

R. 5.181.218

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

JOSE GARMENDIA IRAUNDEGUI



LA CIRCULACION GENERAL DE LA ATMOSFERA Y OTROS PROBLEMAS DE LA FISICA

Discurso pronunciado en la solemne
apertura del Curso Académico 1970-1971



SALAMANCA

1970

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

JOSÉ GARRANDIA IRANDEGUT



LA CIRCULACION GENERAL
DE LA ATMOSFERA Y OTROS
PROBLEMAS DE LA FISICA

Discurso pronunciado en la solemnidad
de apertura del Curso Académico 1970-1971



Depósito legal: S. 266 - 1970

MAGNÍFICO Y EXCELENTÍSIMO SEÑOR RECTOR,

EXCELENTÍSIMAS AUTORIDADES,

QUERIDOS COMPAÑEROS Y ALUMNOS,

SEÑORAS Y SEÑORES:

Ya avanzado el curso anterior me fue comunicado por las autoridades académicas, que me correspondía dar esta lección de apertura. El primer problema que se me planteó entonces, fue la elección del tema. Supongo que lo mismo habrá ocurrido a los compañeros que me precedieron, sobre todo a los que, como yo, explican asignaturas complementarias de las carreras que se desarrollan en esta Universidad.

En mi especialidad (Física del Aire) hay temas de gran actualidad como son: los cambios de clima, la contaminación atmosférica, la salud y el tiempo, la predicción a largo plazo, la lluvia artificial, etc... Cualquiera de estos puntos o cualquiera de los que se han tratado en el 5.º Congreso internacional de las ciencias atmosféricas, celebrado en Washington el pasado mes de agosto, podría haberme servido como tema de esta lección.

Pero me decidí al fin por el de «La circulación general de la atmósfera», teniendo en cuenta que es una cuestión considerada como muy fundamental por los especialistas y que dentro de la aridez de mi asignatura pudiera resultar interesante y asequible para este auditorio.

Por último, como representante del único Departamento de Física, creo un deber exponer a Vds., aunque sea brevemente, los grandes problemas contemporáneos de la Física y destacar el problema hondo que tiene en esta Universidad.

SIGNIFICADO DE LA CIRCULACION GENERAL

El término *circulación general*¹ se refiere comúnmente a los grandes sistemas de vientos del mundo, a los sistemas más o menos permanentes de la troposfera y de la estratosfera. Una visión más completa se refiere al estado de la atmósfera, no sólo en sus campos de movimientos sino en lo referente a la temperatura, presión, humedad, radiación, etc., factores que se relacionan y los que, por tanto, no se pueden omitir para dar una explicación completa.

Hasta hace poco, por la dificultad de experimentar en Meteorología, se acostumbraba a describir los campos de los elementos meteorológicos, como resultado de los promedios en intervalos largos de tiempo. También se ha promediado con respecto a la longitud o a la vez con respecto al tiempo y a la longitud.

La característica más acusada de la circulación es su inconstancia o movilidad. Con respecto a la duración tenemos fluctuaciones para diversas escalas de intervalos de tiempo, desde las ráfagas y calmas de corta duración de los vientos locales, el desarrollo y desintegración de las tormentas individuales, el paso y desarrollo de los ciclones y anticiclones, etc., hasta los cambios universales como los glaciares continentales que avanzan y retroceden.

El término de circulación general se refiere, en un primer paso, a los promedios realizados únicamente con respecto al tiempo. A esta categoría pertenece el fenómeno de los vientos monzones asiáticos de verano e invierno.

Se suelen considerar regiones extensas, comprendidas entre paralelos terrestres próximos, que constituyen la llamada «zona», y caracterizarlas realizando únicamente promedios con respecto a la longitud geográfica (promedio zonal). Así «movimien-

¹ Bibliografía fundamental: A. L. Kats: «Stratospheric and mesospheric circulation». Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1970; E. N. Lorenz: «The nature and theory of the general circulation of the atmosphere». W. M. O., 1967; E. Palmen, C. W. Newton: «Atmospheric circulation systems». Academic Press, 1969; S. Petterssen: «Introduction to meteorology» 3.ª edición. Mc. Graw Hill book Company, 1969.

to zonal» significa el movimiento paralelo a las zonas o a los planos paralelos. Su intensidad se representa con la diferencia de presión entre dos círculos de latitud, por ejemplo 35.° y 55.° N, y esta diferencia se llama *índice zonal*. El promedio zonal del movimiento zonal se denomina circulación zonal. Los promedios realizados únicamente con respecto a la longitud nos muestran las fluctuaciones de los índices zonales.

Lo más corriente ha sido restringir el término circulación general a los promedios simultáneos con respecto al tiempo y a la longitud. La duración del tiempo es al menos de un año. Un hecho típico de este promedio son los vientos alisios.

Pero en un sentido más amplio podemos añadir a las categorías o valores estadísticos antes mencionados otros hechos o fenómenos, que se presentan cuando no promediamos las variables principales. Fenómenos típicos de esta categoría son los ciclones móviles. Muchos de estos hechos se consideran como circulaciones secundarias.

TECNICAS DE OBSERVACION

En estos años se está celebrando el I centenario de varios servicios meteorológicos nacionales. Concretamente Hungría y Estados Unidos de América lo han celebrado en 1970. Las primeras observaciones meteorológicas de España se realizaron en las universidades e institutos. El Observatorio de Madrid se encargó desde el año 1860 de recopilar todas aquellas observaciones y de publicarlas. Media docena de naciones han cumplido ya su centenario y, en consecuencia, precedieron al país más poderoso del mundo. En 1873 funcionaban unos veinte servicios meteorológicos nacionales.

Sin embargo, años antes se habían preocupado de los fenómenos meteorológicos gentes con espíritu científico y visión del porvenir. Se dieron cuenta de que la meteorología es una ciencia de cooperación internacional y ésta es su característica esencial. Precisamente los que viajaban por el mundo entero, los navegantes, los marinos, por la necesidad de aprovechar los vientos para su método de navegación a vela, fueron los primeros que se especializaron, analizando los datos acumulados

acerca de los vientos del globo y de las corrientes oceánicas y procurando dar un modelo matemático explicativo.

