

La Ionosfera

Por JOSE M.^a JANSA GUARDIOLA

(Primer premio de temas "Grupo (C)" del IV Concurso de artículos "Nuestra Señora de Loreto".)

El premio Nóbel de Física, máxima consagración científica mundial, ha sido otorgado este año al eminente profesor inglés Appleton, que logró sistematizar nuestros conocimientos sobre la ionosfera, y a quien se debe, en particular, el descubrimiento de la capa reflectora superior de nuestra atmósfera para las ondas hertzianas.

La historia de este interesante capítulo de la ciencia moderna es bastante conocida. En 1870 prenunció Maxwell la existencia de las ondas electromagnéticas, y propuso la teoría electromagnética de la luz, identificando las ondas luminosas con aquéllas. Hertz, en 1888, puso en evidencia la realidad física de tales ondas, y Marconi, en 1901, consiguió introducirlas en la técnica, haciendo aplicación práctica de ellas a las comunicaciones inalámbricas a distancia. Pronto hubo de estructurarse jurídicamente este nuevo campo de actividades, y ocurrió, por fortuna, que considerando los técnicos inservibles las ondas inferiores a 200 metros de longitud, se dejó en libertad a los aficionados para utilizarlas. Y vino lo sorprendente: los aficionados conseguían con modesta potencia alcances superiores a los que lograban los técnicos con mejores medios. Fué allí por los años 1921-22 cuando la *onda corta* pudo cruzar el Atlántico y asegurar su triunfo definitivo.

Si las ondas se propagasen estrictamente en línea recta, como es exigencia perentoria de la óptica geométrica, la curvatura de la Tierra constituiría un serio obstáculo para establecer el enlace entre puntos lejanos, puesto que el globo sólido no ha mostrado la menor transparencia por tales ondas. Poco se lograría exageran-

do la elevación de las antenas, y desde luego, dos puntos antípodas estarían siempre absolutamente incomunicables. Por suerte, la Óptica geométrica no lo es todo, y en los fenómenos de difracción se dispone de un recurso capaz de burlar hasta cierto punto sus ordenanzas: efectivamente, los rayos luminosos son capaces de contornear pequeños obstáculos puestos en su camino, para lo cual es preciso que sus dimensiones sean del mismo orden de magnitud que la longitud de onda; es decir, que la inflexión no se hace sensible sino cuando se llega a ese orden de magnitud; pero entonces puede llegar a ser considerable. Era, pues, lógico pensar que, aumentando suficientemente la longitud de onda empleada, las ondas hertzianas podrían adaptarse, en cierto modo, a la curvatura del Globo y llegarían a puntos totalmente desenfados de la emisora; para las ondas muy largas, del orden del radio de la Tierra, esta misma dejaría de ser obstáculo, y la comunicación podría establecerse de antípoda a antípoda. Todo esto es verdad; pero también lo es que el suelo, en general, es buen conductor de la electricidad; de modo que la onda difractada—onda de tierra, como la llaman los técnicos—viene a ser comparable a una propagación por cable, con la consiguiente pérdida por resistencia del conductor. Esta pérdida de energía es tan grande, que en la práctica la onda de tierra queda desvanecida a relativamente muy pocos kilómetros de la emisora. La teoría parece desfavorable a las transmisiones a gran distancia, y, sobre todo, contraria en absoluto a las ondas cortas; exige ondas muy largas y grandes potencias, y, sin embar-

go, la práctica enseña todo lo contrario: los mayores éxitos son para las ondas cortas, aun con escasa potencia. Kennelly y Heaviside tuvieron, independientemente entre sí, una idea genial para resolver la paradoja: imaginaron que en la alta atmósfera debe existir una capa conductora que, actuando a manera de espejo, devuelve hacia el suelo parte de la radiación inicial, que de otro modo se perdería en el espacio cósmico. No es, pues, la difracción lo que permite a las ondas salvar cordilleras y rodear la esfera, sino una cosa mucho más sencilla: la reflexión, allá arriba, en la superficie interna de una cáscara conductora, que parece creada expresamente para tal cometido. El estrato conductor de Kennelly-Heaviside desempeña para las ondas hertzianas un papel parecido al de las famosas bóvedas de secreto de algunos antiguos castillos para las ondas sonoras. La Naturaleza ha sido benévola con nosotros. Si esa capa no existiese, las comunicaciones inalámbricas de largo alcance habrían sido imposibles.

