

Plasmas en atmósferas planetarias

Francisco José Gordillo Vázquez, Alejandro Luque,
Francisco Carlos Parra y María Passas

La existencia de plasmas en atmósferas planetarias depende de, entre otros factores, la densidad de la atmósfera en cuestión así como de la presencia de actividad eléctrica. Así, de los 8 planetas reconocidos y más de 140 lunas existentes en nuestro Sistema Solar, todos los planetas cuentan con una magnetosfera interna ó inducida (en Venus y Marte) que, aunque formalmente fuera de la atmósfera planetaria, juega un papel destacado en el circuito eléctrico global de cada planeta. Además de magnetosferas, a medida que descendemos en altura se ha detectado una capa de gas ionizado (la ionosfera) en todos los planetas y algunas lunas del Sistema Solar (caso de Ío, Europa, Ganimedes y Titán) así como emisiones ópticas procedentes de auroras de hidrógeno (Saturno, Júpiter, Urano, Neptuno), de oxígeno y nitrógeno (Tierra) así como de monóxido de carbono asociadas a un tipo especial de aurora, nunca antes observada en el Sistema Solar, detectada por primera vez en la atmósfera marciana en 2005 por la nave Mars Express. En nuestro planeta Tierra, la presencia de plasmas se extiende desde las capas más altas de la atmósfera (plasma ionosférico y auroras australes y boreales) hasta las capas más bajas (troposfera), habiéndose detectado también desde 1989 la presencia de distintas clases de descargas eléctricas en la mesosfera y estratosfera terrestre que dan lugar a la formación de plasmas débilmente ionizados en esas capas de la atmósfera media y cuya influencia en las propiedades eléctricas y químicas de la atmósfera terrestre es hoy en día objeto de investigación.

1. Introducción

Desde el lanzamiento del *Sputnik I* el cuatro de octubre de 1957 han sido muchas las misiones espaciales encaminadas a aumentar nuestros conocimientos del planeta Tierra, de los demás planetas y cuerpos del Sistema Solar así como de la naturaleza del universo que habitamos. Uno de los primeros descubrimientos fue el de la magnetosfera, plasma magnetizado por la influencia del campo magnético de la Tierra, que rodea y protege nuestro planeta de las partículas eléctricamente cargadas (electrones y protones) que forman el viento solar. La magnetosfera terrestre fue descubierta en 1958 por el satélite estadounidense *Explorer I*, lanzado en febrero de ese mismo año, y se extiende desde aproximadamente los 1500 km de altura donde comienza la plasmasfera descubierta en 1963 hasta casi los 70000 km. Las partículas del viento solar que son detenidas por la magnetosfera forman los cinturones de Van Allen en los que se concentra gran cantidad de protones y electrones que se mueven en espiral entre los polos magnéticos del planeta a una distancia del suelo que oscila entre los 1000 km y los 20000 km. En los polos magnéticos, que son las zonas en las que las líneas del campo magnético terrestre penetran en su interior, parte de las partículas cargadas del viento solar se precipitan sobre la alta atmósfera cuyas especies atómicas y moleculares son, por un lado, ionizadas (contribuyendo a la formación de la ionosfera terrestre) y, por otro, son también excitadas, por impacto con los electrones de alta energía del viento solar, de forma que al desexcitarse dan lugar a espectaculares cortinas de luz

que conocemos como auroras boreales y australes y que se producen cerca de los polos norte y sur magnéticos.

Hasta aquí hemos hablado del plasma magnetosférico terrestre y de su influencia en la formación de otros plasmas en la alta atmósfera terrestre como la ionosfera (a cuya formación también contribuyen procesos de fotoionización de las especies químicas de la alta atmósfera por la radiación ultravioleta procedente del Sol) y las auroras. Sin embargo, el plasma ionosférico y auroral de la Tierra también se ha detectado en otros mundos (planetas y lunas) del Sistema Solar. En todos los planetas y en algunas lunas se ha encontrado una ionosfera así como diversos tipos de auroras en Venus [1,2], Marte [3], Tierra, y en los cuatro planetas gaseosos exteriores. En este sentido, Mercurio es el único planeta donde, hasta la fecha, no se ha detectado presencia de auroras aunque su estudio detallado sólo se ha llevado a cabo por la sonda *Mariner 10* en 1974-75 y por tres aproximaciones de la sonda *Messenger* entre enero de 2008 y septiembre de 2009. En marzo de 2011, la sonda *Messenger* se posicionó en órbita estable alrededor de Mercurio lo cual será una magnífica oportunidad para conocerlo en más detalle.

La presencia de plasmas entre las capas medias (mesosfera) y baja (troposfera) de los planetas y lunas del Sistema Solar se ha estudiado poco debido al difícil acceso a esas regiones de las atmósferas planetarias. En este sentido, sólo existe evidencia directa de la existencia de rayos en Júpiter [4] y Saturno [5] gracias a las misiones *Voyager* y *Cassini*, habiéndose detectado rayos visualmente en Saturno con *Cassini* en 2009. En Marte se han observado emisiones ópticas proce-

dentos de los denominados *Demonios de Polvo* (*dustdevils* en inglés) que son descargas eléctricas dentro de tornados de polvo que llegan hasta los 8-10 km de altura y 500 m de diámetro en la troposfera marciana y que se producen entre partículas de polvo cargadas eléctricamente por fricción (triboelectricidad) [6] pudiéndose llegar a generar campos electrostáticos cercanos o ligeramente por encima del campo de ruptura de la baja atmósfera marciana. La presencia y diversidad de plasmas en la atmósfera terrestre incluye, entre los 0 y 15 km de altura, desde los rayos asociados a nubes de tormenta con elevado aparato eléctrico y los llamados “rayos” o resplandores sísmicos (asociados a terremotos intensos) [7] hasta algunos

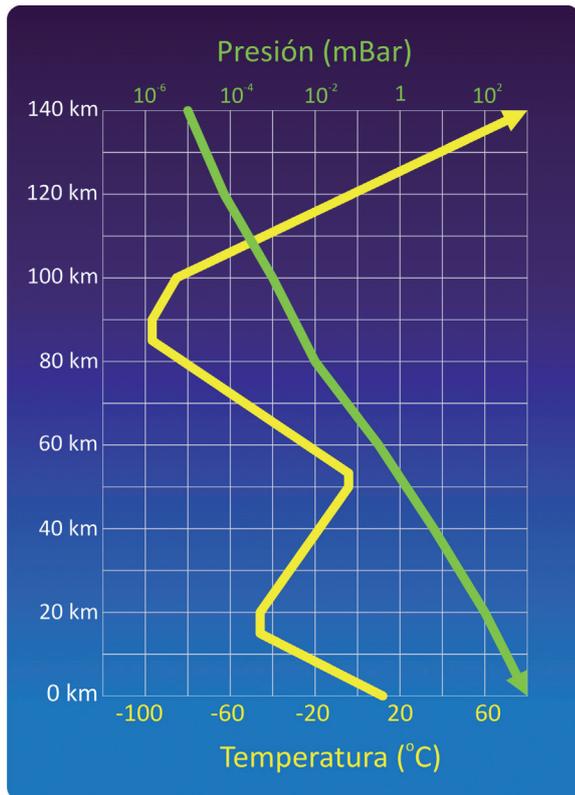


Fig. 1. Variación de la presión y temperatura en la atmósfera terrestre en función de la altura.