Estos primeros datos se limitaban únicamente a la superficie terrestre. A finales del siglo pasado, empezaron con regularidad las observaciones con *cometas*. Es un acontecimiento importante puesto que señala el comienzo de las observaciones tridimensionales.

A principios de este siglo se comenzó con el programa de *globos pilotos* o globos libres que aún está en uso. Se suelta un globo ajustado con fuerza ascensional constante y se le sigue con un teodolito, realizando en tiempos determinados la observación de su posición. El inconveniente mayor es su limitado alcance por dos motivos: el estallido del globo y su desaparición entre las nubes.

Hacia 1925 se iniciaron los sondeos regulares con *aviones*. Estos llevaban aparatos registradores de presión, temperatura y humedad. No era obstáculo la presencia de las nubes y ampliaban los tipos de observaciones. Hoy no se usa este método para observaciones rutinarias, pero sí para estudios particulares llevando instrumentos especiales para determinar las medidas de las variables o elementos meteorológicos que interesan en los estudios de las tormentas, de los fenómenos eléctricos, de la formación de hielo, etc.

En 1932 se hizo el primer sondeo con *radiosonda* y a partir de 1936 los centros de observaciones con aeroplano fueron transformándose en estaciones de radiosondas. Un globo, mayor que el usado para globos pilotos, lleva un detector de temperatura, humedad y presión y transmite automáticamente sus registros, que se escuchan en una estación sobre la superficie terrestre, permitiendo conocer al momento sus informes y calcular el viento. España hace regularmente sondeos de este tipo en la Coruña, Madrid, Palma de Mallorca y Santa Cruz de Tenerife y la península se completa con datos de los radiosondeos realizados en Gibraltar y Lisboa. Los modelos de estos aparatos son muy variados y su uso representa un gran avance con respecto al de los aviones, puesto que su seguridad no depende del estado del tiempo y se alcanzan altitudes de unos 30 km.

Aunque más programado para otros problemas meteoroló-

gicos, también ha aportado datos para la circulación general el uso de los *radars* y *cohetes* de gran alcance. El coste de estas técnicas, cada vez más bajo, ha permitido a partir de 1957 extender su uso a más lugares. Sin embargo, no vamos a detallar aquí su teoría y técnica que nos llevaría a alargar excesivamente esta exposición. Solamente diremos que España hace esporádicamente lanzamientos de cohetes en Arenosillo (Huelva) y que permiten obtener datos meteorológicos hasta los 80 km de altitud.

SATELITES METEOROLOGICOS

El gran avance de nuestros tiempos lo constituyen los satélites. Los rusos están lanzando continuamente sus satélites, serie Cosmos, que además de aparatos para otros fines llevan instrumental meteorológico. El 1 de abril de 1960 lanzó EE. UU. el primer satélite meteorológico perteneciente a la serie denominada *Tiros*. Su fin era la identificación y persecución, día a día, de fenómenos meteorológicos individualizados, tales como ciclones, sistemas frontales, corrientes en chorro, etc., a escala mundial. El equipo técnico a bordo de los satélites, al igual que los métodos de elaboración y transmisión de datos, van perfeccionándose sucesivamente.

A un proyecto de nave espacial (una especie de observatorio meteorológico espacioso y adaptable) pertenece la serie de satélites NIMBUS. Su descripción nos llevaría muy lejos. Basta decir que están a unos 1.100 km de altitud, con el plano de órbita inclinado 98,7 grados respecto al ecuador. Con ellos se logra medir la variación de la temperatura con la altura; se observan las nubes con gran detalle y se transmiten sus imágenes al suelo, tanto de día como de noche, a radiorreceptores locales, por el sistema APT (Automatic Photographic Transmission). Se registra también la radiación telúrica emitida y la solar reflejada. Sin embargo, la observación de los vientos desde los satélites es muy difícil. Se ha logrado en condiciones muy especiales, deduciendo de las observaciones de nubes, con los satélites AIS, cuyo primer ejemplar fue lanzado en diciembre de 1966. Este tipo de satélite no está, sin embargo, diseñado específicamente para

hacer observaciones meteorológicas y efectúa otros tipos de medidas con otros fines.

Actualmente se está lanzando otra serie o generación de satélites correspondiente al proyecto ESSA (Environmental Science Services Administration) lo que ha supuesto crear formalmente en EE. UU el sistema de funcionamiento de satélites meteorológicos.

En resumen, este tipo de observaciones tiene la máxima espectacularidad y aún no se ha terminado de sacar el provecho total.

SONDEOS HORIZONTALES CON GLOBOS

Las observaciones y datos cuantitativos globales se consideran, desde hace tiempo, necesarios para el estudio de la circulación general. Ni los sondeos realizados con la red actual de observatorios, ni los satélites enviando sus fotografías, pueden suministrarnos los datos referentes a los vientos, presión, temperatura y humedad con el detalle necesario para una descripción física adecuada de la atmósfera.

Para ello se ha pensado en un sistema de sondeos horizontales a escala de nuestro planeta. Su fundamento es el siguiente: una flota de globos a nivel constante en alturas apropiadas se localiza por un sistema conveniente de satélites. Las razones son las siguientes:

- 1) Un sistema de observación global es impracticable económicamente mediante una red adecuada de los radio-sondeos actuales.
- 2) Los satélites no son capaces aún de suministrar el elemento viento, que es absolutamente necesario para dilucidar la circulación general.
- 3) Los globos con vuelo libre a nivel constante nos suministran el viento horizontal, a la par que actúan como plataformas para medir otros elementos de la atmósfera.

Se están desarrollando tres sistemas de localización e interrogación de globos conocidos con los nombres de IRLS, EOLE

y OPLE y se han llevado a efecto experiencias con el sistema GHOST.

La localización del globo en el sistema GHOST (Global Horizontal Sounding Technique) se hace así: cada globo emite una señal morse de identificación mediante un emisor de radiominiatura alimentado por pilas solares. Los tiempos de transmisión de la señal se regulan por una célula fotoeléctrica, cuya resistencia depende de la altura del sol. Emiten en una frecuencia de 15.025 Kc/s y se oye a distancias de 5.000 km. En la experiencia realizada para el hemisferio sur la escucha estaba asegurada por 3 estaciones receptoras. La caja del equipo electrónico pesa sólo 90 gr.