Hemos dicho: *una cosa mucho más sencilla*; mucho más sencilla. No; realmente, la acción de las capas atmosféricas conductoras no es sencilla. No se trata de una verdadera reflexión especular, ni mucho menos. Está bien hablar así en libros de divulgación; pero téngase entendido que eso no pasa de ser una buena comparación. De hecho, la atmósfera no contiene ningún espejo eléctrico, y las cosas ocurren de un modo un poco más complicado que si así fuese. La devolución de las ondas hertzianas por la alta atmósfera es un fenómeno del grupo de los espejismos, comparable, no al espejismo normal del desierto, sino al espejismo inverso de la Fata Morgana.

Prescindiendo de detalles técnicos, que pueden encontrarse en cualquier tratado de radiodifusión, nosotros vamos a ocuparnos aquí del fenómeno desde el punto de vista de la Física atmosférica. En primer lugar, el nombre de *ionosfera* no nos parece muy acertado, y no precisamente por lo que se refiere a la primera raíz, sino a la segunda. Se trata, sí, de un efecto de ionización; pero las regiones ionizadas de la atmósfera no constituyen una capa esférica propiamente dicha. Los astrónomos adoptaron las palabras *fotosfera*, *chromosfera* y *leucosfera* para describir la constitución física del Sol, dando a entender su carácter concrecionado o su disposición en esferas concéntricas sucesivas más o menos homogéneas; los geofísicos les imitaron y describieron la constitución de la Tierra como compuesta de una *endosfera*, una *litosfera* y una

hidrosfera, y los meteorólogos les siguieron, descomponiendo la *atmósfera* en *troposfera* y *estratosfera*. Por si esto fuera poco, vinieron después la *ozonosfera* y la *ionosfera*, que es lo que ahora nos interesa; pero éstas, y sobre todo la última, ya no son estructuras primarias y permanentes, sino zonas o regiones irregulares y cambiantes de la atmósfera, más o menos superpuestas a la *estratosfera* y aun a la *troposfera*. Dondequiera que se encuentre una concentración *anormal* de *iones* hay un *trozo* de la *ionosfera* que dista mucho de poseer aquella continuidad que de su nombre parece deducirse.

* * *

Cuando empezó a crearse la teoría de la electricidad, todos los cuerpos fueron clasificados en dos grandes grupos, por su comportamiento frente al nuevo agente físico, que se llamaron *conductores* y *aisladores*. El segundo nombre fué sustituido más tarde por el de *dieléctricos*, que ha prosperado. El campo electrostático queda detenido por los conductores y se puede establecer sin obstáculo a través de los dieléctricos; los conductores son *agujeros* del campo; los dieléctricos son *soportes* del campo, cuya intensidad condicionan. La acción de un dieléctrico sobre el campo viene expresada por su *constante dieléctrica*, que es la razón entre esta intensidad y la que resultaría en el vacío, supuesta la misma distribución de cargas. Si los dieléctricos son *transparentes* para el campo, los conductores lo son para la carga, y la facilidad con que se dejan atravesar por la electricidad libre, viene medida por un coeficiente ca-

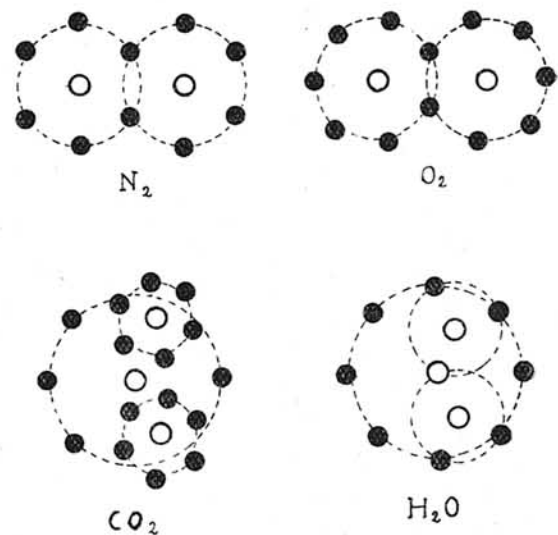


FIGURA 1.

