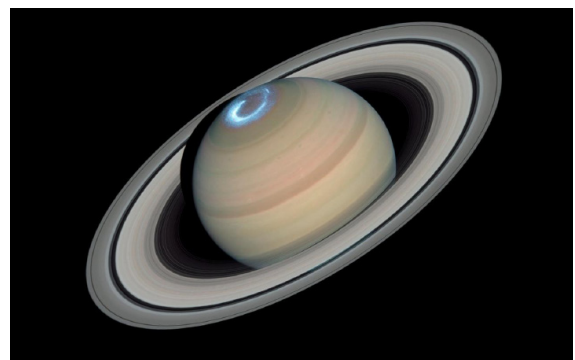
LA OBSERVACIÓN DE AURORAS BOREALES

Para observar auroras en nuestro planeta, ya sea en el hemisferio norte o en el hemisferio sur, se debe viajar a la zona auroral correspondiente. En el caso del hemisferio norte, el anillo de la zona auroral se extiende por Groenlandia, el norte de Canadá, Alaska, Siberia y el norte de Escandinavia; en el hemisferio sur la zona auroral circunda la Antártida (figura 8). Por dar una idea orientativa, la

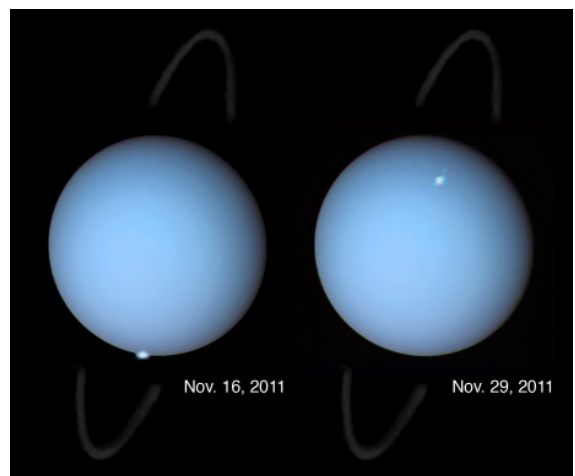
aurora boreal puede apreciarse en un año del orden de 200 noches en latitudes más al norte de Finlandia, unas 100 noches en el sur de Laponia y unas 20 noches en Helsinki, al sur de Finlandia.



(a)



(b)



(c)

Figura 9: (a) Imagen de una aurora observada en el UV en Júpiter (Fuente: John T. Clarke (University of Michigan), ESA, NASA - <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2000/38/image/a/>, <http://apod.nasa.gov/apod/ap001219.html>); (b) Imagen de una aurora en Saturno (Fuente: NASA, ESA, J. Clarke (Boston University, USA), and Z. Levay (STScI) - http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2005/02/Saturn_s_dynamic_aurorae/); (c) Auroras sobre la atmósfera de Urano (Fuente: NASA, ESA, and L. Lamy (Observatory of Paris, CNRS, CNES) - http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/uranus-aurora.html).

La claridad de las noches de los veranos polares no permite la observación de auroras, por lo que esta estación debe descartarse. En Finlandia, por ejemplo, la época en la que se puede observar la aurora boreal es la comprendida entre los meses de agosto y abril, aumentando las posibilidades de presenciarla entre enero y finales de abril. El fenómeno auroral es impredecible, pero ayuda bastante el conocimiento del estado de la actividad solar o la previsión de tormentas solares. Por el contrario, unas malas condiciones meteorológicas pueden echar por tierra cualquier intento de observación de auroras. Prever una estancia de 3 a 5 días en el lugar elegido puede ser suficiente para tener éxito. El sitio ideal para pararse a disfrutar del espectáculo auroral es la cima de una montaña o la superficie helada de un lago, siempre alejados de núcleos urbanos; los horizontes libres, la mayor oscuridad posible y un cielo limpio y despejado son las mejores condiciones.