El sistema IRLS (Interrogation, Recording and Location Systems) se basa en crear un esquema de llamada digital que sería suficientemente flexible para acomodar a un gran número de plataformas o niveles e incorporar a la memoria del satélite una serie de programas. La función característica es la localización del globo por el satélite. Se ha utilizado por primera vez con el satélite Nimbus B a últimos de 1967 y primeros de 1968.

El sistema EOLE es un proyecto conjunto entre Francia y Estados Unidos. La localización de los globos se hace por la medida de la desviación Doppler de una señal muy estable emitida por el satélite y reflejada por el globo.

El sistema OPLE (Omega Position Locating Experiment) aplica el sistema Omega, que es un sistema VLF de localización por radio de barcos y aviones. El sistema hace uso de la propiedad de que el espectro VLF, alrededor de 10 KHz, presenta muy pequeña atenuación y una estabilidad de fase excepcional sobre la mayor parte del mundo. El sistema OPLE consta de un centro de control, de una estación de mando y adquisición de datos y un transmisor de VHF. Se cubren todas las posiciones de la tierra mediante tres satélites sincrónicos situados e inclinados con ángulo conveniente.

La prueba de los sistemas EOLE y GHOST se ha realizado con experiencias muy prometedoras a niveles de 500, 200 y 30 mb. La vida media es muy grande a niveles por encima de



200 mb. A niveles bajos se presenta el problema de formación de hielo.

ESTACIONES AUTOMATICAS DE SUPERFICIE

Desde hace tiempo se experimenta en muchos países con las estaciones automáticas para obtener informes y datos superficiales en áreas montañosas, regiones polares, etc. En ambientes suaves, como las islas de latitudes medias o tropicales, tales estaciones funcionan durante períodos de un año. Tienen un enlace con su base por alta frecuencia. Están programadas para transmitir sus datos a horas determinadas, con posibilidad de interrogarlas por radio desde la base.

También se han montado estaciones automáticas sobre barcos. En el mar se ha intensificado el uso de boyas con larga vida capaces para un gran número de observaciones. Igualmente se ensayan boyas más ligeras que flotan libremente.

Todos estos sistemas de observación siguen usándose. Es natural que su desarrollo y extensión dependa de los fines para los que se utilizan y en última instancia de la relación eficacia/coste, cuya valoración, sobre todo del numerador, tiene sus dificultades para ser realista.

TRAZADORES

Otro método que se ha ideado para tener mayor conocimiento de la circulación es el seguir directamente el movimiento continuo de las partículas y sus interacciones para revelar de esa manera los cambios de propiedad que sufren. Para ello se usan los *trazadores*, es decir, sustancias que mantienen su identidad cuando se mueven con el aire desde una fuente conocida, donde el trazador se crea o se introduce en la atmósfera, hasta un pozo o sumidero conocido, donde se le destruye o se le elimina de la atmósfera. Los trazadores ideales, o sea, que cumplan fielmente su fin, son difíciles de encontrar o de inventar. Debido a que en el aire los movimientos verticales del orden de 1 mm/seg a 1 cm/seg son de importancia, la elección de trazadores está muy limitada. Los trazadores más usa-

dos en la atmósfera son: el vapor de agua, el ozono, las materias radioactivas y los aerosoles.

El *vapor de agua* a altitudes por encima de la alta troposfera se encuentra a bajas concentraciones y su determinación resulta difícil. El higrómetro del punto de escarcha o de temperatura de sublimación de Dobson-Brewer (1946) mide con error inferior a 1° C por debajo de -80° C. La espectrometría de infrarrojos da también resultados aceptables para los valores de la cantidad de vapor de agua.

El *ozono* ha sido el trazador más explotado. Su medida se hace con el espectro-fotómetro ultravioleta de Dobson (1953) y con el método Umkehr.

Las determinaciones de *materia radioactiva* de origen natural (suelo y rocas) o artificial (bombas nucleares) en la atmósfera han permitido interpretar los movimientos del aire. Por ejemplo, la razón de Ce^{144}/Cs^{137} indica la edad y origen de los restos radioactivos.

La distribución vertical media de los núcleos pequeños de condensación de Aitken (partículas de diámetro inferior a 0,1 $m\mu$) y de los *aerosoles* ha permitido tener una información y resultados sorprendentes.

VIENTOS DE ZONA

Vamos a describir los aspectos generales y hechos salientes conocidos hoy día gracias a las técnicas mencionadas. En ambas estaciones y hemisferios hay zonas de vientos del este a baja latitud. Es decir, la Tierra se mueve más de prisa que el aire, de manera que observamos vientos de componente este. Estas dos zonas se llaman cinturones de los *alisios* y abarcan un área extensa entre 30° norte y 30° sur. En el hemisferio norte vemos los vientos alisios del nordeste y en el hemisferio sur los vientos alisios del sudeste. Ambos alisios convergen hacia el ecuador donde se encuentra un anillo de calmas o vientos flojos y variables. Esta zona se llama corrientemente de convergencia intertropical, o cinturón de las *calmas ecuatoriales*.

En las latitudes medias (norte y sur) el aire se mueve más de prisa que la Tierra, de manera que los vientos tienen com-

ponente oeste. Estas dos zonas, comprendidas aproximadamente entre los paralelos 33° y 55°, se llaman cinturones de los *oestes dominantes*.

En cada hemisferio existe la separación de las zonas de flujo zonal medio del este y del oeste. El aire se mueve con una velocidad igual a la de la Tierra y hay vientos flojos y variables, apreciándose, a unos 30° de latitud (norte y sur), un *anillo de calmas*.

En las latitudes próximas a los dos polos encontramos vientos superficiales del este y constituyen los cinturones de los *estes polares*.

La separación entre los oestes dominantes y los estes polares es una zona de vientos de dirección y velocidad variables con frecuentes tempestades móviles.

La distribución de tierras y mares y, sobre todo, las influencias debidas a las principales barreras montañosas modifican considerablemente el esquema anterior basado en una tierra uniforme y lisa.

