



## ACTIVIDAD 7.-

### Cálculo de la Altura de formación de Auroras Boreales.

Por

Sr. **Juan Carlos Casado**. Astrofotógrafo tierrayestrellas.com, Barcelona.

Dr. **Miquel Serra-Ricart**. Astrónomo Instituto de Astrofísica de Canarias, Tenerife.

#### 1 - Objetivos de la actividad

Mediante esta actividad aprenderemos a calcular la altura de formación de las Auroras Boreales a partir de fotografías digitales.

Los objetivos que se pretenden alcanzar son los siguientes:

- Aplicar una metodología para el cálculo de un parámetro físico (altura) a partir de un observable (imágenes digitales) como técnica de aplicaciones pedagógicas, documentales e investigadoras. Aplicar conocimientos de Trigonometría y Física Atómica básicos.
- Conocer y aplicar técnicas de análisis básico de imágenes (escala angular, altura estrellas,...).
- Trabajar cooperativamente en equipo, valorando las aportaciones individuales y manifestando actitudes democráticas.

#### 2 - Instrumentación

La práctica o actividad se realizará a partir de imágenes digitales obtenidas en Groenlandia (Dinamarca) en agosto del año 2011.

#### 3 – Fenómeno.

Las auroras constituyen uno de los grandes espectáculos naturales que se pueden observar desde nuestro planeta. En la actividad veremos qué son, cómo se producen y desde dónde se pueden observar. Asimismo expondremos dos métodos para calcular o estimar la altura a la que se forman.

##### 3.1.- Qué son las auroras

La aurora polar es un fenómeno en forma de brillo o luminiscencia visible en el cielo nocturno, en zonas de altas latitudes (Ártico y Antártico), aunque ocasionalmente puede aparecer en latitudes más bajas por cortos periodos de tiempo.



Figura 1. Aurora austral fotografiada desde la estación Amundsen-Scott situada en el polo sur geográfico, el 14 de julio de 2011 por Robert Schwarz.

En el hemisferio norte (el más habitado) se conoce como aurora boreal (término debido al filósofo y científico francés Pierre Gassendi en 1621) o popularmente “luces del norte”. En el hemisferio sur se produce la aurora austral, que sigue simultáneamente los mismos patrones de actividad que la boreal. La aurora austral resulta visible sobre todo en la Antártida (figura 1), aunque también puede contemplarse desde las zonas más al sur de Australia y Sudamérica.

Las auroras no constituyen un fenómeno exclusivo de la Tierra. Otros planetas como Júpiter y Saturno, con campos magnéticos intensos, presentan fenómenos análogos.

### 3.2.- Cuál es el origen de las auroras

El Sol está emitiendo continuamente partículas de alta energía, además de todo tipo de radiación electromagnética, entre ella luz visible. Este flujo de partículas constituye el denominado viento solar (gas caliente o plasma) que se encuentra formado principalmente por iones positivos y electrones. Existen fenómenos muy energéticos, como las fulguraciones o las eyecciones de masa coronal (CME de las siglas en inglés Coronal Mass Ejection) que incrementan la intensidad del viento solar. Las partículas del viento solar viajan a velocidades desde 300 km/s (vientos solar lento) a 1.000 km/s (viento solar rápido), de modo que recorren la distancia Sol-Tierra en aproximadamente dos o tres días. En las proximidades de la Tierra, el viento solar es desviado hacia el espacio por el campo magnético de la Tierra o magnetosfera.

El viento solar empuja la magnetosfera y la deforma, de modo que en lugar de un haz uniforme de líneas de campo magnético como las que mostraría un imán imaginario colocado en dirección norte-sur en el interior de la Tierra, lo que se produce es una estructura alargada con forma de cometa con una larga cola en la dirección opuesta al Sol (figura 2).