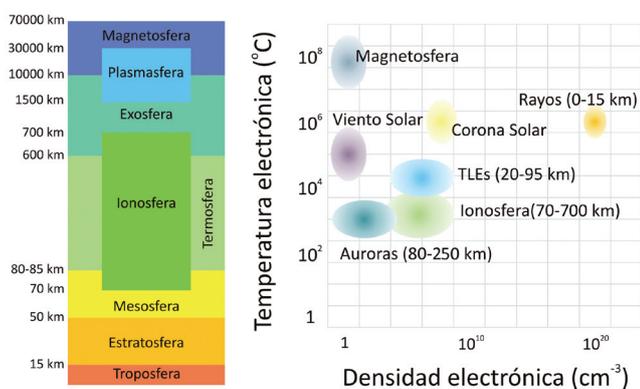


Fig. 2. Esquema de las diferentes capas de la atmósfera terrestre (izquierda) y variación de la temperatura electrónica en función de la densidad electrónica (derecha) para los plasmas de la atmósfera terrestre incluyendo la magnetosfera así como el viento y la corona solar.

tipos de los denominados fenómenos luminosos transitorios (*Transient Luminous Events* ó TLE por sus siglas en inglés) descubiertos en 1989 [8]. Los TLE son descargas eléctricas de origen diverso que dan lugar a diferentes tipos de plasmas débilmente ionizados entre las partes altas (10 km–15 km) de las nubes de tormenta y la baja y alta estratosfera donde se han detectado los llamados Blue Jets [9,10] y Blue Starters [11], respectivamente. En la estratosfera se han observado Jets Azules Gigantes (*Giant Blue Jets*) [12] que llegan hasta los 80 km de altura (baja ionosfera). Finalmente, en la mesosfera se producen frecuentemente Sprites [8,13,14,15] cuyos filamentos de plasma bajan hasta los 45 km, Halos que se producen entre 75 km y 80 km de altura y Elves [16] que ocurren entre 80 km y 95 km de altura y que fueron detectados por primera vez en 1992 [17].

En este trabajo presentaremos brevemente los diversos tipos de plasmas detectados en atmósferas planetarias así como su influencia en el equilibrio químico y eléctrico de las atmósferas planetarias. En las figuras 1 y 2 hemos representado la variación de la presión y temperatura en la atmósfera terrestre en función de la altura (figura 1) así como un esquema de las distintas capas de la atmósfera terrestre (figura 2) con las temperaturas y densidades electrónicas típicas de los plasmas encontrados en la atmósfera de la Tierra.

2. Plasmas en la troposfera: Rayos y DustDevils

2.1. Rayos

Los rayos son potentísimas descargas eléctricas entre nubes, dentro de nubes y entre las nubes y el suelo. Los rayos son uno de los elementos del circuito eléctrico global planetario que permite el intercambio de carga eléctrica entre las nubes y el suelo. Cuando estas cargas se acumulan en regiones separadas, por ejemplo entre nubes de tormenta del tipo cumulonimbus y el suelo, se crea una gran diferencia de potencial que produce campos eléctricos superiores al de ruptura dieléctrica del aire (~ 33 kV/cm – aire seco y ~ 10 kV/cm – aire húmedo a presión atmosférica) dando lugar a la ionización del aire y a la formación de columnas de plasma que llamamos rayos.

La explicación actual más consistente [18] de este fenómeno es la teoría Schonland según la cual las cargas de la nube, ubicadas en las gotas de lluvia y cristales de hielo, se distribuyen de forma heterogénea (figura 3a). Cuando el campo eléctrico sobrepasa el valor crítico de la ruptura dieléctrica del aire comienzan a ocurrir pequeñas descargas en el interior de la nube que degeneran en lo que se ha dado en llamar descarga piloto o *pilot streamer* (figuras 3b y 3c). La rama de la descarga piloto logra imponerse en su movimiento hacia tierra acompañada de pequeños rayos secundarios. Esta fase recibe el nombre de líder escalonado o *stepped leader* y está constituida por un núcleo de plasma de entre 0.01 m y 0.5 m, rodeado por una corona de varios metros de diámetro donde está alojada la carga. A medida que se aproxima a tierra, su gradiente eléctrico aumenta emitiendo pulsos de frecuencia muy alta (VHF) al tiempo que se produce un canal de recepción que puede salir de tierra o de estructuras altas (torres, montañas,...) terminadas en punta donde el campo eléctrico

es mayor. Este canal de recepción raras veces supera los 30 metros de altura (figura 3d). El canal de recepción sale al encuentro de la descarga piloto para neutralizar la carga de la nube por el canal previamente ionizado. A través de este canal plasmático ocurren todas las descargas sucesivas de las cuales la primera es la descarga de retorno o *return stroke* (figura 3e y 3f). El impacto provocado por las cargas eléctricas que la descarga de retorno introduce en la nube es tan fuerte que origina una segunda descarga hacia tierra denominada descarga secundaria o *dart leader*. Este fenómeno (*return stroke–dart leader*) puede repetirse un número de veces apreciable (*multiple stroke*) en el mismo canal plasmático (figuras 3g, 3h y 3i).

No todos los rayos tienen la misma polaridad. Así, el 90% de los rayos nube-suelo son negativos (*cloud to ground negative* ó CG -), esto es, se inician en la parte baja de la nube cargada negativamente, siendo sólo el 10 % restante de rayos nube-suelo del tipo positivo (*cloud to ground positive* ó CG +) iniciándose en la parte alta (cargada positivamente) de la nube. Como se apuntó arriba, también se producen rayos entre nubes (*cloud to cloud*) y dentro de nubes (*intra cloud*) siendo estos últimos los más frecuentes. En general dos tercios del número total de rayos se dan entre nubes o dentro de nubes, siendo el tercio restante asociado a rayos nube-suelo.