DISTRIBUCION DE LA PRESION MEDIA

Un hecho notable de la circulación general es el equilibrio *hidrostático*, o sea, el equilibrio entre la fuerza de gravedad y el gradiente vertical de presión y el equilibrio *geostrófico*, o sea, equilibrio aproximado entre la fuerza de Coriolis y la fuerza de gradiente horizontal de presión.

A los vientos antes señalados correspondería la siguiente distribución de presiones. Un anillo de presiones relativamente bajas rodeando al ecuador (cinturón ecuatorial de bajas presiones); un cinturón de altas presiones a unos 30° norte y sur (anticiclones subtropicales); un cinturón de bajas presiones en las latitudes subpolares (ciclones subpolares); y un casquete de presiones altas sobre cada polo (anticiclones polares).

Por ser mucho mayor la capacidad conductora de los océanos que la de las masas de tierra firme, ésta se calienta en primavera mucho más de prisa que los océanos y, en consecuencia, las presiones bajan en la tierra firme y aumentan sobre el mar. En otoño, las tierras se enfrían más de prisa que

los océanos y por ello las presiones altas se desarrollan en los continentes. Así para tener la distribución real de presiones hay que tener en cuenta a la vez la distribución zonal, señalada al principio, y los efectos de océanos y continentes.

Como el hemisferio sur es predominantemente oceánico y, por tanto, se asemeja a la suposición de tierra lisa y de composición uniforme, predomina en él la distribución zonal. Sin embargo, en el hemisferio norte es considerable la influencia de la presencia de tierras con cordilleras extensas. Por ello en este hemisferio la presión media al nivel del mar tiene en invierno los caracteres principales siguientes:

1. El cinturón subtropical de altas presiones se encuentra con regularidad sobre los océanos, siendo una excepción el Mediterráneo, que es caliente en relación a la Europa fría.

2. El alta continental fría sobre Asia es muy potente y está adherida a las laderas de las montañas desde el mar Caspio por el sudoeste, a la Cordillera de Anadir por el nordeste.

3. El cinturón subtropical de altas presiones se presenta asimismo en Norteamérica y por efecto de las Montañas Rocosas tiende a eliminar la baja presión subpolar.

4. El cinturón subpolar de bajas presiones se intensifica al norte de los océanos del hemisferio norte. En el Atlántico el área de bajas presiones se llama baja de Islandia y en el Pacífico, baja de las Aleutinas.

5. El anticiclón polar se desplaza algo hacia las montañas de Alaska y por el continente americano tiende a fundirse con el anticiclón subtropical por lo dicho anteriormente.

En verano, los contrastes entre océanos y continentes son moderados, y la distribución de temperatura es más simétrica. Aun así hemos de destacar el cambio de invierno a verano sobre la Siberia central con un descenso de presión de 20 a 25 mb, el aumento de unos 10 mb en las bajas de Islandia y Aleutinas, y la aparición de áreas grandes de bajas presiones sobre las masas terrestres recalentadas sobre Africa del Norte, Arabia, Sur de Asia, Arizona y Norte de Méjico.

PRESION Y VIENTOS EN ALTURA

Los regímenes de altura y superficie están relacionados y la conexión entre ellos es según la ecuación hidrostática a través de la temperatura media de la columna de aire comprendido entre los dos niveles.

Si la temperatura media fuese constante la distribución de las presiones y la de los vientos en lo alto sería la misma que abajo. Ahora bien, la masa de aire contenida entre dos niveles en un cilindro de sección determinada es variable según la temperatura. Si el aire es caliente pesa menos que si es frío. En consecuencia, las diferencias de presiones entre ambos niveles son diferentes con masas distintas de aire. Si el aire es frío disminuye más rápidamente la presión con la altura que si el aire es caliente. Así, al nivel de los 3.000 m. se observa:

1. Las áreas de presiones altas sobre los polos se han transformado en zonas de presiones bajas.

2. Las altas presiones del cinturón subtropical tienen su eje inclinado también hacia el sur (lado caliente) y a 3.000 metros está 10° a 15° al sur de su posición al nivel del mar. Así, a unos 20° de latitud hay un cinturón de altas presiones.

3. El eje del alta fría continental sobre Siberia se inclina hacia el sur, donde está la parte caliente, y ha perdido ese carácter de alta.

En resumen, la distribución de presiones en altura es mucho más simple que al nivel del mar. Como consecuencia, entre los 30° y 70° de latitud hay una ancha y fuerte corriente del oeste. Al nivel del mar los vientos más fuertes se encuentran a unos 45° norte y el eje de velocidad máxima del viento se inclina hacia el sur al subir, de manera que a unos 12 a 14 km está a la latitud de 28° norte. A unos 20° de latitud los vientos son flojos y variables. Más cerca del ecuador los vientos son del este.

En verano los contrastes de temperatura entre polo y ecuador son menores y en consecuencia los vientos son más débiles. Los vientos más fuertes están a unos 42° norte. Unica-

mente debemos destacar que en Sudasia se mantiene aún la baja caliente del monzón, aunque muy debilitada. A alturas de 12 km, la corriente del oeste se fortalece y se dispone más en círculo. Las irregularidades debidas a sierras y mares han desaparecido. El cinturón de altas presiones está más cerca de su polo (25°).

A alturas superiores, en la estratosfera (10 a 50 km) y mesosfera (50 a 80 km) los datos disponibles son menos seguros. Los efectos estacionales son aparentemente muy fuertes. En invierno se presenta un torbellino de vientos fuertes circumpolares del W, comúnmente denominado corriente del chorro estratosférico invernal o de noche polar (con baja fría centrada en el polo). Parece ser la continuación del campo de viento en la capa inferior. En verano, aparece un torbellino circumpolar de vientos del este, más débiles que los del oeste, pero fuertes también y el eje del chorro está a una latitud notablemente más baja. Hay una alta presión centrada cerca del polo. Los meses de abril y octubre son de transición con una circulación generalmente débil.