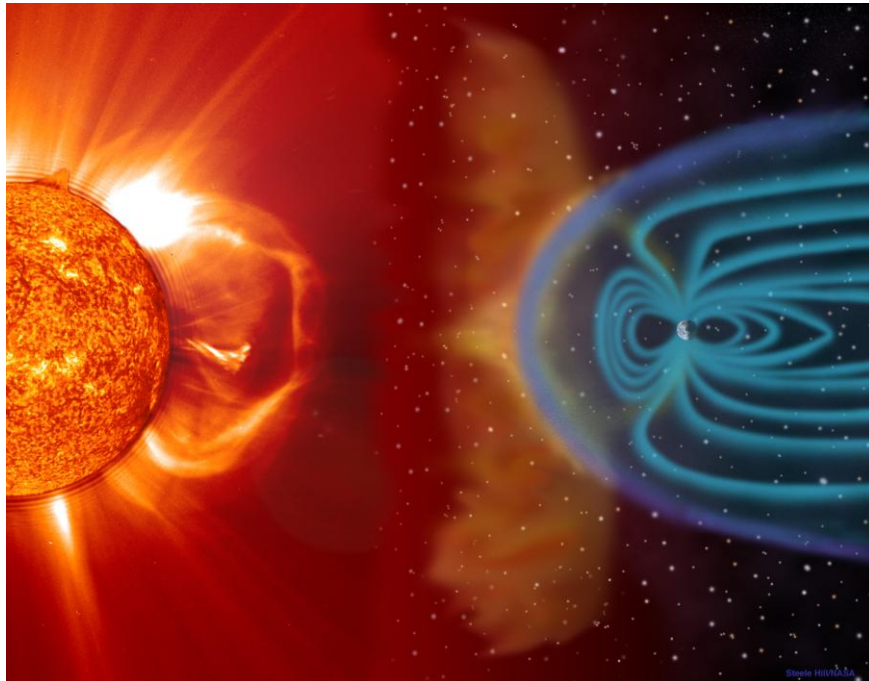


Figura 2. Representación artística del Sol emitiendo el viento solar y una gran eyección de masa coronal que se desplaza por el espacio. Cuando llega a la Tierra, la mayoría de las partículas son desviadas por el campo magnético terrestre, que adopta la forma de una cola de cometa. Unas pocas partículas son conducidas a la atmósfera de nuestra planeta canalizadas hacia los polos magnéticos terrestres por las líneas de fuerza del campo magnético, que se visualizan en la figura como líneas verdes.

Una pequeña parte de las partículas del viento solar penetran en la atmósfera siguiendo las líneas del campo magnético terrestre, de modo que son conducidas según la trayectoria que le marquen éstas. Las partículas atrapadas en la magnetosfera colisionan con los átomos y moléculas neutras de la alta atmósfera de la Tierra, típicamente oxígeno atómico (O) y nitrógeno molecular ( $N_2$ ) que se encuentran en estado neutro y en su nivel más bajo de energía, denominado nivel fundamental. El aporte de energía proporcionado por las partículas procedentes del Sol lleva a esos átomos y moléculas a los llamados estados de excitación que volverán a su nivel fundamental emitiendo la energía en forma de luz (figura 3). Esa luz es la que vemos desde la superficie terrestre y denominamos auroras.

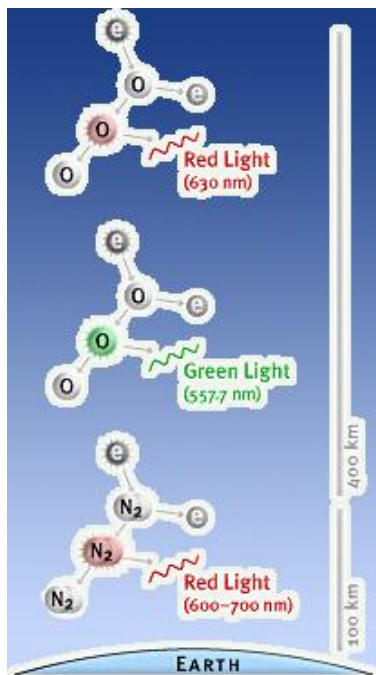


Figura 3. Cuando un electrón procedente del viento solar choca con un átomo de oxígeno (O) o una molécula de nitrógeno ( $N_2$ ) de la alta atmósfera, le transfiere energía pasando a un estado de excitación. Al regresar al estado fundamental desprende esta energía en forma de luz con una longitud de onda característica, correspondiente a un determinado color, tal como se muestra en la figura.