racterístico de cada sustancia, que se llama su *conductibilidad* (inversa de la *resistencia*), y mejor por su *conductividad* (inversa de la *resistividad*), o conductibilidad específica, referida a la unidad de volumen. Como casos extremos ideales podemos considerar el dieléctrico perfecto con conductividad nula y el conductor perfecto con constante dieléctrica nula, que se excluyen recíprocamente. La teoría cinética de la materia ha podido interpretar este estado de cosas en forma muy sugestiva: el conductor perfecto corresponde al estado metálico de la Química-física, que es una forma cristalina y que, por consiguiente, tan sólo pueden adoptar los sólidos: los nudos de la red están ocupados por iones positivos, es decir, por átomos del metal que han perdido sus electrones más externos, mientras que estos electrones, a guisa de iones negativos, circulan libremente por entre las mallas de dicha red, obedeciendo a las leyes de los gases. En ausencia de todo campo eléctrico, el movimiento de los electrones es perfectamente desordenado, manteniéndose un equilibrio estadístico no regido totalmente por el principio de la equipartición de la energía y asegurado por los choques incesantes entre las partículas de signo contrario. La carga total contenida en un pequeño volumen del cuerpo es, naturalmente, nula. Cuando, por el contrario, actúa un campo eléctrico exterior, aparece una componente sis-

temática paralela al campo en el movimiento general, la cual se superpone al movimiento desordenado de carácter térmico. La pérdida de energía causada por los choques del gas electrónico contra el esqueleto cristalino de aniones, constituye la resistencia, la cual resulta función de la temperatura.

Un dieléctrico perfecto está constituido, en ausencia de campo, bien por moléculas bipolares, orientadas desordenadamente, o por moléculas polares. La acción de un campo eléctrico consiste, en el primer caso, en la orientación de los dipolos moleculares, y en el segundo, en la creación de dichos dipolos, por desplazamiento mutuo de los centros de gravedad de los centros positivos con relación a las atmósferas electrónicas que los rodean. En esto consiste la polarización del dieléctrico, siendo la constante dieléctrica, en cierta manera, una medida de la tensión elástica con que las fuerzas de enlace tienden a restablecer el equilibrio normal. Según se ve por lo dicho, dieléctricos y conductores no son términos extremos de una serie gradual de estados, como lo son, por ejemplo, el frío y el calor, sino que son dos propiedades, más o menos compatibles entre sí, que todos los cuerpos poseen en mayor o menor grado. Dicho con otras palabras: la constante dieléctrica y la conductividad son dos coeficientes característicos de cada sustancia que no pueden suplirse uno por el otro ni pueden deducirse uno del otro, y cuyo conocimiento simultáneo hace falta para juzgar del comportamiento de la misma con relación a los fenómenos electromagnéticos. Debe reconocerse, no obstante, que siempre un buen conductor es un mal dieléctrico, y un buen dieléctrico es un mal conductor.

Ahora bien: nuestra atmósfera, ¿es un conductor o un dieléctrico? En condiciones normales es, seguramente, mucho mejor dieléctrico que conductor. Las moléculas del oxígeno y del nitrógeno son de tipo apolar, y la del argón, gas noble, que es monoatómica, todavía más. Solamente la del vapor de agua tiende a ser algo bipolar, aunque poco, y la del anhídrido carbónico, menos aún (véase fig. 1). En estos esquemas se ve cómo tiende a formarse en todos los casos el octeto electrónico exterior estable, configuración propia de los gases nobles, que ofrece notable resistencia a la ionización. La polarización de que son capaces estas moléculas depende casi exclusivamente de la deformación

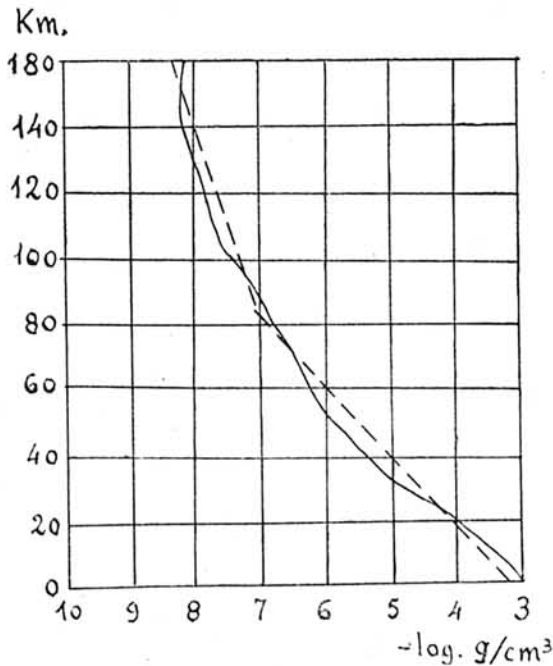


FIGURA 2.

que pueda experimentar esta envoltura electrónica exterior: si en estado normal puede asimilarse a una película esférica de electricidad negativa, cuando se polariza se hace elipsoidal, con el eje mayor dirigido paralelamente al campo exterior, al mismo tiempo que el centro de gravedad de los núcleos positivos queda descentrado con relación a ella.