Durante la caída de un rayo se produce un fuerte gradiente de presión alrededor del rayo que llega a ocasionar un aumento de hasta 10 veces en la presión atmosférica en las inmediaciones del rayo y que produce una fuerte onda de choque que podemos escuchar en la distancia. Los rayos suelen tener

intensidades de corriente de decenas de miles de amperios, elevándose la temperatura del gas por encima de los 25000 K. La energía total de una descarga nube-tierra es del orden de 360 kW-h, que es aproximadamente la energía que consumen 5 bombillas de 100 W funcionando continuamente durante un mes. Según las últimas investigaciones, los rayos pueden ser también los responsables de la emisión de rayos gamma terrestres (TGF) y positrones al espacio exterior [19]. Como curiosidad podemos decir que en el mundo caen anualmente del orden de 8 millones de rayos. Solamente en España, el 7 de Agosto de 1992 se superaron los 95000 impactos en 24 h.

Si nos basamos en las condiciones que se han observado en la Tierra para que se produzcan rayos podemos decir que existen dos requerimientos básicos para la generación de descargas eléctricas tipo rayo o de tipo rayo-chispa (*lightning-like electrical sparks*) en atmósferas extraterrestres: (a) que exista interacción entre partículas de diferente tipo o del mismo tipo pero con distintas propiedades (por ejemplo, diferente temperatura), dando lugar a un proceso de carga eléctrica local de modo que se generen cargas eléctricas de distinto signo entre las diferentes clases de partículas, y (b) que haya una separación espacial suficiente entre las partículas con carga de diferente signo debido a la acción de procesos de convección y/o fuerzas gravitatorias. Por tanto, los rayos y descargas eléctricas atmosféricas no son patrimonio de nuestro planeta ni tienen que provenir necesariamente de una tormenta. En este sentido, se han detectado descargas eléctricas en nubes de polvo originado durante erupciones volcánicas, terremotos así como en tormentas de arena. También en Júpiter, la sonda *Voyager 2* detectó en 1979 rayos 1000 veces más energéticos que los terrestres [20], y la sonda *Cassini* observó en Saturno durante 2009 rayos con energías del orden de 1.7×10^7 J [21]. No está clara la existencia de rayos en Venus, aunque en 2007 se detectaron evidencias indirectas por la sonda *Venus Express* [22]. De confirmarse definitivamente la existencia de rayos en Venus, serían únicos en el Sistema Solar ya que, a diferencia de los rayos en la Tierra, Júpiter y Saturno, los rayos de Venus no estarían asociados a nubes de agua sino de ácido sulfúrico con una constante dieléctrica de 110 (la del agua es 80) y se producirían en el interior de las nubes de Venus (*intra-cloud lightning*) ya que la capa de nubes en Venus está entre 45 km y 65 km de altura, esto es, mucho más arriba que en la Tierra (5–20 km) haciendo por tanto que las descargas nube-suelo en Venus sean más improbables que en la Tierra.

2.2. Demonios de Polvo o *DustDevils*

Los demonios de polvo (*dustdevils* en inglés) están formados por partículas cargadas eléctricamente formando un vórtice convectivo vertical, se producen tanto en la Tierra como en Marte y en ellos se pueden producir descargas eléctricas acompañadas de emisiones ópticas visibles desde el espacio (caso de Marte). Los *dustdevils* se caracterizan por su alta velocidad de rotación ciclónica o anticiclónica, campo electrostático significativo (25 kV/m en Marte) así como por la reducción de la presión y aumento de la temperatura en su centro. Los *dustdevils* tienen el aspecto de torbellinos más o menos grandes que se nos hacen visibles por arrastrar

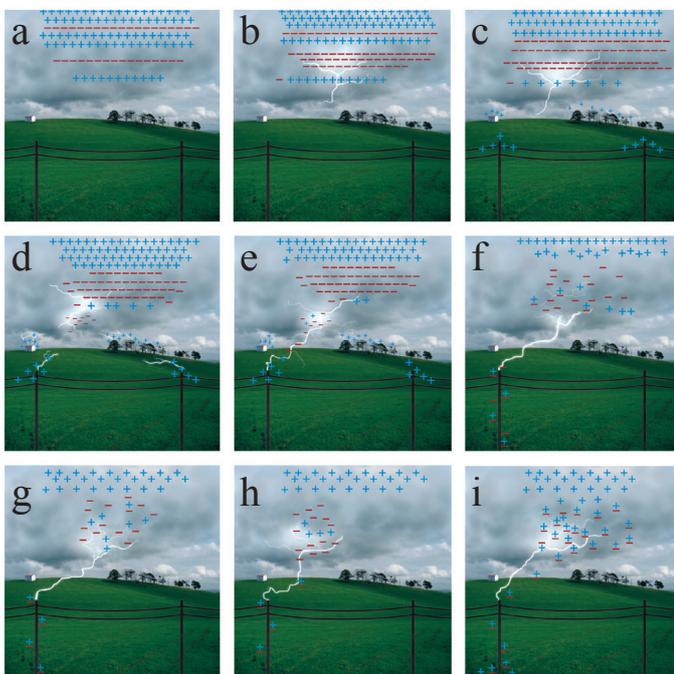


Fig.3. Esquema gráfico de las diferentes etapas descritas por la teoría de Schonland para explicar la dinámica de formación y evolución de rayos: (a) distribución heterogénea de cargas eléctricas en la nube, (b) y (c) representan descargas piloto o *pilot streamer* en el interior de las nubes, (d) canal de recepción con carga positiva y longitud máxima de unos 30 metros, (e) y (f) representan la descarga de retorno o *return stroke*, (g), (h) e (i) muestran una secuencia del fenómeno (*return stroke–dart leader*) que puede repetirse un número de veces apreciable (*multiple stroke*) en el mismo canal plasmático.

polvo y arena que se mueven ascendentemente y en movimiento espiral por la acción del aire caliente cercano a la superficie.

En la Tierra suelen ocurrir en regiones áridas, principalmente durante las mañanas del verano o primavera, en superficies planas, calientes y secas, sin mucha vegetación y con rocas no muy grandes. Pueden tener desde 1 m hasta 1 km de diámetro aunque generalmente no sobrepasan los 100 m. Su forma suele ser de cono invertido con el vértice en contacto con el suelo, o en forma de V. Tienen una vida media de unos pocos minutos, aunque en 1947 se detectó un *dustdevil* en Utah (EE.UU.) que recorrió 60 km durante 7 horas.