Las auroras se originan normalmente entre los 100 km y los 400 km porque a esa altitud la atmósfera, aunque tenue, todavía es suficientemente densa para que los choques con las partículas solares ocurran de forma significativa.

### 3.3.- Dónde, cuándo y cómo se observan las auroras

La auroras se producen en unas zonas de la Tierra denominadas óvalos aurales, que se encuentran alrededor de los polos magnéticos norte y sur respectivamente (figura 4).

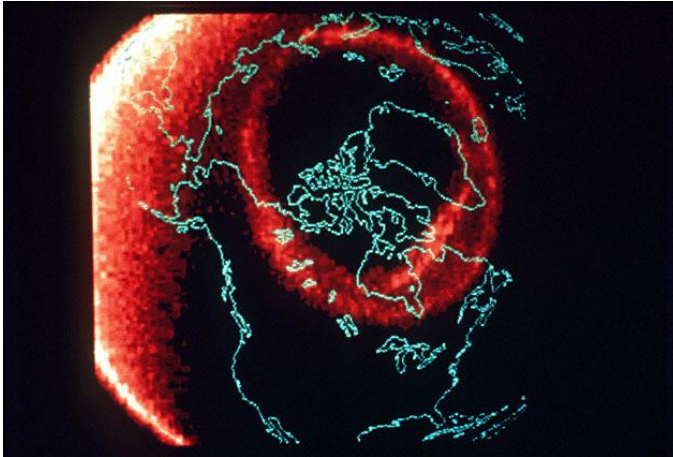


Figura 4. Óvalo auroral norte. Se pueden ver las zonas de aparición frecuente de auroras, así como la disminución de la anchura del óvalo en las zonas orientadas al lado diurno terrestre (parte superior de la imagen).

Cuanto más intenso sea el viento solar y más energéticas las partículas eyectadas desde el Sol, mayor serán los óvalos. Por lo tanto, si la actividad solar es moderada o baja, los óvalos son delgados y en el caso del boreal, sus límites se mueven más hacia el norte. Sin embargo, durante las grandes tormentas solares, el óvalo norte se ensancha y se desplaza más al sur.

