

Dinámica de la alta Atmósfera

Física de la Atmósfera Terrestre

Guía 3

1. Un ión de oxígeno atómico es producido a una altura de 200 km. Luego de su creación, se mueve a través del ambiente de oxígeno neutro debido a su movimiento térmico. Estadísticamente, debido a su movimiento al azar, puede predecirse que se moverá una distancia $d = s\sqrt{N}$ desde su lugar de origen, donde s corresponde al camino libre medio y N al número de colisiones. Cuál es la distancia promedio recorrida por el ión durante su vida media? Cómo decrece esta distancia cuando se considera una altura de 150 km?
2. Para una altura de 500 km se mide una densidad electrónica de 10^{11} m^{-3} durante el mediodía, a una latitud media y con actividad solar media.
 - (a) Estime el tiempo necesario para producir esta densidad electrónica por fotoionización.
 - (b) Cuál es la tasa de pérdida a esta altura considerando los procesos de intercambio de carga y de recombinación radiativa?
 - (c) Por qué factor la densidad de equilibrio fotoquímico excede a la densidad observada? Conociendo la constante temporal correspondiente al transporte, estime cuál es el tiempo para que sean eliminadas las perturbaciones de la densidad causadas por procesos fotoquímicos.
 - (d) Estime el orden de las corrientes descendentes inducidas por la producción de electrones a estas alturas.
3. * Un planeta tiene una atmósfera consistente en oxígeno atómico y oxígeno molecular, cuyas densidades en la superficie del planeta son $6.84 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ y $4.68 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ respectivamente. Considere una temperatura del gas neutro de 1000 K y una aceleración gravitacional de 10 m s^{-2} constantes. El flujo fotónico solar que alcanza la parte superior de la atmósfera del planeta es $10^{13} \text{ fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ (en el rango del ultravioleta).
 - (a) Calcule las densidades de oxígeno atómico y molecular a 100 km de altura asumiendo que se tiene equilibrio difusivo.
 - (b) Calcule el flujo fotónico solar a 100 km de altura si las secciones eficaces de absorción son $2 \times 10^{-22} \text{ m}^2$ para ambas especies, independiente de la longitud de onda (considere $\chi = 0$).
 - (c) Calcule las tasas de ionización para O^+ y O_2^+ a 100 km de altura si la sección eficaz de ionización es $2 \times 10^{-22} \text{ m}^2$ tanto para el oxígeno atómico como para el molecular.
4. Considerando un modelo de atmósfera plana con una única especie de neutros, y que en la termosfera superior $T \sim T_\infty$ y que la radiación solar es absorbida principalmente por

procesos de ionización, encuentre que el perfil de ionización adopta la forma conocida como función de Chapman

$$Q = Q_0 \exp \left[1 - \frac{y}{H} - \sec \chi \exp \left(-\frac{y}{H} \right) \right] ,$$

donde Q es la tasa de producción electrónica ($\text{e}^- \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), $Q_0 = \Phi_{\nu\infty}^p / (eH)$ es la tasa máxima de producción electrónica, siendo $\Phi_{\nu\infty}^p$ el flujo fotónico solar en la parte superior de la atmósfera ($\text{fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y H la escala de altura de la densidad de neutros en la región de la termosfera donde la tasa de producción electrónica es máxima; por otro lado χ es el ángulo de incidencia de la radiación solar e $y = (z - z_M)/H$, con z_M la altura en la que Q es máxima para incidencia normal ($\chi = 0$).

Grafique el perfil de densidades de neutros obtenido en función de la altura para ángulos cenitales de incidencia $\chi = 0^\circ$, $\chi = 30^\circ$ y $\chi = 60^\circ$. Tome la escala de altura de neutros como $H = 10 \text{ km}$, $Q_0 = 1.3 \times 10^{11} \text{ e}^- \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $z_M = 125 \text{ km}$. Cómo depende la altura del pico con χ ?