Para fotografiar auroras es preciso equiparse con el material adecuado, tanto fotográfico como en lo relativo a vestimenta contra el frío. De poco o nada sirven las cámaras compactas, que no disponen de modo manual para los ajustes de disparo. Por la enorme escala de las auroras es recomendable utilizar una cámara réflex con un objetivo de tipo gran angular (incluso de tipo "ojo de pez"), capaz de enfocar manualmente en el infinito; el trípode (con zapatas para la nieve si es necesario) y baterías de recambio (por su bajo rendimiento a bajas temperaturas) son imprescindibles. También lo es una bolsa de plástico con cierre hermético, para introducir en ella la cámara antes de pasar al interior de cualquier refugio (habitáculo, casa...); de no hacerlo, la condensación y congelación de la humedad ambiental interior al entrar en contacto con el frío aparato podría dañar gravemente su electrónica.

Algunas recomendaciones generales acerca de la configuración de disparo con la cámara son las siguientes: emplear preferiblemente el formato RAW para las fotos (o RAW y JPG simultáneamente); no usar flash; ajustar manualmente la exposición (entre 5 y 15 segundos), la apertura (la máxima posible, esto es, el número f lo más bajo posible; $f:2$ mejor que $f:2.8$) y la sensibilidad (ISO entre 400 y 800, o mayor); reducir el zoom al máximo (menor distancia focal y mayor ángulo de visión); enfocar manualmente en el infinito (aquí ayuda bastante emplear el modo Live View, ampliando mucho la imagen en la pantalla de la cámara, para poder apreciar cuándo se consigue un buen enfoque) y emplear el disparador automá-

tico temporizado a 2 segundos (de esta manera se evitan las vibraciones debidas tanto a la manipulación de la cámara como a la elevación de su espejo, que así se producirá 2 s antes de iniciarse la exposición). Un buen entrenamiento previo con la cámara en condiciones de oscuridad es altamente recomendable. La paciencia y un buen número de disparos cuando la aurora aparezca harán el resto hasta conseguir alguna hermosa fotografía auroral. Si no se consigue... mejor olvidarse de la cámara y disfrutar de la contemplación de ese maravilloso espectáculo que nos regala la Naturaleza: el majestuoso baile de las "luces del Norte".

BIBLIOGRAFÍA

1. M. Rikkonen, E. Turunen y J. Manninen, *La aurora boreal*, Sulkava (Finlandia): Ed. Tammi, 2003. ISBN 951-31-2737-0.
2. B. Laiz Castro, *Comprender la Aurora. Aurora Boreal. Las maravillosas Luces del Norte* ("Northern lights"), Madrid: Ed. Universidad Autónoma de Madrid, 1989. ISBN: 84-7477-235-4.
3. R.H. Eather, *Majestic lights: the aurora in science, history and the arts*, Washington: American Geophysical Union, 1980. ISBN: 0875902154. (Copia digitalizada: <http://www.agu.org/books/sp/v018/SP018.pdf>; consultado en junio de 2014).
4. H. Falck Ytter, *Aurora: the northern lights in mythology, history and science*, Edinburgh: Floris Books, 1985. ISBN: 0863150209.
5. A.-J. Ångström, *Recherches sur le spectre solaire*, Upsal : W. Schultz, pp. 41-42, 1868 (<https://archive.org/details/recherchessurle00nggoog>; consultado en junio de 2014).
6. A.-J. Ångström, "Du spectre de l'aurore boréale", *J. Phys. Theor. Appl.* 3, 210-214, 1874. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/jphystap:018740030021000>
7. C. Störmer, "Sur les trajectoires des corpuscules électrisés dans l'espace sous l'action du magnétisme terrestre, avec application aux aurores boréales", *Radium* (Paris) 9, 395-399, 1912. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/radium:01912009011039501>
8. *The Aurora Borealis* (vídeo). Produced by forskning.no in collaboration with the Department of Physics at the University of Oslo. (Versión en inglés: http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=HJfy8acFaOg, o bien <http://vimeo.com/25811412>; consultadas en junio de 2014).

Juan Pedro Sánchez Fernández
Dpto. de Física de los Materiales