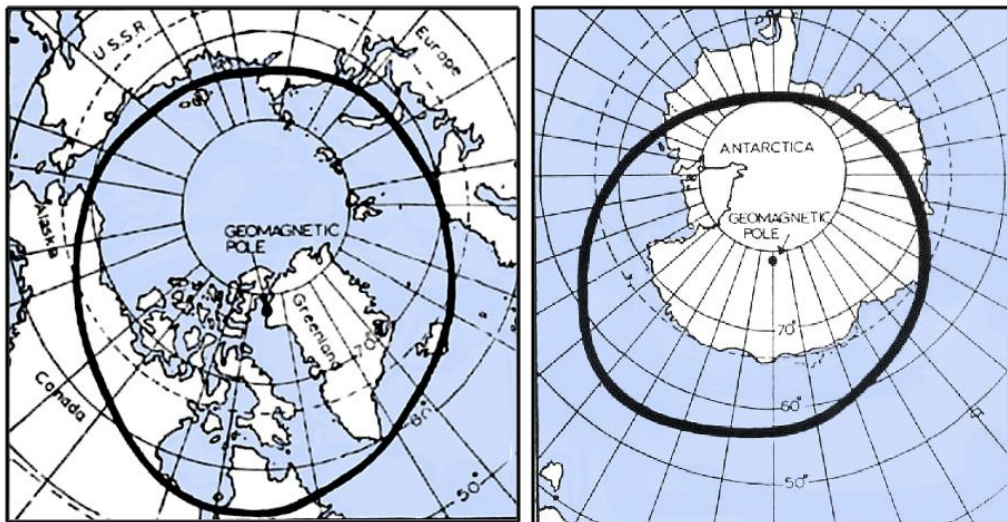


Figura 5. Zonas de mayor aparición de las auroras en los óvalos norte (izquierda) y sur (derecha). La posición de los polos geomagnéticos va cambiando lentamente con el tiempo (alrededor de 60km por año), por tanto, los óvalos aurales también cambiarán lentamente.

Si la actividad solar es muy intensa, el óvalo a veces se extiende por el sur de Estados Unidos y Europa. Para un determinado nivel de actividad solar, la parte más delgada del óvalo auroral se encuentra siempre en el lado diurno terrestre (meridiano del mediodía terrestre), mientras que la parte más gruesa del óvalo se localiza en la zona nocturna de la Tierra y, por tanto, es más probable que veamos la aurora a partir de la medianoche local.

Las zonas de mayor frecuencia en las que se pueden observar las auroras corresponden a un círculo situado en los óvalos aurorales (figura 5). En el hemisferio norte esta zona se extiende por Alaska, norte de Canadá, sur de Groenlandia, Islandia, norte de la península escandinava (Noruega, Suecia, Finlandia) y norte de Siberia. La zona de máxima aparición de auroras australes se encuentra en la Antártida. En estos óvalos la frecuencia de auroras al año puede superar las 240 noches en épocas de alta actividad solar (auroras discretas), disminuyendo tanto hacia dentro como hacia fuera del óvalo (auroras difusas). Por el contrario los habitantes del sur de EE.UU., México, el sur de Europa, y sus alrededores pueden experimentar las auroras (tipo difusas) tan solo una vez en la vida. Se estima que en el ecuador terrestre se puede ver una aurora cada 200 años.

En España, se pueden observar muy de vez en cuando; la probabilidad es alrededor de una al año en el norte, disminuyendo a 0,2 por año en el sur. Coincidiendo con el último máximo de actividad solar, fue vista una aurora en zonas del mediterráneo y levante español el 6 de abril de 2000 (figura 6). Y aún se recuerda la aurora boreal del 25 de enero de 1938, en plena guerra civil española, que resultó observable desde Andalucía.



Figura 6. Aurora boreal (tipo difusa) visible como una intensa iluminación rojiza con estructura hacia el norte desde Figueres (Gerona), el 6 de abril de 2000. Fotografía de Pere Horts.

Nuestra estrella tiene ciclos de actividad. Durante los períodos de máxima actividad el viento solar se incrementa y por tanto es más fácil observar auroras. El principal observable de la actividad solar es la cantidad de manchas que tiene el sol en la superficie. Las manchas solares son zonas de la superficie a menor temperatura que su entorno por lo que aparecen como oscuras en las imágenes. Tras diversos años de datos se ha descubierto que la cantidad de manchas en la superficie del Sol aumenta cada 11 años aproximadamente, por lo que el ciclo de actividad es de 11 años (conocido como “ciclo undecenal”). El último máximo se produjo a finales del año 2000 y según los últimos datos se espera un nuevo máximo a principios del año 2013.

Las auroras polares son fenómenos poco luminosos, por lo que únicamente pueden observarse durante la noche. Las auroras débiles tienen un brillo similar al de la Vía Láctea, mientras que las más brillantes pueden llegar a tener una luminosidad parecida a la de la Luna llena. Debido al hecho que las auroras solo resultan visibles en las regiones circumpolares terrestres, no resultarán observables durante el verano, debido al fenómeno del sol de medianoche. Las auroras se podrán observar de agosto a mayo, siendo los mejores meses los que se encuentran

cercanos a los equinoccios (septiembre y marzo) debido a la mejor disposición geométrica del campo magnético terrestre, que tiene como consecuencia la aparición de Tormentas Geomagnéticas que facilitan la entrada de partículas energéticas solares por los polos.