Cuando el campo exterior oscila periódicamente, que es el caso de las ondas hertzianas (o luminosas), el desplazamiento relativo de los núcleos positivos y de los electrones periféricos se ajustará al mismo ritmo; es decir, las partículas elementales sufrirán un movimiento vibratorio forzado, o, lo que es lo mismo, los dipolos eléctricos moleculares se harán pulsátiles con período igual al de la onda excitatriz, a expensas de su energía y, por tanto, con la consiguiente debilitación de su intensidad. La amplitud decrece exponencialmente con arreglo a la ley

$$h = h_0 \cdot e^{-\frac{2\pi z \cdot x}{\lambda}}$$

donde h_0 es la amplitud inicial, x es la distancia recorrida en el interior del dieléctrico, λ es la longitud de onda y z el llamado coeficiente de amortiguación, que depende de dicha longitud de onda y de la naturaleza de la sustancia. Lo más interesante para nosotros es que entre

este coeficiente, la constante dieléctrica y el índice de refracción existe la relación de Maxwell-Drude:

$$n^2 = \frac{k}{1-z^2}$$

El coeficiente z es despreciable para frecuencias alejadas de las frecuencias propias de la molécula. La frecuencia propia del Nitrógeno corresponde a la longitud de onda de cuatro micras, y la del Oxígeno, a seis; de donde se deduce que para nuestro problema podemos prescindir por completo del efecto de resonancia y tomar como absolutamente válida la relación primitiva de Maxwell: $n = \sqrt{k}$.

Otra cosa ocurre en los conductores. Ya hemos visto que en ellos los electrones libres obedecen a la acción del campo exterior, engendrando una corriente. Si el campo exterior es alternativo, la corriente también lo será, y el entretenimiento de tal movimiento vibratorio consumirá energía, que deberá ser extraído del citado campo y producirá su debilitación; es decir, que la ecuación $n^2 = \frac{k}{1-z^2}$ vuelve a ser válida, estando z enlazada con la conductividad γ de la sustancia por la relación $z^2 = \gamma \frac{\lambda}{c}$, siendo c la velocidad de la luz.

* * *

Para la siguiente discusión podemos suponer que tanto k como z son independientes de la longitud de onda; k dependerá entonces tan sólo de la densidad y de la composición química, y z del estado de ionización. La ley de la variación vertical de la densidad del aire, según P. Lindbergh, viene representada en nuestra figura 2. La curva se adapta bastante bien a una quebrada con su punto anguloso a la altura de unos 80 kilómetros, que coincide con la situación media de la capa de Heaviside (capa E de la nomenclatura actual). La figura 3 representa, según el mismo autor, la composición de la atmósfera, en la cual se observa a la misma altura una zona de transición donde empieza a disociarse la molécula de oxígeno; en dicha zona se mezclan el oxígeno molecular, que predomina por debajo, con el oxígeno atómico, única forma subsistente por encima. Es de suponer que a la altura de la capa de Appleton (capas F₁ y F₂) ocurra una cosa parecida con el nitrógeno, puesto que del espectro de las auroras polares se deduce que a grandes alturas también el nitrógeno se encuentra atomizado. Digamos de pasada que el gas *geocoronio*, inventado en

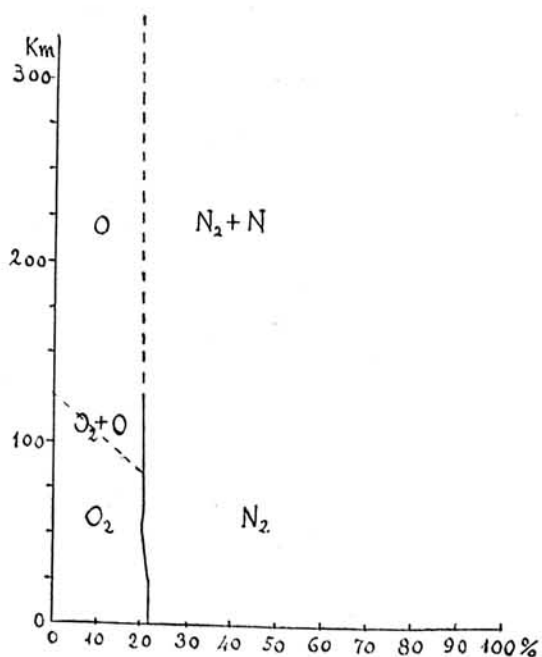


FIGURA 3.