La circulación de la estratosfera tropical tiene interés especial porque observaciones y estudios de los últimos años han revelado una variación de la dirección del viento zonal con un período de unos 26 meses que actualmente se denomina «oscilación del viento estratosférico ecuatorial». He aquí sus principales caracteres:

1. La componente del viento zonal en la estratosfera ecuatorial varía entre el este y el oeste con un período aproximado de 26 meses.
2. La mayor amplitud de la oscilación se presenta a unos 25 km.
3. La oscilación ocurre simultáneamente en ambos hemisferios y es escasamente detectable a 30° de latitud.

DISTRIBUCION DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS

La temperatura al nivel del mar disminuye fuertemente desde el ecuador al polo. En enero los 290° K abarcan de los

25° N hasta los 40° S y en julio desde los 50° N hasta los 25° S. El gradiente vertical es uniforme en latitudes bajas y medias. El principal hecho es la separación de la atmósfera en la *troposfera*, parte más baja donde la temperatura decrece con la altura (excepto en el invierno de las regiones polares), y la *estratosfera*, parte superior donde la temperatura no decrece (excepto otra vez en las regiones polares en el invierno). La tropopausa, superficie que separa estas regiones, no está definida netamente en los campos promediados y oscila entre 9 y 16 km, estando más alta en las latitudes ecuatoriales que en las polares.

A partir de unos 200 mb se observa que la temperatura es más baja en el ecuador que en los polos con unos 30° C de diferencia. Así pues en la superficie el ecuador es la parte caliente y los polos la parte fría y en alturas superiores a 12.000 metros ocurre lo contrario: el ecuador es la parte fría con 200° K y los polos la parte caliente a 230° K. En el invierno de las regiones polares, cuando el sol está bajo su horizonte, la temperatura decrece hacia los polos aún en la estratosfera.

Con el cambio de estaciones varían las temperaturas medias de los diferentes lugares geográficos. El máximo de contraste de temperatura en la troposfera se encuentra a unos 50° N en verano y a unos 30° N en invierno. En la troposfera tropical los gradientes horizontales de temperatura son muy pequeños.

No vamos a entrar en detalles acerca de la distribución de la temperatura a alturas superiores. Vamos únicamente a señalar la nomenclatura más en uso actualmente de las subregiones de la atmósfera superior. Esta división basada en la estratificación térmica ha sido recomendada por la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG) en su reunión de Helsinki en 1960. En este sistema la *estratosfera* se extiende desde la tropopausa hasta la zona de máxima temperatura, estratopausa, cerca de los 50 km. La *mesosfera* está entre la estratopausa y la zona de mínima temperatura, mesopausa, cerca de los 80 km. Por encima de la mesopausa está la *termosfera*. A pesar de que esta nomenclatura ha sido recomendada también por el comité ejecutivo de la OMM en 1962, la

adopción no es general entre los investigadores y tampoco hemos de extrañarnos porque la revisión puede ser necesaria, teniendo en cuenta que se descubren nuevas propiedades.

Según la atmósfera tipo 1962 la tropopausa tiene alrededor de -50° C de temperatura, la estratopausa se eleva a 0° C y la mesopausa ha descendido a -85° C. Naturalmente que estos valores tienen un cierto grado de variabilidad con las condiciones de la atmósfera en cada momento y lo mismo ocurre con las alturas antes citadas, porque las regiones de la atmósfera terrestre no están definidas rígidamente.

Desde hace pocos años se conoce un fenómeno llamado «calentamiento estratosférico invernal». Consiste en que durante la mayor parte de los inviernos aparecen rápidamente sectores cálidos con temperaturas estratosféricas superiores a los valores de verano. Por ello termina destruyendo el remolino polar que describimos al hablar de los vientos estratosféricos y aparecen en pleno invierno condiciones típicas del mes de julio con vientos del este. El fenómeno se propaga hacia abajo, a menudo muy lentamente, con un decrecimiento en amplitud. Actualmente se están haciendo estudios sobre este fenómeno utilizando los recursos modernos de observación que hemos mencionado, instalando bases terrestres para efectuar sondeos por encima del nivel de 10 mb a 30, 40 y 45 km y sobre todo aplicando los experimentos numéricos, que luego detallaremos, para comprender los procesos dinámicos que encierra el fenómeno señalado. Este fenómeno está muy relacionado con la investigación ionosférica y sus estudios se coordinan con los de la absorción de la región ionosférica D. (variación del contenido de electrones entre los 60 y 100 km).

DISTRIBUCION DEL VAPOR DE AGUA

La distribución media de la humedad específica junto a la superficie terrestre muestra valores elevados: 16 gramos por mil de mezcla en las latitudes tropicales. Estos valores decrecen con la altitud y con la latitud.

Por otra parte, la atmósfera presenta siempre valores más elevados de humedad en verano que en invierno. Así, para nues-

tra latitud y a nivel del mar, el valor medio entre octubre y marzo es de 6 gramos por mil de mezcla y entre abril y septiembre alcanza 9 gramos. A la altitud de 500 mb (5.500 m o nivel del valor medio de la masa atmosférica) hay medio gramo por mil de mezcla en invierno y un gramo en verano, valores que son aproximadamente la décima parte de los valores superficiales.

Mayor interés tiene la distribución de la humedad relativa, cociente entre la humedad específica existente y la humedad específica saturante. Los hechos notables son: los mínimos de humedad, tanto en superficie como a niveles medios, están entre los 25° y 30° de latitud, según sea invierno o verano. Los máximos de humedad relativa se presentan en ambas estaciones en el ecuador y en las latitudes superiores a 60°.

LA CORRIENTE DEL CHORRO

En cada hemisferio hay una corriente fuerte, muy localizada en bandas relativamente estrechas, que rodea la tierra con dirección media de oeste a este, a una altura aproximada de 12.000 metros. Las primeras indicaciones de su existencia fueron observadas por el giro de los cirrus. Bjerknes y sus colaboradores, calculando el viento térmico, señalaron en 1930 que un viento fuerte rodeaba la Tierra. Desde 1942 las observaciones directas mostraron su existencia con velocidades frecuentes de 100 a 150 nudos (185 a 277,5 km/h) en el núcleo del chorro y en ocasiones hasta 540 km/hora. Los chorros individuales muestran normalmente una configuración ondulada, asemejan a un río rápido y serpeante entre núcleos de aire relativamente estancado.