Las auroras tienen formas, estructuras y colores muy diversos que además cambian rápidamente con el tiempo. Durante una noche, la aurora puede comenzar como un arco aislado alargado que se va extendiendo en el horizonte, generalmente en dirección este-oeste. Cerca de la medianoche el arco puede comenzar a incrementar su brillo. Comienzan a formarse ondas o rizos a lo largo del arco y también estructuras verticales que se parecen a rayos o cortinas de luz muy alargados y delgados. En un momento determinado la totalidad del cielo puede llenarse de bandas, espirales, y rayos de luz que tiemblan y se mueven rápidamente de horizonte a horizonte. La actividad puede durar desde unos pocos minutos hasta horas, aunque normalmente el proceso dura unos 15 o 20 minutos. Cuando se aproxima el alba la actividad disminuye y tan sólo algunas pequeñas zonas del cielo aparecen brillantes hasta que llega el amanecer.

En condiciones normales de iluminación nuestro ojo puede apreciar colores desde el violeta, que en el espectro electromagnético tiene una longitud de onda de unos 390 nm, hasta el rojo, a unos 700 nm. Cuando la aurora es débil aparece aparentemente sin color, ya que en condiciones ambientales de baja iluminación solo son sensibles unas células de nuestros ojos llamadas bastones, que solo distinguen luz sin color. A medida que el brillo aumenta, la visión al color se pone en marcha mediante los conos, las células que nos permiten distinguir los colores, apareciendo los tonos verdosos, el color más común y sensible a nuestra visión (el verde a 555nm). Con cámaras digitales es posible observar, además de las tonalidades rojizas, una amplia gama de colores (azules, morados, amarillos,...).

Algunos observadores aseguran haber escuchado sonido proveniente de las auroras, como siseos, crujidos y chasquidos. Aunque las auroras se sitúan a más de 100 km. de altitud, parece que el campo magnético asociado a la aurora crea una carga electrostática que hace chisporrotear las ramas de los árboles, aunque las mediciones con instrumental que se han hecho no son concluyentes<sup>1</sup>.

## 4 – Metodología

### 4.1.- Estimación de la altitud por la coloración. Método 1 -- Colores

Los colores que vemos en las auroras dependen del elemento atómico o molecular de la alta atmósfera terrestre que las partículas del viento solar (principalmente electrones) excitan y del nivel de energía que esos átomos o moléculas alcanzan. Como hemos visto anteriormente, cuando un átomo o molécula excitado vuelve al estado fundamental, emite un fotón con una energía específica, que se percibe como un color determinado. A centenares de kilómetros de altitud, además del aire normal (constituido básicamente por oxígeno y nitrógeno moleculares), también se encuentra oxígeno atómico. Los principales componentes de la atmósfera, el nitrógeno y el oxígeno producen toda la variedad de colores de la aurora, aunque en ocasiones gases como el hidrógeno y el helio también pueden emitir colores.

#### -Oxígeno

La emisión de energía por parte de los átomos de oxígeno al ser excitados por los electrones tiene cierta peculiaridad que vale la pena explicar. Por lo general un átomo o una molécula excitado vuelve al estado normal de inmediato, y la emisión de un fotón es cuestión de microsegundos. El átomo de oxígeno, sin embargo, se toma su tiempo. Sólo después de un  $\frac{3}{4}$  de segundo vuelve al estado fundamental emitiendo un fotón verde. Para el fotón rojo tardará casi 2 minutos! Si durante este tiempo el átomo choca contra otra partícula perderá energía por

---

<sup>1</sup> Véase el artículo científico <http://www.acoustics.hut.fi/projects/aurora/BNAM-ukl.pdf>

colisión y, por tanto, no emitirá luz. Las colisiones son más probables cuando la atmósfera es más densa (menor altitud). Esta es la razón por la que el color rojo de oxígeno sólo aparece a partir de los 200km, donde las colisiones entre las moléculas de aire y los átomos son raras. Por debajo de los 100 km de altitud incluso el color verde no es posible. Esto ocurre en los bordes inferiores de las auroras: la emisión verde se apaga por las colisiones, y todo lo que queda es la mezcla de azul / rojo (rosado) de la emisión del nitrógeno molecular.