Los *dustdevils* de Marte son muy similares a los terrestres aunque más altos y anchos (debido a la menor gravedad marciana) pudiendo llegar hasta los 8 km de altura y más de 30 m/s de velocidad de desplazamiento horizontal (frente a los menos de 10 m/s de los *dustdevils* terrestres). Al igual que en la Tierra, se generan principalmente en el verano y la primavera marciana, de día y en latitudes medias (regiones de máxima insolación).

Los *dustdevils* se forman cuando el aire caliente de la superficie asciende superadiabáticamente provocando una estratificación inestable en la atmósfera y una fuerte convección. La vorticidad no parece estar directamente relacionada con la rotación del planeta [23]. Los *dustdevils* pueden generar un gran campo eléctrico en su interior a través de interacciones triboeléctricas involucrando polvo y arena, es decir, a través de la electrificación por colisiones entre las partículas y/o entre las partículas y la superficie con la consiguiente transferencia de carga eléctrica por fricción. Este proceso hace subir las partículas de polvo pequeñas con cargas negativas, dejando cargados positivamente tanto a los granos de polvo más grandes como a la superficie (figura 4). El diámetro de las partículas de polvo que forman los *dustdevils* terrestres y marcianos es, como máximo, de 25 micras y 10 micras, respectivamente. En Marte, el campo eléctrico

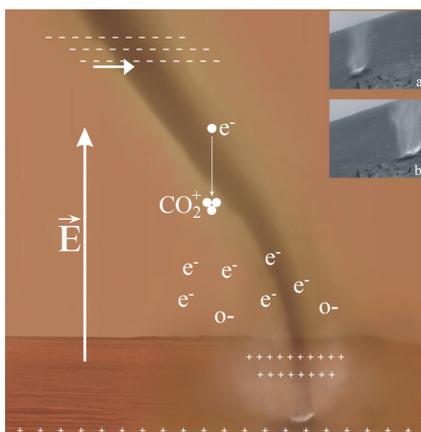


Fig.4. Representación de un *dustdevil* en Marte donde se muestra el campo eléctrico generado por la separación de cargas eléctricas así como la formación de los iones CO_2^+ y O^- por procesos de ionización ($e + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_2^+ + e + e$) y captura disociativa ($e + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{O}^-$) por colisiones de CO_2 con electrones. Las imágenes (a) y (b) muestran dos secuencias de la evolución de un *dustdevil* real en Marte tal cual fueron fotografiados por el rover *Spirit* en marzo de 2005. En ambas imágenes puede verse cerca de la base (zona más brillante) la emisión óptica visible procedente de la descarga eléctrica.

en los *dustdevils* puede ser del orden de 25 kV/m que unido a la baja presión de la atmósfera de CO_2 en la superficie marciana (apenas 7 torr frente a los 760 torr de la Tierra a nivel del mar) puede ser una fuente de electrones, mediante procesos de ionización, que en número suficiente acaban generando una avalancha electrónica capaz de sostener un plasma colisional en el interior del *dustdevil* [24] acompañado de emisiones ópticas visibles.

3. Plasmas en la troposfera–estratosfera–mesosfera terrestre

En el verano de 1989 varios investigadores estadounidenses dirigidos por John R. Winckler grabaron varios fotogramas de intensos destellos luminosos [8] provenientes de un fragmento de cielo sin nubes localizado a más de 50 km de altura y que, sin que ellos se dieran cuenta en ese momento, se encontraba sobre lejanas nubes de tormenta. Habían hecho la primera detección de plasma luminosos de aire generados por descargas eléctricas en la mesosfera (50–90 km de altura) sobre cuya posible existencia ya había especulado en 1925 el físico y premio Nobel escocés C.T.R. Wilson [25], [26] en relación con posibles descargas eléctricas en las capas altas de la atmósfera terrestre como consecuencia de la actividad eléctrica de importantes núcleos de tormenta en las capas bajas (troposfera) de la Tierra. El razonamiento genérico de Wilson fue que, a medida que uno asciende en la atmósfera, la densidad del aire disminuye, por lo que un electrón libre sufre cada vez menos colisiones y gana más fácilmente energía de un campo eléctrico dado. El campo eléctrico creado por la carga en una nube disminuye lentamente con la altura en tanto que la densidad atmosférica decae mucho más rápido (exponencialmente). Por tanto, existirá una altura a la que un electrón libre gane tan fácilmente energía del campo eléctrico

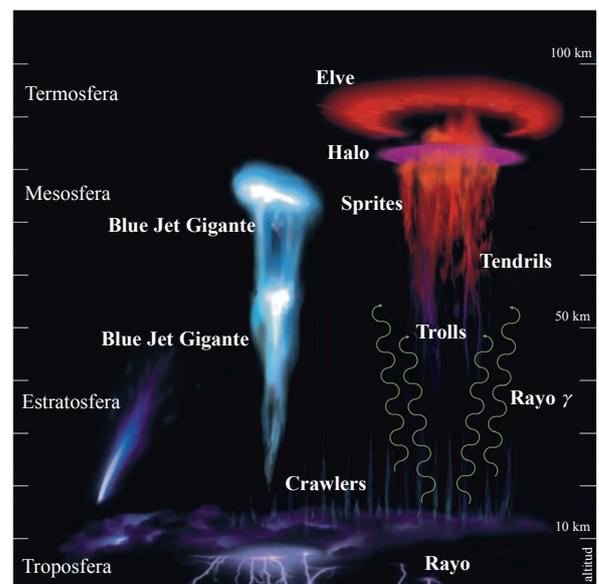


Fig.5. Esquema con los diferentes TLEs detectados en la atmósfera terrestre desde 1989 hasta la fecha. No se descarta la existencia de TLEs en otros planetas y lunas cuyas atmósferas tenga actividad eléctrica del algún tipo.

co que al impactar con una molécula le arranque un nuevo electrón. La avalancha resultante multiplica rápidamente el número de electrones libres e iniciaría una descarga eléctrica. Este mecanismo nos ofrece una primera aproximación a la formación de algunos TLEs, en particular de los Sprites que son uno de los más frecuentes. Sin embargo, existen muchos tipos de TLEs a diferentes alturas y aún no se conoce el detalle de cómo se producen algunos de ellos ni su posible influencia en las propiedades de la atmósfera terrestre (ver figura 5 y figura 6).

Desde aquel ya lejano verano de 1989 se han ido descubriendo distintos tipos de descargas eléctricas llamadas con el nombre genérico de Eventos Luminosos Transitorios (*Transient Luminous Events* o simplemente TLE en inglés) que ocurren entre la parte alta de la troposfera y la baja ionosfera.