5. Usando la fórmula para ionización de Chapman determine en forma aproximada el perfil vertical de densidad electrónica en la capa E de la ionosfera. Para ello asuma cuasineutralidad, que el principal proceso de pérdida es la recombinación radiativa ión-electrón con un coeficiente de recombinación α e ignore procesos de transporte de forma que pueda asumirse equilibrio local entre procesos de producción y pérdida.
6. Suponiendo que los procesos de transporte son despreciables, encuentre la dependencia temporal aproximada del perfil vertical de densidad electrónica en la capa E de la ionosfera, a partir de suponer conocido el perfil en el momento en que deja de existir producción por fotoionización (i.e., suponga conocida la condición inicial del perfil vertical).
7. * Halle el perfil vertical de la densidad electrónica diurna (aproximación de perfil estacionario) para la región F baja de la ionosfera. Aquí la mayor abundancia iónica corresponde a O^+ , y se puede suponer que la velocidad de los procesos de pérdida resulta principalmente dada por dos procesos de intercambio de carga desde O^+ hacia (respectivamente) dos componentes neutras (N_2 y O_2), que al ionizarse son muy rápidamente neutralizadas mediante procesos de recombinación disociativa. Halle ahora el decaimiento nocturno del perfil vertical de la densidad electrónica en la región F baja de la ionosfera.
8. * Encuentre el perfil vertical estático de la densidad electrónica en la región F alta de la ionosfera (considere el campo eléctrico de polarización que logra restaurar la cuasineutralidad en el plasma). Hallar la escala de altura del plasma (H_p) y el campo eléctrico de

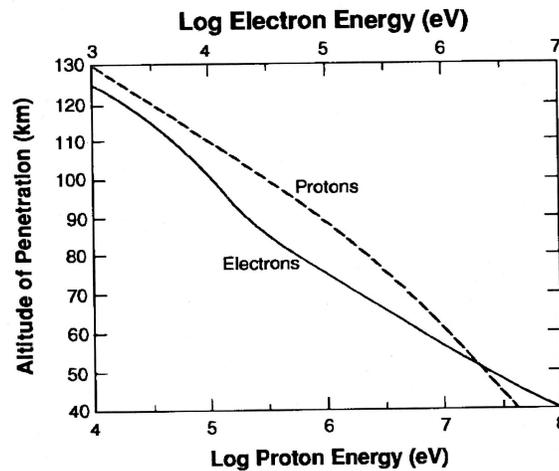


Figure 1: Altura de penetración para electrones y protones en la atmósfera terrestre en función de sus energías de incidencia.

polarización (Ep), ambas cantidades en función de T_i (temperatura de iones), T_e (temperatura de electrones) y m_i (masa de iones). Cuantifique valores típicos para un plasma formado por electrones y O^+ .

9. La figura 1 muestra algunos perfiles verticales de deposición de energía para protones en una atmósfera exponencial de oxígeno. Usando estas curvas diga cómo podrían obtenerse los perfiles de deposición para partículas α incidentes en la misma atmósfera. Si se tiene un flujo monoenergético de protones de 100 keV entrando a la atmósfera, cuál debería ser aproximadamente el pico de la tasa de producción?
10. * La detección de una ionósfera nocturna en Venus por parte de las primeras sondas planetarias causó una gran sorpresa. Venus tiene una noche muy prolongada de alrededor de 60 días terrestres, y sin una fuente adicional de ionización, aparte de la solar, no debería existir una ionósfera nocturna. Los primeros orbitadores de Venus (Venera 9 y 10) detectaron un flujo de $3 \times 10^{12} \text{ e}^- \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ de electrones precipitantes de baja energía ($\sim 30 \text{ eV}$). Asuma que la atmósfera nocturna es isotérmica con $T = 150 \text{ K}$, compuesta principalmente por moléculas de CO_2 y que la densidad de neutros es $2 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ a una altura de 140 km. Considere que cada electrón precipitante resulta en un proceso de ionización y luego es perdido (la sección eficaz de ionización es $3 \times 10^{-20} \text{ m}^2$). Ignorando efectos de transporte y tomando una tasa de recombinación $\alpha = 4 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
 - (a) Grafique el perfil de densidad electrónica con la altura.
 - (b) Cuál es el pico de densidad electrónica?
 - (c) Cuál es la altura del pico de densidad?
11. Como se dijo en el problema anterior, Venus, al igual que la Tierra, posee una ionósfera. Para alturas por encima de los 200 km la misma consiste de iones de oxígeno y electrones en equilibrio estático (distribución de densidad barométrica). La densidad iónica a 200 km

puede tomarse como $n_{O^+} \approx 10^{11} \text{ m}^{-3}$. Asuma que en esta región las temperaturas iónica y electrónica son independientes de la altura y del mismo orden de magnitud, $T_i \approx 2000 \text{ K}$ y $T_e \approx 5000 \text{ K}$. A diferencia de la ionósfera terrestre, la ionósfera venusina tiene una ionopausa, es decir, un límite superior relativamente bien definido. Esta se encuentra localizada a una altura donde la presión del plasma ionosférico es igual a la presión del viento solar incidente. Vale aclarar que Venus no tiene una magnetósfera que pudiera interceptar el viento solar por encima de la ionósfera y que el plasma magnetizado del viento solar es incapaz de penetrar dentro de la ionósfera. Calcule la altura de la ionopausa para el caso en que la presión de choque (*ram pressure*) del viento solar toma el valor $p_{sw} = 4 \times 10^{-9} \text{ N m}^{-2}$. En primera aproximación use un valor de gravedad constante igual al valor correspondiente a 200 km de altura.