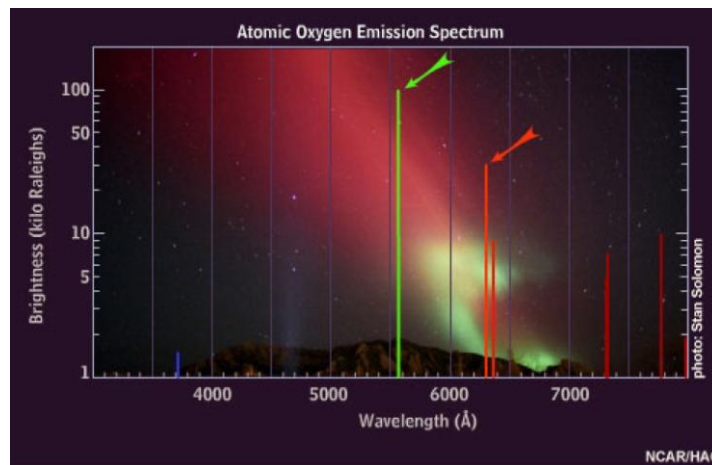


Figura 7. En el gráfico, que muestra el espectro de emisión del oxígeno atómico, aparecen señaladas sus principales líneas de emisión, siendo la correspondiente al verde la más común en las auroras.

En resumen, el oxígeno es responsable de los dos colores primarios de las auroras, el verde, de una transición de energía a 557,7 nm (recordar que un nanómetro son  $10^{-9}$  m mientras que un Amstrong  $10^{-10}$  m), mientras que el color rojo lo produce una transición menos frecuente a 630 nm (figura 7).

### -Nitrógeno

El nitrógeno, al que una colisión le puede arrancar alguno de sus electrones más externos (ionización), produce luz azulada, mientras si es excitado por la colisión de un electrón emite color rojo (figura 8).

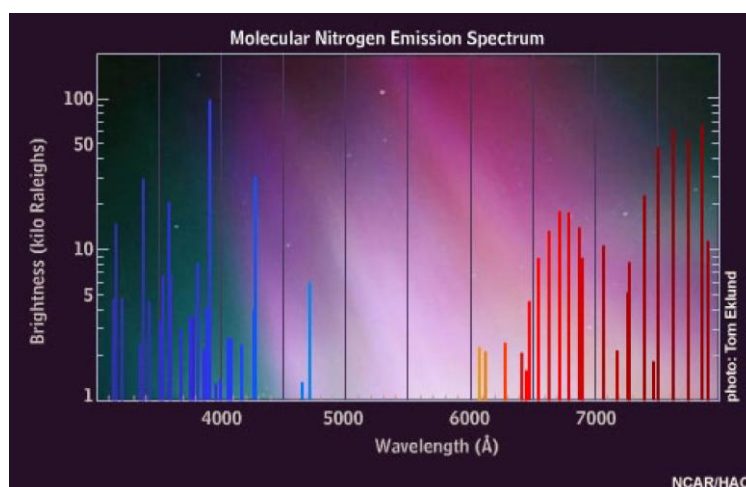


Figura 8. Espectro visible del nitrógeno molecular de las auroras, con sus líneas de emisión.

De forma esquemática y con toda la información de que disponemos es posible hacer un cálculo de la altura de formación de una aurora a partir de sus colores.