otro tiempo para explicar la presencia en dicho espectro de una raya verde desconocida, no es más que el mismo nitrógeno en un estado especial que le permite emitir dicha raya prohibida en las condiciones ordinarias, según la regla de selección de Sommerfeld. Vemos, pues, que la constante dieléctrica del aire debe sufrir una variación rápida al atravesar los estratos críticos donde ordinariamente se localizan las capas E, F₁ y F₂. Pero no es esto lo más importante. Lo decisivo es la variación de α , es decir, de γ por efecto de la ionización. Dos son los agentes capaces de provocar la ionización gaseosa: las radiaciones corpusculares (rayos catódicos), que dan lugar a la ionización por choque, y las radiaciones electromagnéticas de corta longitud de onda (rayos ultravioleta, rayos γ , rayos cósmicos), que producen el llamado efecto fotoeléctrico. Del Sol llegan a nuestra atmósfera radiaciones de una y otra clase, si bien la acción más importante hay que atribuirle a los rayos ultravioleta. Según la relación de Einstein:

$$h\nu = w_0 + \frac{1}{2} m v^2 \quad (h = \text{constante de Plank,}$$

ν = frecuencia, w_0 = energía de encadenamiento, m = masa del electrón, v = velocidad de proyección del mismo), la energía $h\nu$ de la radiación incidente se emplea en parte para romper la ligadura del electrón a su átomo, y en parte, para comunicarle una velocidad inicial de proyección. De aquí se deduce que para producir efecto la radiación incidente debe poseer, por lo menos, una frecuencia dada por la fórmula

$$\nu_0 = \frac{w_0}{h}. \quad \text{Como sabemos, el átomo de oxígeno}$$

tiene seis electrones externos, y el de nitrógeno tiene cinco; de modo que el primero puede ser ionizado seis veces y el segundo cinco antes de adquirir la configuración estable de los gases nobles. Las frecuencias mínimas dadas por la fórmula anterior, necesarias para ello, caen todas en el extremo violeta del espectro visible, o en el ultravioleta, de manera que la mayor parte de la radiación solar visible resulta ineficaz para producir tal efecto; en cambio, los rayos ultravioleta serán fuertemente absorbidos por los componentes atomizados de la alta atmósfera y empleados en el trabajo de ionización. Teniendo en cuenta que los mismos rayos son también los causantes de la disociación previa de las moléculas de oxígeno y de nitrógeno y que a ellos se debe, además, en colaboración con el ozono, el mantenimiento de una temperatura increíblemente elevada (de varios centenares de grados) en la ionosfera, se comprenderá que

la radiación solar que llega hasta las capas inferiores del aire sea muy pobre en dicha clase de rayos.

Los electrones arrancados a los átomos gaseosos por los rayos ultravioleta del Sol quedan totalmente libres, discurriendo por entre los núcleos positivos restantes a guisa de verdadero gas electrónico, igual que ocurre en el estado metálico. Podríamos decir que salvo la estructura cristalina, que, naturalmente, no puede existir, el oxígeno y el nitrógeno de la ionosfera se encuentran en estado metálico. Dicho con otras palabras: el aire de la alta atmósfera está constituido por una mezcla de oxígeno y nitrógeno ionizados y de electrones libres. Como el libre recorrido medio es muy grande, los choques serán muy raros, y por consiguiente, los casos de recomposición muy poco frecuentes. Si no fuese que la densidad es muy pequeña, la conductibilidad llegaría a ser relativamente muy buena, pues, como ya hemos dicho, cada átomo de oxígeno es capaz de dar hasta seis electrones, y cada uno de nitrógeno, cinco. De aquí resulta, en general, que la conductibilidad crece con la altura, aunque no de una manera continua, pues las alturas críticas, en las cuales la composición o la densidad del aire sufre cambios más o menos bruscos, serán también, por eso mismo, puntos angulosos de la curva conductibilidad-altura.

No se crea que la ionización quede limitada a las capas más elevadas de la atmósfera. Si es verdad que la radiación ultravioleta del Sol queda rápidamente amortiguada a medida que sus rayos penetran hacia las capas profundas, y su efecto ionizante, por este motivo casi anulado, la radioactividad del suelo, insensible en las capas altas, se hace sensible en las bajas. Sin embargo, no sólo la eficacia de las radiaciones radioactivas, por su escasa densidad, es muy inferior a la de los rayos solares ultravioleta, sino que, por las condiciones físicas propias del medio, el tipo de ionización efectiva resulta muy distinto en el aire inferior que en el superior: en el inferior predominan los iones relativamente grandes, de poca movilidad, y los electrones sueltos faltan casi en absoluto, mientras que arriba predominan éstos considerablemente con su movilidad extraordinaria. Los iones más pequeños de que se puede hablar cerca del suelo son de tamaño molecular; en cambio, los mayores de la ionosfera son de tamaño atómico; sin contar con que los de tamaño electrónico son cinco o seis veces más numerosos. Teniendo todo esto en cuenta es posible definir en cierta manera como límite inferior de la ionosfera la altura