Los campos de temperatura, presión y viento son manifestaciones separadas de un único campo. Las tres variables están ligadas por las ecuaciones hidrostática y geostrofica. Los vientos en superficie y en altura difieren porque la temperatura media de la columna de aire es diferente. La variación del viento al atravesar la capa se llama por ello *viento térmico* y sopla a lo largo de las líneas de igual espesor (o igual temperatura media) dejando el aire frío (de poco espesor) a su izquierda

(en el hemisferio sur a su derecha). Como los vientos al nivel del mar son relativamente flojos, la corriente del chorro es casi por completo un viento térmico; su fuerza es proporcional al contraste de temperaturas de toda la capa que tiene debajo. Así el aumento de los vientos del oeste con la altura en la troposfera (chorro troposférico primario) es el equivalente geostrófico del decrecimiento de la temperatura hacia los polos. Por otra parte, el viento térmico es inversamente proporcional al parámetro de Coriolis $2 \Omega \sin \varphi$ y, como consecuencia, los vientos en altura más fuertes tienden a desplazarse algo hacia el ecuador con respecto a las máximas variaciones de temperatura. El eje del chorro sigue los cambios estacionales del máximo contraste de temperatura. En invierno está a unos 28° N y en verano a unos 42° N.

El decrecimiento de la velocidad en la estratosfera es el equivalente del aumento de la temperatura hacia los polos. No así en el invierno porque ya hemos dicho que la temperatura decrece hacia los polos también en la estratosfera.

Debido a los contrastes superficiales que se reflejan en altura, la intensidad del chorro varía considerablemente con la longitud geográfica. Por el contrario, en el hemisferio sur, al no haber grandes masas de tierra, el chorro es más uniforme que en el hemisferio norte.

VIENTO MERIDIONAL

El movimiento zonal descrito anteriormente es el dominante en la atmósfera, pero el movimiento paralelo a los meridianos es muy importante. Se denomina «circulación meridional» o «circulación meridional media» la circulación a lo largo de los meridianos, promediado según el tiempo.

Está bien establecido que hay un flujo medio hacia el ecuador en los niveles más bajos de la troposfera en el cinturón de los vientos alisios, ($<30^\circ$ de latitud). Por encima, o sea, a niveles superiores, hay un flujo hacia el polo. A latitudes superiores los vientos presentan componente sur en los niveles bajos y componente norte en los niveles elevados.

Esta disposición de los vientos es desplazada algo hacia el

polo norte durante el verano, presentándose en las latitudes bajas (hasta los 10° N) vientos del sur a niveles bajos y vientos del norte a niveles altos como pertenecientes a la circulación del hemisferio sur.

Solamente en los trópicos la circulación meridional juega un papel importante. Pero siempre mantiene su importancia y papel en el problema de los transportes verticales de momento cinético, agua y energía.

CELULAS

Los movimientos antes descritos muestran que una circulación meridional consta de una o más células, siendo cada célula una circulación cerrada. Una célula en que el aire más caliente asciende y el más frío se hunde se llama térmicamente *directa*. Este tipo de células convierte la energía de calentamiento en energía cinética. Una extensa área alrededor del ecuador, claramente entre 30° N y 30° S, está ocupada por una circulación que contiene una célula directa simple en cada hemisferio. Estas células se conocen ahora como «células de Hadley» (1685-1744) porque fue este abogado londinense el que primero consideró los vientos en relación a la Tierra que gira bajo ellos. Razonó que a bajos niveles el aire que se mueve hacia el ecuador, se desvía hacia el oeste, porque la superficie de la Tierra se mueve hacia el este con una velocidad que aumenta hacia el ecuador. Estos vientos alisios de ambos hemisferios convergen en el cinturón de las calmas. En el verano del hemisferio norte la célula de Hadley del hemisferio sur se extiende bien dentro del hemisferio norte, como señalamos anteriormente. Es decir, las posiciones de la zona de convergencia oscilan al norte y al sur en un ciclo anual y su posición media tiene una preferencia para el hemisferio norte (más caliente). El flujo hacia el ecuador en la célula de Hadley está confinado principalmente a la capa superficial de rozamiento, mientras el flujo de vuelta está concentrado cerca de la tropopausa. En su camino hacia el ecuador el aire absorbe calor y humedad y alcanza la zona de convergencia en un estado inestable. Corrientes convectivas penetran la mayor parte de la troposfera y los yunques de los cumulonimbus traspasan a menudo la tro-

popausa. Estas nubes son por tanto de tipo convectivo y, aunque numerosas, no significan que estén en forma continua a través del cinturón. Las partes superiores de las nubes pierden calor hacia el espacio a través de la radiación infrarroja. Así, con la fuente fría situada sobre la fuente cálida, las condiciones son ideales según Sandströms para mantener la circulación.

El calor latente liberado al condensarse el vapor de agua y formar las nubes suministra una fuerza adicional de empuje ascendente. En la troposfera superior las corrientes ascendentes se propagan hacia los polos y comienzan así su movimiento descendente, calentándose según la adiabática seca con un mecanismo semejante al muy conocido fenómeno foehn. El aire que desciende en los subtrópicos tiene temperatura elevada y se extiende horizontalmente desarrollándose vorticidad anticiclónica y, en consecuencia, cinturones de altas presiones (anticiclones) que ocupan las zonas subtropicales.

En las latitudes medias hay una célula indirecta más débil. Se la conoce ahora como la «célula de Ferrel» (1.856), porque fue el primero que señaló la existencia de esta célula y de otra directa a latitudes altas, o sea, de tres células en cada hemisferio. Introdujo también una fuerza nueva, la componente norte-sur de la fuerza de Coriolis. Sin embargo, hasta 1928 no se aceptó, en forma general, una configuración de tres células. Ahora bien, el problema de explicar el ciclo de energía es más complicado que la explicación simple de la configuración de tres células por hemisferio que acabamos de señalar.