- 1.- Por encima de los **200 km** se muestra el **tono rojizo del oxígeno atómico** (figura 9a).
- 2.- Entre los **100-200 km** de altitud destaca el **color verdoso** característico (el más abundante de las auroras, figura 9a,b,c) de la emisión del **oxígeno atómico**.
- 3.- Alrededor de los **120 km** aparecen los **colores azul-violetas** del **nitrógeno molecular** (figura 9c).
- 4.- En situaciones de alta actividad (tormenta solar) aparece una **banda rosada** hacia los **90-100 km** de altitud producido por el **nitrógeno molecular** y en el borde inferior de la aurora (figura 9b).



Figura 9. El color de las auroras es un indicativo de la altura de formación (ver detalles en el texto). Todas las imágenes fueron tomadas por M.C. Díaz Sosa en la expedición Shelios 2000 (más información en [shelios.com/sh2000](http://shelios.com/sh2000)). Los derechos de las imágenes son de [tierrayestrellas.com](http://tierrayestrellas.com)

#### 4.2.- Cálculo de la altura de formación de la aurora por paralaje. Método 2 -- Paralaje

La altura a la que se forma una aurora polar puede ser calculada a partir de fotografías realizadas por dos observadores separados entre sí varios kilómetros. Cada observador verá la misma aurora proyectarse sobre un fondo de estrellas ligeramente diferente. Esta separación angular puede medirse, y conociendo la distancia entre ambos observadores (mediante su ubicación en un mapa o con GPS), podrá calcular la altura a la que se encuentra la aurora. Mediante este procedimiento el físico noruego Carl Störmer utilizando 40.000 fotografías



obtenidas entre 1909 y 1944 estimó los límites de altitud de las auroras polares: entre 70 y 1.100 km, siendo la media alrededor de los 100 km de altitud.

Llamemos O1 y O2 a la posición de cada observador que además están situados a alturas sobre el nivel del mar similares. Estarán separados por una distancia  $d$  conocida. Podemos suponer esta separación  $d$  como una línea recta (unos pocos kilómetros en relación a la circunferencia terrestre). Al observar la misma aurora A, ésta se proyectará sobre un fondo de cielo diferente, originando un ángulo  $\alpha$  que puede medirse (paralaje) (figura 13).

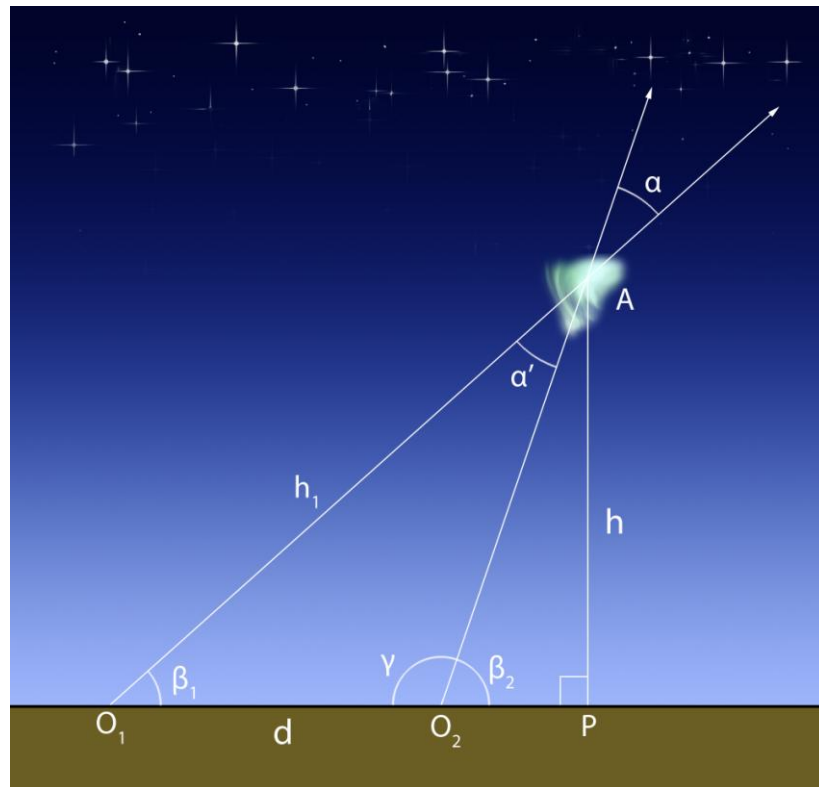


Figura 13. Cálculo de la altura de formación de una aurora por paralaje o triangulación (detalles en el texto). Gráfico J.C. Casado.