a la cual el poder ionizante de los rayos solares queda extinguido; a esa altura la conductibilidad eléctrica del aire experimenta un rápido incremento. Durante el día este límite se encuentra muy cerca del suelo, mientras que por la noche retrocede hasta una altura de 80 a 100 kilómetros, como es bien sabido de todos los aficionados a la radio. El mecanismo de esta fluctuación diurna es elemental: el número de iones presentes en un instante dado resulta de un equilibrio estadístico; por un lado, el agente ionizante los produce sin cesar, y por otro, la recombinación por choque los destruye. Suponiendo que el poder penetrante de la radiación solar sea de x kilómetros de aire, su límite inferior formará una superficie en el interior de la atmósfera, tal como la representada por la línea de puntos de la figura 4. Durante la noche la

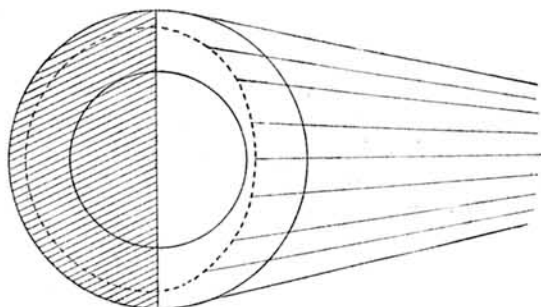


FIGURA 4.

recomposición en las capas inferiores es muy activa, mientras que a cierta altura, según antes hemos hecho notar, resulta prácticamente nula a causa del excesivo enrarecimiento; por eso el límite de la ionosfera en la porción nocturna del planeta queda fijado a una altura que fluctúa poco, que no es otra cosa que el espejo de Heavyside. Algo parecido podría decirse de las capas de Appleton.

* * *

Ahora estamos en condiciones de explicar el comportamiento de las ondas hertzianas, que se propagan en el interior de la atmósfera, y en particular su inflexión en el seno de la ionosfera. Hemos visto que no se trata de una verdadera reflexión, en el sentido estricto de la palabra, pues las capas ionizadas no están separadas de las capas dieléctricas por ninguna auténtica superficie de discontinuidad; se trata de la propagación a través de un medio a la vez dieléctrico y conductor en grado variable, es decir, heterogéneo. El índice de refracción n , que depende a la vez de la constante dieléctrica y del

coeficiente de conductibilidad, será, pues, función de la altura. La constante dieléctrica depende, como sabemos, de la constitución química y de la densidad; decrece con ésta, es decir, con la altura. La conductibilidad aumenta con el grado de ionización, y por lo mismo crece con la altura, sobre todo al penetrar en la ionosfera, siendo su repercusión sobre el valor de n mucho más decisivo. Cualitativamente, la curva representativa índice-altura tendrá un aspecto parecido al de la figura 5.

Dentro de un medio homogéneo, o sea de índice constante, las ondas se propagan en línea recta; la refracción sólo tiene lugar cuando cambia el índice, bien sea bruscamente, como cuando dos medios homogéneos distintos se encuentran en contacto, bien continuamente en el interior de un medio heterogéneo; es decir, que lo que tiene importancia para imprimir a las ondas un cambio de dirección no es el valor absoluto del índice, sino su gradiente. Fermat dió la solución general del problema, demostrando que la trayectoria de una onda cumple la condición $\int_1^2 n \cdot ds = \text{mínimo}$, siendo 1 y 2 dos puntos cualesquiera de la misma trayectoria, y ds el elemento lineal tomado sobre la misma; y entendiéndose que el mínimo significa que las inte-