OTRAS CIRCULACIONES CERRADAS

Un ejemplo de circulación cerrada de extensión inferior a las mencionadas constituye el sistema de monzones. El monzón es una respuesta a la variación anual de diferencias de temperaturas entre mares y continentes. Se ha hecho famoso el monzón de la India. En primavera se calienta el sudeste de Asia y al establecerse la circulación directa fluye hacia tierra el aire marítimo con gran contenido de humedad por la intensa evaporación sobre el océano Indico y por la emigración anual de

aire entre ambos hemisferios. Por otra parte el ascenso térmico se ve influenciado por el Himalaya y las precipitaciones que acompañan a esta situación, más que las velocidades del viento, han dado fama al monzón indio. En invierno cambia la dirección de las corrientes aéreas y el tiempo que acompaña es diferente.

En escala de espacio aún menor y con una variación diurna tenemos las brisas de mar y de montaña como ejemplos de circulaciones directas.

EL REGIMEN EXTRATROPICAL

Cuanto más nos alejamos del ecuador mayor es la aceleración de Coriolis para una misma velocidad relativa. La fuerza desviadora actúa siempre perpendicular a la dirección de la trayectoria de la partícula y hacia la derecha (vista contra la Tierra) en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio Sur. Desaparece en el ecuador y, por ello, el plano horizontal tangente a la superficie terrestre, gira poco en las proximidades del ecuador, en la zona tropical de influencia de la célula de Hadley. Pero en las latitudes medias y altas hay fuerte rotación del plano horizontal y grandes contrastes de temperaturas (baroclinidad). En consecuencia, enormes cantidades de energía potencial se pueden liberar y convertirse en energía cinética o viento, dando origen a tiempo móvil y sistemas de remolinos de gran escala o de movimiento del tipo conocido como anticiclones y ciclones. En las teorías antiguas de la circulación general estos sistemas faltaban. Fue Jeffreys (1926) quien destacó primeramente el papel de los ciclones. Starr y Bjerknes (1948) han observado la orientación dominante NE-SW de los senos y cuñas y del eje mayor de los anticiclones y desde entonces las observaciones y cálculos han permitido establecer firmemente la importancia primordial de los remolinos, excepto al sur de la latitud de 13° en que predomina, repetimos de nuevo, el papel de la circulación meridional de la célula de Hadley. Los procesos de transporte de momento cinético y de calor por remolinos son los que permiten explicar la estructura tricelular de la circulación meridional.

La convergencia del transporte por remolinos actúa como fuente de calor adicional al calentamiento por radiación y a la conducción turbulenta de pequeña escala y como fuerza mecánica adicional al rozamiento superficial y a la viscosidad turbulenta de pequeña escala.

Para caracterizar estos movimientos se utiliza el número de Rossby, cociente entre la velocidad relativa del aire y la velocidad lineal de la superficie terrestre. En los fenómenos atmosféricos oscila entre 0,05 y 0,2. A unos 3 km de altitud, los sistemas de movimiento consisten, en la mayoría de las veces, de ondas largas, normalmente cuatro, moviéndose como un tren de oeste a este y superpuestas sobre una corriente zonal fuerte (corriente en chorro). Estas condiciones se dan en los períodos denominados de circulación de alto índice. En los períodos de índice bajo, o de vientos del oeste poco intensos, las configuraciones típicas del flujo en altura presentan ondas de gran amplitud, centros cerrados de altas y bajas presiones, líneas de cizalladura, grandes senos y cuñas. A veces la atmósfera presenta una transición entre ambos estados, particularidad de *vacilación* de la atmósfera, conocida como el ciclo del índice zonal, que varía en un ritmo irregular de 20 a 60 días. Las distintas fases del ciclo van acompañadas de fenómenos especiales al nivel del mar.

MODELOS DE LABORATORIO

La Meteorología dispone, por fin, de dos métodos propiamente experimentales, en el sentido de que el hombre puede producir a voluntad los fenómenos atmosféricos. Aún así son métodos experimentales especiales.

Uno de ellos es el empleo de los modelos de laboratorio que han sido diseñados específicamente para simular la atmósfera. Estos modelos consisten en cilindros giratorios desigualmente calentados y que contienen un líquido. El cilindro representa un hemisferio de la Tierra, el fluido representa la atmósfera y el movimiento del fluido se desea que represente la circulación de la atmósfera.

La primera importancia de los modelos descansa en el he-

cho de que los experimentos, siendo realizados en el laboratorio, están sujetos a un cierto grado de control. La forma y tamaño de la vasija, la naturaleza y cantidad del fluido, la distribución e intensidad de las fuentes exteriores de calor y la velocidad de rotación se pueden elegir al comienzo.

Aunque el primer experimento de este tipo lo hizo Vettin en 1857, los modernos experimentos se realizaron en el Laboratorio de Hidrodinámica de la Universidad de Chicago y en la Universidad de Cambridge por Fultz y Hide respectivamente después de la II guerra mundial. Primeramente con un vaso cilíndrico o tanque en disco que tiene un eje vertical. Las paredes hacen de ecuador y el centro de polo. Se monta el gradiente de temperatura adecuado, la velocidad de giro conveniente y el movimiento de la superficie se visualiza con partículas de polvo de aluminio u otros trazadores, mientras los movimientos se pueden seguir inyectando un tinte.

Los números de Rossby y de Taylor, $T = \frac{\text{fuerza de Coriolis}}{\text{fuerza de viscosidad}}$ hacen en estos experimentos el mismo papel que los números de Reynolds y Mach en los experimentos aerodinámicos. En los experimentos con rotación lenta se desarrolla el régimen de Hadley y con rotación más rápida el régimen de Rossby apareciendo el remolino circumpolar y la corriente en chorro ondulante. El número de ondas es la característica del flujo. Cambiando las condiciones exteriores varía este número. Para número de Rossby bajo aumenta el número de ondas. También se han observado superficies frontales con estructura y evolución análogas al modelo noruego del ciclón o borrasca.

Otros experimentos se han realizado usando una vasija profunda circular. Se han encontrado configuraciones de flujo conteniendo cadenas de ondas idénticas que progresan en torno al eje a uniforme velocidad sin alterar su forma. Corresponden a las ondas sinusoidales de Rossby. Una simple fotografía permite medir las velocidades en la superficie libre y el campo instantáneo de temperatura se puede conocer con varias medidas de temperatura efectuadas al mismo tiempo.