3.1. Plasmas en la troposfera–estratosfera: *Blue Starters, Blue Jets, Giant Jets y Crawlers* diversos

Las primeras publicaciones sobre la detección de fuertes descargas eléctricas que emitían destellos azules en forma de jet procedentes de las partes altas (15-18 km) de nubes de tormenta datan de 1995 [9] donde se describían las observaciones hechas durante el verano de 1994 en Arkansas sobre nubes de tormenta con gran aparato eléctrico asociado. Estas descargas se llaman *Blue Jets* y pueden llegar hasta los 40 km de altura partiendo de nubes de tormenta con abundantes rayos nube-suelo predominantemente negativos. Las teorías actuales explican las características fundamentales de los *Blue Jets* interpretándolas como descargas eléctricas de tipo filamentoso ó *streamer* positivo, esto es, que tienen una concentración de carga positiva en el frente del streamer. En 1996 se publicaron los primeros resultados sobre los *Blue Starters* [11] que parecen ser la primera fase de los *Blue Jets* ya

que sólo se propagan hasta unos 25 km de altura y también parecen ser *streamers* positivos. Junto a los *Blue Starters* y *Blue Jets*, también se han detectado toda una serie de descargas eléctricas, aún hoy muy poco estudiadas, que surgen de la parte alta de las nubes de tormenta y alcanzan diferentes alturas. En este sentido cabe mencionar las descargas denominadas *Trolls* con estructura de Jet que llegan hasta los 40–50 km de altura a velocidades de 150 km/s [11] así como las descargas *Palm Tree* con aspecto de tronco brillante que se ensancha a modo de corona luminosa a 60–70 km de altura. Estas descargas de tipo *Trolls*, *Palm Tree* y otras se han dado en llamar descargas eléctricas arrastradoras–*crawler discharges* ó simplemente *crawlers* [27]. Finalmente, en 2002 [12] se detectaron los *Blue Jets* Gigantes ó *Giant Blue Jets* que emergen a unos 10-20 km de altura pero pueden llegar a alcanzar la baja ionosfera a unos 90 km de altura (figura 5).

Empieza a quedar claro que las descargas eléctricas tipo Jet que comenzaron a ser estudiadas, junto a otros TLEs, a mediados de los años noventa del siglo XX, juegan un papel destacado en el circuito eléctrico global en el que se mantiene una diferencia de potencial de varios cientos de miles de voltios entre el suelo y la ionosfera terrestre gracias a corrientes de carga eléctrica ascendente que emergen del techo de nubes de tormenta en forma de descomunales descargas eléctricas ascendentes que generan plasmas de aire de densidad variable. Así, se ha descrito que los *Giant Blue Jets* [28] transfieren importante carga negativa (alrededor de -150 C) desde el suelo a la baja ionosfera. Por tanto los *Blue Jets* (*streamer* positivos) contribuirían a cargar el circuito eléctrico global mientras que los *Giant Blue Jets* (*streamer* negativos) lo descargarían. Así, podemos imaginar el circuito eléctrico global como un inmenso condensador esférico en el que la placa superior se mantiene a un potencial de unos 300000 voltios con respecto al potencial del suelo. Hay muchos componentes que contribuyen a mantener esa enorme diferencia de potencial. Sin embargo, los más importantes son las nubes de tormenta (de las que unas 2000 están presentes a escala global en cualquier momento) que actúan como baterías que cargan el condensador. El segundo componente importante son las regiones planetarias con buen tiempo donde el condensador planetario se descarga continuamente por la acción de una atmósfera levemente conductora que proporciona un vínculo eléctrico entre suelo e ionosfera a través de la cual se escapan corrientes de hasta 1 kA [29]. Así, las intensidades de corriente y diferencias de potencial en el circuito eléctrico global pueden estar parcialmente controladas por los *Blue Jets* y *Giant Blue Jets* ya que la polaridad eléctrica negativa de los segundos (*Giant Blue*) proporciona grandes cantidades de carga negativa a la placa superior del condensador global y, por tanto, actúa descargándolo. En este sentido, algunas descargas arrastradoras o *crawlers* (ver figura 5) de tipo filamentosos, entre las que se encuentran los *Trolls* y otras, parecen surgir del horizonte, sobre nubes de tormenta, propagándose hacia arriba en dirección de las filamentos de plasma más bajos (40-45 km) de los Sprites creando así condiciones favorables para el establecimiento de un vínculo conductor entre la superficie terrestre y la baja ionosfera.

TIPO	Altura (km)	Anchura (km)	Aspecto	Movimiento aparente	Duración (ms)	Número de observaciones
SPRITE	~45 - 90	1-20	Parte Superior (> 70 km) Difuso Parte Inferior (< 70 km) Filamentoso	Hacia arriba Hacia abajo	5 - 120	> 10000
CRAWLERS (TROLLS, PALM TREES, ...)	~18 - 25	5	Filamentoso	Hacia arriba	~100	< 100
ELVES	90 - 100	~100 - 300	Difuso	Expansión Lateral	1	> 10000
BLUE JET	~18 - 45	10	Filamentoso	Hacia arriba	~100	< 100
BLUE STARTER	~18 - 25	5	Filamentoso	Hacia arriba	~100	< 100
GIANT BLUE JET	~18 - 75	15	Filamentoso	Hacia arriba	~100	< 10
HALOS	~75 - 80	~50	Difuso	Expansión Lateral	~ 1 - 10	> 10000

Fig.6. Características básicas de los TLEs conocidos. Se muestran datos relativos a la altura a la que ocurren, duración, movimiento aparente, aspecto y frecuencia de detección.

3.2. Plasmas en la mesosfera: Sprites, Halos y Elves

Los Sprites son uno de los TLE más comúnmente observados. De hecho, el primer TLE detectado en 1989 fue un Sprite que, en esencia, es una enorme descarga eléctrica producida poco después de rayos nube-suelo positivos y que, en primera aproximación, se genera a una determinada altura en la que el campo de ruptura dieléctrica del aire se hace igual al campo electrostático asociado a las cargas positivas acumuladas en grandes nubes de tormenta. Los Sprites suelen cubrir alturas comprendidas entre los 85 km y los 40-45 km siendo habitual observar en ellos una parte superior (por encima de los 70 km) caracterizada por su aspecto y emisión óptica difusa (glow-like discharge) y por una región inferior (por debajo de 70 km aproximadamente) donde presenta una estructura de descarga filamentososa (streamer-like) (ver figura 6). Las emisiones visibles de los Sprites se encuentran fundamentalmente en el rojo, aunque también en el azul como consecuencia de la desexcitación radiativa del primer y segundo sistema positivo del nitrógeno molecular, respectivamente.