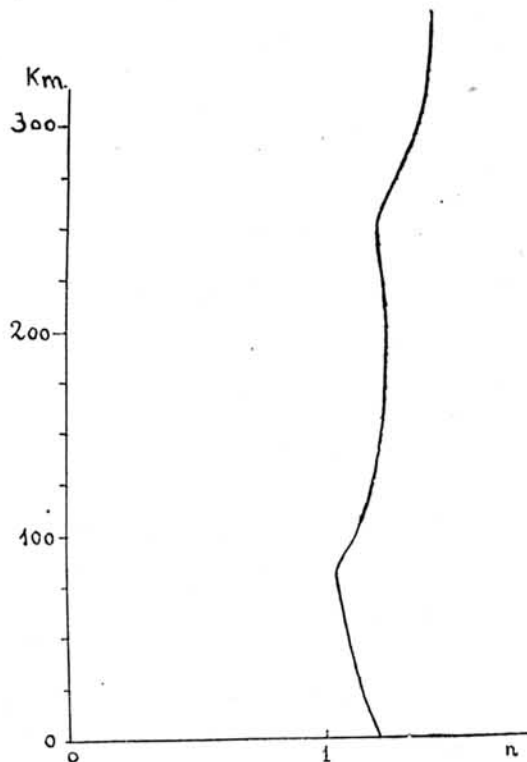


FIGURA 5.

grales tomadas sobre otras curvas infinitamente próximas a la trayectoria y que pasen por los mismos puntos 1 y 2, tienen valores superiores a) de la integral tomada sobre la trayectoria. Por otra parte, Hamilton llamó al atención sobre la identidad formal de este principio y el de Maupertuis o de la mínima acción utilizado en Mecánica, y que puede expresarse así: $\int_1^2 p \cdot ds =$ mínimo, que significa que la integral del impulso de una partícula a lo largo de su trayectoria real y entre dos puntos cualesquiera de la misma, es menor que la misma integral tomada a lo largo de una trayectoria virtual infinitamente próxima. De Broglie ha partido de esta analogía, interpretada físicamente, para poner el fundamento de la Mecánica ondulatoria, que ha revolucionado la Física. Ahora podemos invertir los términos de la cuestión: si se conoce la distribución de n en el espacio, se puede calcular un potencial que cumpla la condición de que

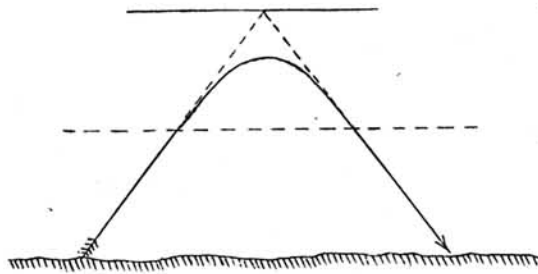


FIGURA 6.

una partícula material de masa arbitraria m recorra en dicho campo una trayectoria idéntica a la de un rayo luminoso en el medio de índice n . Para ello escribimos la integral de la acción de la forma

$$\int 2 \frac{E - P}{v} ds,$$

siendo E la energía total, P la potencial y v la velocidad. Además se tiene, según la Mecánica ondulatoria,

$$E = h\nu, \quad p = mv = \frac{h}{\lambda};$$

de donde sustituyendo

$$\int 2 \frac{h\nu - P}{m\lambda} ds,$$

y, por tanto,

$$n = 2 \frac{h\nu - P}{m\lambda},$$

o bien

$$P = h\nu - n \frac{h}{2m\lambda};$$

y teniendo presente que

$$v = \frac{nc}{\lambda},$$

será

$$V = \frac{nh}{\lambda} \left(c - \frac{1}{2m} \right),$$

lo que significa que el potencial es sencillamente proporcional al índice, si se desprecia la variación de λ . Por tanto, en un medio homogéneo o de índice constante la propagación es rectilínea, porque el potencial también resulta constante, y un móvil que conserva su energía y se mueve en un campo equipotencial recorre una trayectoria rectilínea. Dentro de la ionosfera podemos admitir en primera aproximación que el índice crece linealmente con la altura, y por tanto, un rayo electromagnético se comportará allí como un grave en un campo gravitatorio uniforme; es decir, como un proyectil. La trayectoria será, pues, parabólica. Un rayo electromagnético, disparado oblicuamente por una emisora, marchará sin desviarse sensiblemente durante su recorrido troposférico o estratosférico; pero al penetrar en la capa de Heaviside describirá una parábola con un ángulo de elevación igual al ángulo de partida, una amplitud y una flecha calculables por las fórmulas de la Balística, y penetrará de nuevo en los estratos de ionización constante sin sufrir ya nuevas desviaciones, pudiendo entonces ser recogido por un receptor adecuadamente colocado. Si se prolongan las direcciones inicial y final, que son tangentes a la porción parabólica, quedará determinado un punto cuya cota se llama altura virtual de la capa de Heaviside, porque todo ocurre como si el camino fuese constantemente rectilíneo y en dicho punto se encontrase un espejo metálico, que produciría una sencilla reflexión (fig. 6). Como se ve y habíamos ya antes anticipado, el proceso es enteramente semejante al fenómeno del espejismo. Si se examina con atención, se verá que no es correcto echar mano de la reflexión total para explicar estos fenómenos. La reflexión total no tiene lugar; la trayectoria no presenta en el vértice ningún punto anguloso, sino una tangente horizontal, y el retroceso no tiene lugar en ninguna superficie límite, sino dentro de la masa transparente, que puede suponerse de espesor infinito y que no ofrece en aquel punto particular ninguna singularidad de ninguna clase; el gradiente del índice de refracción, causa única