12. Determine la distribución de densidades electrónica y iónica (una única especie) y de potencial electrostático en un plasma en equilibrio. Para ello plantee que cada especie está en equilibrio mecánico, asuma temperatura uniforme y que se satisface la ecuación de Poisson para el potencial eléctrico (por estacionariedad). Muestre que si se considera una carga Q en el origen el potencial correspondiente es del tipo de Yukawa

$$\phi(r) = \frac{Q}{r} \exp(-r/\lambda_D) \quad ,$$

siendo λ_D la denominada longitud de Debye. Obtenga la longitud de Debye a partir de sus resultados. Qué puede concluir sobre el apantallamiento de la carga Q por el plasma ambiente? Estime el número de Debye N_D , es decir el número de cargas dentro de la esfera de Debye (esfera de radio λ_D).

13. Considere las ecuaciones de Maxwell en un plasma neutro

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{J} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

más una relación constitutiva lineal $J_k = \sigma_{kl} E_l$, siendo σ_{kl} el tensor de conductividad eléctrica. Encuentre una ecuación tipo de ondas para el campo eléctrico (ecuación de ondas con fuentes inducidas).

Analice la propagación de ondas electromagnéticas en este plasma para el caso $\vec{B} = 0$. Para ello determine σ “modelando” el plasma en la siguiente forma:

- asuma que $\nu_c \ll \omega$, donde ν_c es la frecuencia de colisión electrónica o iónica y ω la frecuencia de la onda electromagnética,
- obtenga la relación entre \vec{J} y \vec{E} a partir de la ecuación de movimiento para cada electrón o ión individual y suponiendo para $\vec{E}(\vec{r}, t)$ soluciones tipo onda plana.

Encuentre la forma que adopta σ (el cual se reduce a un escalar en este caso).
Muestre que el campo eléctrico satisface la ecuación diferencial

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) - \frac{(\omega^2 - \omega_p^2)}{c^2} \vec{E} = 0 \quad ,$$

siendo ω_p la frecuencia de plasma dada por $\omega_p^2 = \omega_e^2 + \sum_j \omega_j^2$, donde

$$\omega_e = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \quad \text{y} \quad \omega_j = \sqrt{\frac{4\pi n_j Z_j^2 e^2}{m_j}} \quad ,$$

son la frecuencia angular de plasma electrónica y la frecuencia angular de plasma de la especie iónica j , respectivamente.

A partir de la ecuación diferencial que satisface \vec{E} encuentre la relación de dispersión descomponiendo el campo eléctrico en componentes paralela y perpendicular a \vec{k} ($\vec{E} = E_{\parallel} \vec{k} + \vec{E}_{\perp}$). Muestre que uno de los modos corresponde a oscilaciones de plasma que no se propagan (ondas de *Langmuir*, las cuales representan oscilaciones de las cargas alrededor de su posición de equilibrio), y que para $\omega < \omega_p$ se tienen ondas evanescentes, y que en el caso de muy baja frecuencia la profundidad de penetración en el plasma es del orden de c/ω_p .

14. Suponga la incidencia oblicua ($\vec{k} = k_x \vec{x} + k_z \vec{z}$) de una onda electromagnética en un plasma neutro con un perfil de densidad electrónica vertical $n_e = n_e(z)$, creciente con la altura. Muestre que a una dada altura debe darse la reflexión de la onda. Cómo puede utilizarse este hecho para estudiar el perfil de ionización ionosférico?Cuál sería el rango de utilidad de esta técnica?
15. Asuma que electrones monoenergéticos de 3 keV precipitan paralelos al campo magnético y generan un arco auroral de 1000 km de longitud en la dirección este-oeste y 10 km de ancho en la dirección norte-sur, con un brillo superficial homogéneo de 5 k-rayleigh en la banda de 391.4 nm. Estime el flujo electrónico necesario para producir este arco y calcule el flujo de energía neto para este flujo de electrones.