Junto con los Sprites, los Halos y Elves son los tipos de TLE más comunes (ver figura 6). Los Halos son descargas eléctricas con forma de disco difuso de unos 80-100 km de diámetro que se producen a unos 80-85 km de altura y que pueden aparecer asociados a Sprites o no. A diferencia de los Sprites, los Halos están asociados, en general, a rayos nube-suelo negativos (los más frecuentes) y sus emisiones más intensas en el visible también se centran, como la de los Sprites, en el rojo (preferentemente) y menos en el azul. Por último, los Elves fueron detectados por primera vez en 1992 [17] y son descargas eléctricas con forma de donut con un diámetro que oscila entre los 100 y 300 km localizándose entre 90 y 100 km de altura. Los Elves, que suelen observarse antes de que aparezcan los Sprites, parecen estar asociados al calentamiento de los electrones de la baja ionosfera como consecuencia de los pulsos electromagnéticos generados por rayos nube-suelo positivos muy intensos [30]. Los Elves, por tanto, pueden tener una influencia importante en la baja ionosfera además de afectar a la propagación de las ondas de radio.

Sólo comentar finalmente que todavía se ha estudiado muy poco la influencia que los distintos TLE pueden llegar a tener en las propiedades eléctricas y químicas de la atmósfera terrestre. En particular, parece que juegan un papel importante en el circuito eléctrico global pero aún se desconoce su influencia en, por ejemplo, la producción de óxidos de nitrógeno (importantes intermediarios en algunos de los ciclos catalíticos del ozono) u otras especies químicas de la atmósfera terrestre generadas en las descargas eléctricas tipo TLE alejadas del equilibrio térmico (los neutros tienen una energía media muy inferior a la de los electrones de los plasmas de aire producidos durante los TLE).

4. Plasmas en alta mesosfera (> 80 km): Auroras

Probablemente las manifestaciones más espectaculares de plasmas en atmósferas planetarias son las auroras. Visibles como grandes arcos luminosos en el cielo y con una

intensidad que puede ser comparable a la de una luna llena, las auroras han impresionado a los habitantes de las altas latitudes terrestres desde tiempo inmemorial. Es posible que ciertas pinturas rupestres con unos 30000 años de antigüedad ya representen el cielo durante una aurora.

Galileo Galilei acuñó el término *aurora boreal* inspirado por el nombre de la diosa romana de la mañana. Hoy, además de la aurora boreal, que aparece cerca del polo norte terrestre, hablamos también de auroras australes, sus análogas en el hemisferio sur. Galileo pensó incorrectamente que las auroras resultan de la reflexión de la luz solar en la atmósfera. Por supuesto, la correcta explicación física del fenómeno hubo de esperar a que a mediados del siglo XIX Maxwell enunciara las leyes del electromagnetismo y en 1897 J.J. Thomson descubriera el electrón. En 1902-1903 el físico noruego Kristian Birkeland realizó una expedición polar para examinar las ideas sobre las auroras que había extraído de un modelo a escala de la tierra (*terrella*) instalado en su laboratorio de Oslo [31]. La teoría resultante, publicada en 1908, convierte a Birkeland en el primer científico en explicar correctamente las auroras; por ello sus compatriotas aún le homenajean en los billetes de 200 coronas noruegas.

Birkeland descubrió que el origen de las auroras se encuentra en las partículas cargadas a las que atrapa el campo magnético terrestre; principalmente en los electrones, por ser con mucho las más ligeras de estas partículas. A gran altura la atmósfera es tan tenue que las partículas prácticamente no sufren colisiones. En tal caso los electrones describen hélices alrededor de las líneas del campo magnético y por tanto se mueven fácilmente en la dirección del mismo pero con gran dificultad en la dirección transversal. Puesto que el campo magnético terrestre es predominantemente dipolar, las líneas de campo inciden sobre la superficie terrestre cerca de los polos. Cuando, siguiendo estas líneas, los electrones se acercan a la superficie encuentran una atmósfera más densa, colisionan con otras partículas y pierden su energía. Si el número de electrones precipitados es suficientemente alto las excitaciones que producen al impactar con otros componentes de la atmósfera emiten luego su energía en forma de luz. Este es el mecanismo de las auroras.

Ahora bien, ¿cuál es el origen de las partículas atrapadas en el campo magnético terrestre? Birkeland postuló que provenían únicamente de la radiación solar pero ahora sabemos que también en parte son partículas escapadas de la ionosfera terrestre [32] (ver sección 5). En cualquier caso la conexión entre las auroras y el Sol es estrecha. Ya en 1733 el geofísico francés J. J. Dortous de Mairan mencionó una correlación clara entre el número de manchas solares y la frecuencia de aparición de auroras [32]. Ahora sabemos que esta conexión se debe a que las partículas precipitadas en una aurora toman su energía de la interacción entre los campos magnéticos del sol y de la tierra. En el máximo del ciclo solar, aproximadamente cada 11 años, la mayor actividad magnética del Sol produce tanto las manchas solares como una mayor frecuencia de auroras en la Tierra.

En las últimas décadas los instrumentos para la observación de auroras en la tierra han mejorado enormemente. En la era espacial, además de confirmar y refinar los modelos de auroras terrestres, hemos encontrado una valiosa infor-

mación sobre otros cuerpos del Sistema Solar. Auroras muy similares a la de la Tierra se producen en todos los planetas del Sistema Solar que poseen una atmósfera y un campo magnético propio (Júpiter, Saturno y Urano). Además, en Marte, con un campo magnético residual proveniente de su corteza, también se detectaron recientemente emisiones provenientes de la precipitación de electrones hacia un máximo de este campo. Venus no tiene un campo magnético propio pero ciertas emisiones observadas por la sonda *Pioneer* pueden provenir de la precipitación de electrones sobre su atmósfera [33].

El espectro de las emisiones de una aurora depende de la composición atmosférica y de la energía con la que se precipitan los electrones [32]. En nuestro planeta las auroras brillan generalmente con un tono verdoso ya que su emisión más intensa, correspondiente a una transición prohibida del oxígeno atómico, se encuentra en 557.7 nm. Sin embargo, en las auroras de Júpiter, Saturno y Urano predominan las emisiones en el ultravioleta provenientes del hidrógeno molecular (bandas Lyman y Werner) y de la línea Lyman α del hidrógeno atómico. Esta última línea también ha sido observada en la débil aurora de Neptuno. Las emisiones localizadas observadas en Marte provenían de la banda Cameron del monóxido de carbono (CO), entre 180 y 240 nm [3]. La aparente aurora de Venus se detectó por emisiones ultravioletas de 130.4 y 135.6 nm provenientes del oxígeno atómico [33].