Por semejanza de triángulos, el ángulo  $\alpha'$  formado por los vértices del triángulo O1 AO2 es igual al ángulo  $\alpha$ .

Queremos hallar la altura  $h$  de la aurora, que es la perpendicular a la superficie (línea O1 O2). Los ángulos  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son conocidos, ya que son la altura de la aurora respecto al horizonte (que coincide con la altura de las estrellas sobre las que se proyecta) vistos respectivamente, por los observadores O1 y O2. En el triángulo O1 AO2 se cumple la relación (Teorema del seno):

$$\frac{h_1}{\text{sen } \gamma} = \frac{d}{\text{sen } \alpha'} \quad [1]$$

Despejando  $h_1$  tenemos [1]:

$$h_1 = d \cdot \frac{\text{sen } \gamma}{\text{sen } \alpha'} \quad [2]$$

Ahora podemos resolver el triángulo rectángulo O1AP y hallar la altura  $h$ :

$$\text{sen } \beta_1 = \frac{h}{h_1} [3]$$

De donde se obtiene la altura  $h$  de la aurora polar (sustituyendo  $h_1$  en [2] y sabiendo que  $\text{sen}(\gamma) = \text{sen}(180^\circ - \beta_2) = \text{sen}(\beta_2)$ ):

$$h = d \cdot \frac{\text{sen } \beta_1 \cdot \text{sen } \beta_2}{\text{sen } \alpha'} [4]$$

además se cumple la relación  $\alpha' = \beta_2 - \beta_1$ , por tanto, podemos aplicar la fórmula de la siguiente forma:

- 1) Calcular la altura de la aurora respecto al horizonte para cualquiera de los dos observadores (por ejemplo  $O_1$   $\beta_1$ ) y calcular la paralaje  $\alpha'$  (a partir de la escala angular de las imágenes y la separación en píxeles de la proyección de la aurora, sobre el fondo estelar, en cada de las imágenes).
- 2) Calcular la altura de la aurora respecto al horizonte los dos observadores sabiendo que  $\alpha' = \beta_2 - \beta_1$ .

Para los cálculos anteriores se usarán estrellas de campo (presentes en las fotografías digitales) que coincidan con la posición de la aurora. Será necesario conocer las coordenadas exactas de los observadores, su altura respecto al nivel del mar y la hora exacta de la observación. También será necesario disponer de algún software para realizar los cálculos de las alturas  $\beta_2, \beta_1$  (por ejemplo el software libre STELLARIUM disponible en [stellarium.org](http://stellarium.org)).

## 5 - Direcciones de Internet

- <http://www.shelios.com> Expediciones científicas del grupo Shelios para observar fenómenos astronómicos, entre ellos auroras boreales (Shelios 2000 y Shelios 2011), incluyendo transmisiones en directo a través de Internet ([sky-live.tv](http://sky-live.tv)).
- <http://spaceweather.com> Actividad solar y del entorno espacial terrestre, incluyendo auroras.
- Imágenes solares y avisos de tormentas (SOHO, ESA):  
[sohowww.estec.esa.nl/data/realtime-images.html](http://sohowww.estec.esa.nl/data/realtime-images.html)  
[sohowww.estec.esa.nl/whatsnew/](http://sohowww.estec.esa.nl/whatsnew/)
- Actividad solar y previsiones  
Europa: <http://sidc.oma.be/index.php3>  
Estados Unidos: <http://www.swpc.noaa.gov/>