del suceso, tienen allí el mismo valor constante que en el resto de la masa. La reflexión total debe considerarse, pues, como algo esencialmente distinto. En cambio, no hay inconveniente en incluir dentro de la misma teoría anterior la reflexión metálica: en ésta el rayo incidente penetra algo en el interior de la capa límite y sufre en ella una desviación *continua*, que acaba por invertir el sentido después de un curso muy breve, porque el gradiente del índice en dicha capa es muy grande; pero que el espesor sea del orden de la décima o de la centésima de micra en el caso de un espejo metálico, o del orden de la decena de kilómetros en el de la capa de

Heaviside, eso no altera la naturaleza de las cosas; sólo son diferencias de grado. Entendidas así las cosas, no tenemos ahora inconveniente en corregir algo de lo que dijimos al empezar: la capa de Heaviside, y lo mismo puede decirse de las de Appleton, es para nosotros un verdadero espejo metálico, algo grueso si se quiere, pero que parece expresamente dispuesto para *canalizar* las ondas hertzianas, que gracias a él quedan aprisionadas entre dos conductores concéntricos (el otro es la superficie terrestre), al modo como una trompetilla acústica canaliza el sonido mediante sucesivas reflexiones contra sus paredes.

¿Nuevas tácticas de combate para aviones de reacción?

El hecho de que ningún avión de reacción ha sido capaz de disparar con éxito una ametralladora, un cohete o un cañón, según las exigencias del combate, es algo que se ha puesto ya de manifiesto. Como resultado de esto, la Fuerza Aérea de Estados Unidos ha ordenado que se aceleren grandemente los experimentos en sus cazas de reacción "P-80". Hace tiempo, después de pruebas intensas, se consideró que se había encontrado la solución favorable para el funcionamiento de la ametralladora de un "P-80". Desde un aeroplano que volaba a una velocidad de 800 kilómetros por hora se dispararon los últimos cartuchos de una serie de 10.000 con una ametralladora de calibre 15,25, sin que el montaje de la misma se resintiera por ello. Sin embargo, las autoridades aeronáuticas admiten que el disparar cohetes y cañones desde aviones de propulsión por reacción constituye sendos problemas todavía no resueltos.

Otro importante problema que preocupa es el de cómo modificar la táctica del combate aéreo de manera que esta nueva potencia de fuego pueda ser utilizada lo mejor posible.

Uno de los problemas lo constituye el ametrallamiento en vuelo rasante. La ametralladora del 15,25, construída por la Dirección de Armamento, puede disparar a un ritmo doblemente rápido que la antigua de 12,7. Pero con la nueva arma, en un experimento llevado a cabo con un avión de

propulsión por reacción que volaba a una velocidad de cerca de 900 kilómetros por hora en vuelo rasante, los impactos se distanciaban entre sí unos 15 metros sobre la zona del blanco horizontal, y esto no puede decirse que constituya un resultado satisfactorio. No se logra una concentración de fuego suficiente para provocar daños.

Otro problema no resuelto es el de la precisión o exactitud. Dos aviones que vuelen a una velocidad aproximada de 900 kilómetros por hora, se acercan uno a otro a la de 1.800 kilómetros por hora aproximadamente. A esta velocidad se cruzan y pasan uno sobre otro antes de que el piloto haya tenido tiempo de apuntar al otro aeroplano.

El duelo aéreo entre dos aviones de reacción es imposible. El avión de reacción debe girar describiendo un arco tan amplio que en el espacio de tiempo que emplea un piloto en hacer virar a su avión para disparar una ráfaga contra el enemigo, se encontrará tan alejado, que ya no estará en condiciones de volver a hallar en el cielo a su enemigo.

Los técnicos americanos están todos de acuerdo en que la "velocidad" y la "sorpresa" son los elementos más útiles de los cazas de reacción. Sin embargo, los procedimientos de localización mediante el "radar" se han perfeccionado tanto, que la eventualidad de la sorpresa puede decirse que ha quedado completamente eliminada.