Entre las auroras del Sistema Solar, la de Júpiter presenta una particularidad notable. Su luna Ío, a unos 420 000 kilómetros de este planeta gigante e inmersa en la magnetosfera joviana (ver figura 7), tiene una intensa actividad sísmica. Sus erupciones volcánicas expulsan una gran cantidad de partículas que quedan atrapadas en una línea de campo magnético. El pie de esta línea, cerca de la superficie de Júpiter, es visible como un punto de mayor luminosidad cerca de la aurora convencional.

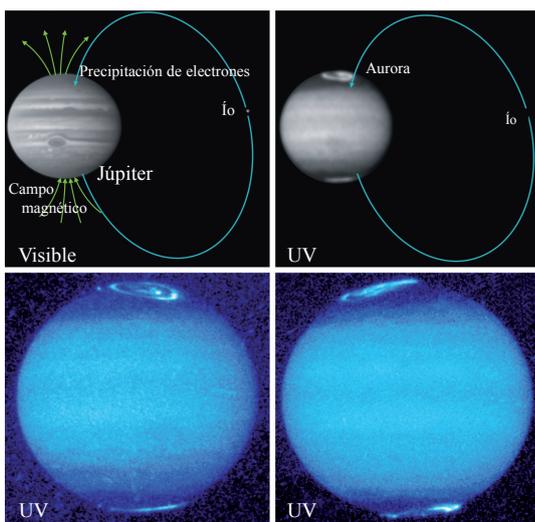


Fig.7. Esquema en el que se representa cómo el campo magnético de Júpiter guía las partículas expulsadas por su luna Ío, distante unos 420 000 kilómetros, y cómo penetran en su atmósfera contribuyendo a la formación de las auroras jovianas. Se muestran imágenes en los canales visible y ultravioleta.

5. La ionosfera: El plasma ionosférico

Los rayos, los TLEs y las auroras son plasmas transitorios: su duración va desde los milisegundos en rayos y TLEs hasta las decenas de minutos en las auroras. Sin embargo en la atmósfera de la Tierra y en las de otros cuerpos del Sistema Solar también existe un tipo de plasma permanente en las capas más externas de la atmósfera: la ionosfera.

El descubrimiento y la investigación de la ionosfera terrestre están estrechamente relacionados con el desarrollo de las comunicaciones por radio. Una de las primeras evidencias de la existencia de capas ionizadas en la atmósfera fue la exitosa comunicación por radio entre Inglaterra y Newfoundland (Canadá) que realizó Guglielmo Marconi en 1901. Esto sorprendió a muchos de los científicos de la época que no comprendían cómo una onda electromagnética podía propagarse siguiendo la curvatura de la Tierra. Por ello en 1902 Kenelly y Heaviside propusieron independientemente lo que se llamó la capa de Kennelly-Heaviside. Argumentaron que si la atmósfera está ionizada a gran altura conduce eficientemente la electricidad y por tanto la transmisión de radio alrededor de la tierra se entiende como la propagación electromagnética entre dos casquetes esféricos conductores, entre los que la radiación queda perfectamente atrapada.

Los experimentos que confirmaron la existencia de la capa de Kennelly-Heaviside los realizó, en los años 20 y 30 del siglo XX, el físico británico Edward V. Appleton. Para ello midió desde Cambridge la variación en la intensidad de la señal de la emisora de la BBC de Londres. Además de encontrar que durante el día las ondas de radio son reflejadas a unos 90 km en la que llamó *capa E*, también observó que durante la noche las ondas se reflejan a mayor altura, unos 210 km, en la *capa F*. Por último también observó ionización por debajo de los 90 km en lo que llamó la *capa D* [34, 35]. En 1947 Appleton ganó el premio Nobel de Física por estos descubrimientos.

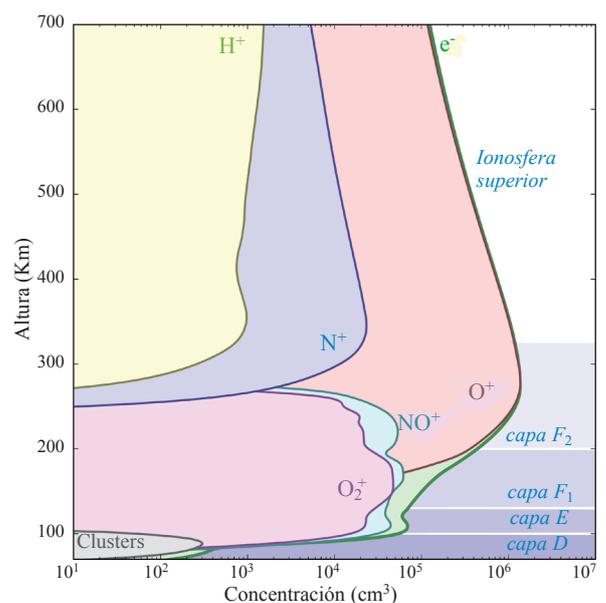


Fig.8. Representación de la composición electrónica e iónica de la ionosfera terrestre durante el día.

En 1929 R. Watson-Watt, uno de los inventores del radar, propuso el término *ionosfera* para designar a las capas altas de las atmósferas que están permanentemente ionizadas [36]. Esta ionización persistente en la alta atmósfera proviene principalmente de la radiación solar ultravioleta durante el día y de la precipitación de partículas de la magnetosfera y de rayos cósmicos durante la noche.

En la figura 8 representamos la composición electrónica e iónica de la ionosfera terrestre durante el día. Actualmente la ionosfera se divide en capas dependiendo de su composición iónica [37]: en la *capa D* los iones positivos dominantes son clústers iónicos. En las *capas E* y *F₁* dominan los iones O_2^+ y NO^+ . A partir de unos 200 km de altura, en la *capa F₂* el ion positivo dominante es el oxígeno atómico O^+ . A alturas mucho mayores este papel pasa al ión de hidrógeno (protones) que, por ser más ligero, alcanza una mayor elevación.

Sin embargo, uno no debe pensar que las densidades representadas en la figura 8 son completamente estacionarias. La ionosfera es, por el contrario, una capa muy dinámica de nuestra atmósfera [38]. La principal variación se debe, por supuesto, a la diferencia en la irradiancia solar entre la noche y el día. Aunque de forma mucho más débil, el ciclo solar también influye sobre la composición ionosférica. Junto a estas variaciones regulares, con frecuencia pueden observarse capas transitorias con una ionización mayor debida probablemente a la presencia de polvo meteorítico. Las auroras (ver sección anterior) tienen también una influencia muy importante sobre la ionosfera cerca de los polos.

Debido a la ubicuidad de la radiación solar, todos los cuerpos con atmósfera en el Sistema Solar presentan algún tipo de ionosfera. La de Venus ha sido la ionosfera extraterrestre más estudiada, gracias a las medidas que la sonda *Pioneer* tomó entre 1978 y 1992. Este planeta tiene una noche efectiva equivalente a 58 días terrestres, pero su ionosfera persiste durante todo este tiempo en el lado nocturno, aunque de forma extremadamente irregular. Esto es probablemente debido a la precipitación de partículas del medio interplanetario y al transporte de plasma desde las zonas diurnas [39].

6. Conclusiones

En este trabajo hemos pretendido mostrar una visión muy general sobre el estudio de plasmas en atmósferas planetarias así como el interés de su investigación para llegar a conocer en detalle la naturaleza química y eléctrica de las atmósferas de planetas y lunas de nuestro Sistema Solar. A pesar de que la Tierra es el planeta cuya atmósfera ha sido más estudiada, sólo hace apenas dos décadas desde que se descubrieron, en la estratosfera y mesosfera terrestre, nuevos tipos de plasmas (los TLEs) que actualmente siguen siendo objeto de estudio. En abril de 2011 están en marcha varias misiones espaciales de NASA y ESA estudiando el entorno de plasma en Mercurio (Messenger), Venus (Venus Express) y Marte (Mars Express y Mars Reconnaissance Orbiter). Desafortunadamente, la misión japonesa Planet C, lanzada con éxito en mayo de 2010, no pudo entrar en la órbita de Venus en 2011 por lo que se pierde una misión que tenía entre sus objetivos principales el estudio de la actividad eléctrica en la atmósfera de Venus con su *Lightning and Airglow*

Camera (LAC) diseñada para detectar la posible presencia de rayos en Venus, aún por confirmar definitivamente.

Agradecimientos

Agradecemos la ayuda del Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) a través del proyecto AYA2009-14027-C05-02 así como de la Junta de Andalucía a través del Proyecto de Excelencia FQM-5965.

Referencias

- [1] PHILLIPS, J. L., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **13**, 1047 (1986).
- [2] GERARD, J. C., *et al.*, *Planetary and Space Science* **56**, 542 (2008).
- [3] BERTAUX, J. L., *et al.*, *Nature* **435**, 790 (2005).
- [4] DYUDINA, U. A., *et al.*, *Icarus* **172**, 24 (2004).
- [5] DYUDINA, U. A., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **37**, L09205, doi:10.1029/2010GL043188 (2010).
- [6] FARRELL, W. M., *et al.*, *J. Geophys. Res.* **104**, 3795 (1999).
- [7] FIDANI, C., *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **10**, 967 (2010).
- [8] Franz, R.C., *et al.*, *Science* **249**, 48 (1990).
- [9] WESCOTT, E. M., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **22**, 1209 (1995).
- [10] WESCOTT, E. M., *et al.*, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **60**, 713 (1998).
- [11] WESCOTT, E. M., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **23**, 2153 (1996).
- [12] PASKO, V. P., *et al.*, *Nature* **416**, 152 (2002).
- [13] SENTMAN, D. D. and WESCOTT E. M., *Geophys. Res. Lett.* **20**, 2857 (1993).
- [14] LYONS, W. A., *Geophys. Res. Lett.* **21**, 875 (1994).
- [15] SENTMAN, D. D., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **22**, 1205 (1995).
- [16] FUKUNISHI, H., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **23**, 2157 (1996).
- [17] BOECK, W. L., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 99 (1992).
- [18] RAKOV, V. A. and UMAN, M. A., *Lightning Physics and Effects*, Cambridge University Press, (2003).
- [19] BRIGGS, M. S., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **38**, L02808, doi:10.1029/2010GL046259 (2011).
- [20] BORUCKI, W.J. and MAGALHAES, J. A., *Icarus* **96**, 1 (1992).
- [21] Dyudina, U. A., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L09205, doi:10.1029/2010GL043188 (2010).
- [22] RUSSELL, C. T., *et al.*, *Nature*, **450**, 661 (2007).
- [23] BALME, M. and GREELEY, R., *Rev. Geophys.*, **44**, RG3003, doi:10.1029/2005RG000188 (2006).
- [24] JACKSON, T. L., *et al.*, *J. Geophys. Res.*, **115**, E05006, doi:10.1029/2009JE003396 (2010).
- [25] WILSON, C. T. R., *Proc. Phys. Soc. Lond.* **37**, 32D (1925).
- [26] WILSON, C. T. R., *Proc. R. Soc. Lond. A* **236**, 297 (1956).
- [27] MOUDRY, D. R., *The dynamics and morphology of sprites*, Ph.D. thesis, Univ. of Alaska Fairbanks, (2003).
- [28] CUMMER, S. A., *et al.*, *Nature Geosci.*, **2**, 1, doi:10.1038/NGL0607 (2009).
- [29] BERING, E. A., *et al.*, *Phys. Today*, **51**, 24 (1998).
- [30] INAN, U. S. *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 705 (1991).
- [31] EGELAND, A. J., *Atm. Sol.-Terr. Phys.*, **71**, 1749 (2009).
- [32] HULTQVIST, B., *The Aurora in Y. Kamide and A. Chian (eds.), Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*, 333 (2007).
- [33] FOX, J. L. and STEWART, A. I. F., *J. Geophys. Res.* **96**, 9821 (1991).
- [34] APPLETON, E. V., *The Ionosphere, Nobel Lecture*, (1947).
- [35] RATCLIFFE, J. A., *Sir Edward Appleton, Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society* **12**, (1966).
- [36] WATSON-WATT, R., *Quart. J. Meteor. Soc.*, **55**, 273 (1929).
- [37] BLELLY, P. L. and ALCAYDÉ, D., *Ionosphere*, in Y. Kamide and A. Chian (eds.), *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*, 189 (2007).
- [38] KELLEY, M. C., *Ionosphere* in J. R. Holton (ed.), *Encyclopaedia of Atmospheric Science*, 1022 (2002).
- [39] SCHUNK, R. W. and NAGY, A. F., *Ionospheres*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido (2000).

**Francisco José Gordillo Vázquez, Alejandro Luque,
Francisco Carlos Parra y María Passas**
Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)
Glorieta de la Astronomía s/n, 18008, Granada, vazquez@iaa.es