Un señalado descubrimiento ha sido el fenómeno denominado de «vacilación», análogo al de las fluctuaciones del índice

zonal. Los fenómenos de transición del régimen de Hadley al de Rossby y entre distintos números de ondas se pueden justificar en términos de estabilidad e inestabilidad, con una explicación cuantitativa y matemática que ha sido desarrollada últimamente.

La contribución más importante de estos experimentos de laboratorio a la teoría de la atmósfera ha sido la separación de las consideraciones esenciales de las sin relieve o pequeñas. Así la condensación de vapor de agua no es esencial para fenómenos de nuestras latitudes. Igualmente se ha visto que los hechos topográficos de la Tierra no se requieren para el desarrollo de los sistemas atmosféricos típicos.

MODELOS NUMERICOS

Un método nuevo para la investigación de la atmósfera se ha desarrollado en los últimos años: la utilización de los modelos numéricos. Un modelo numérico es un sistema de ecuaciones matemáticas, proyectado para asemejarse a las ecuaciones que gobiernan la atmósfera y acondicionado en una forma conveniente para resolver por métodos numéricos. El experimento numérico consiste simplemente en determinar y examinar una solución particular de las ecuaciones función del tiempo partiendo de algunas condiciones iniciales elegidas. Estos experimentos sólo se pueden realizar en la práctica con la ayuda de máquinas calculadoras digitales de gran velocidad. Se usan ya máquinas que una suma o multiplicación lo realizan en 10^{-6} segundos. Es decir, realiza la labor de 100 millones de personas. Hoy día se está desarrollando la quinta generación de calculadoras con una potencia de cómputo del orden de 300 a 500 MIPS (millón de instrucciones por segundo). Richardson fue el precursor de estos experimentos, pero en 1922 no disponía de calculadoras digitales. En 1947 Charney, Fjortoft y von Neumann fueron quienes aplicaron las primeras calculadoras electrónicas.

Las ecuaciones principales que gobiernan la atmósfera, considerada como un medio continuo, son las siguientes:

La de continuidad que representa la ley de conservación de la masa.

La de hidrodinámica que representa la segunda ley de Newton del movimiento.

La de termodinámica que representa el primer principio.

La de estado toma generalmente la expresión de la ley de los gases ideales con ciertas modificaciones necesarias por la presencia del agua en diferentes fases y cantidades.

Las que representan los fenómenos de absorción, reflexión y difusión de la radiación solar e infrarroja.

Las que expresan las leyes que gobiernan el transporte de la cantidad de movimiento y calor sensible por los remolinos turbulentos.

Las que expresan los fenómenos de evaporación y condensación del agua.

En estas ecuaciones exactas las derivadas de las variables se reemplazan por expresiones aproximadas. Con estas aproximaciones se originan errores o limitaciones de los resultados cuya exposición nos llevaría a desarrollar el problema de la estabilidad de los cálculos. En particular hay un límite para el intervalo de tiempo.

En el último decenio se ha procurado aproximarse más a las condiciones reales, reduciendo al mínimo las simplificaciones. Para eso usan datos que cubren todo el hemisferio; representan la estructura vertical por nueve niveles; introducen el rozamiento superficial y los efectos de la radiación, incluyendo la absorción ultravioleta por ozono en las capas elevadas; figuran también la evaporación, la advención de vapor de agua y precipitación, etc., los océanos, las superficies terrestres y su topografía, etc.

El valor mayor de los modelos numéricos está en la oportunidad para efectuar experimentos controlados, variando uno o más parámetros. La potencia del método reside en la posibilidad de alterar no sólo los hechos físicos, como la topografía de la Tierra, sino otros, tales como la propagación de ondas sonoras y de gravedad. Por todo ello podemos decir que los resultados de los experimentos numéricos no han hecho más que

empezar a verse. Sólo se han perfeccionado experimentos individuales.

PERSPECTIVAS FUTURAS

Algunos éxitos se han alcanzado en la explicación de la circulación general. Así no hay duda de que la fuerza motora de la circulación de la atmósfera es la radiación solar y que su intensidad es mayor en las latitudes bajas que en las altas. Esto produce energía potencial útil bien por calentamiento directo de la atmósfera o por calentamiento indirecto a través de la superficie en que se apoya.

La atmósfera debe poseer circulación o movimiento. De lo contrario cada zona de la tierra estaría en equilibrio térmico a base de perder y ganar el mismo calor. Pero un contraste de temperatura entre diferentes latitudes es incompatible con un estado de reposo, pues si prevaleciera el equilibrio hidrostático, habría gradientes horizontales de presión y se desarrollarían movimientos horizontales, y si no hubiera tal equilibrio se desarrollarían movimientos verticales.

En los problemas de la circulación no se puede dar ninguna explicación sin considerar la *fuerza térmica*. La componente principal de esta fuerza es el gradiente de calentamiento a través de las diferentes latitudes. En la atmósfera real las variaciones estacionales de calentamiento suministran una componente periódica de esta fuerza. Las variaciones diurnas suministran otra componente de período corto pero también de gran escala. Componentes de escala más pequeña son los contrastes entre océanos y continentes, o entre más pequeños hechos geográficos.

El movimiento o circulación debe transportar energía desde las latitudes bajas a las altas. El rozamiento está disipando continuamente la energía cinética de la circulación. Pues bien, las explicaciones y los cálculos para el balance energético no son hoy día esencialmente correctos ni rigurosos.

No puede haber transporte neto de momento cinético de la tierra a la atmósfera, y, por consiguiente, no pueden predominar en la superficie terrestre ni vientos del oeste ni del este. La ex-

plicación completa de éste equilibrio geostrófico es más bien compleja y no se ha conseguido.

La circulación de Hadley, como consecuencia de la fuerza térmica entre ecuador y polo, no puede existir con la actual velocidad de rotación terrestre, porque tiene inestabilidad baroclínica. Algunas causas de esta inestabilidad se hacen pequeñas en los trópicos. Pero en el conjunto de nuestra atmósfera debe presentarse una circulación conteniendo remolinos o torbellinos.

Las propiedades permanentes principales de la circulación, incluyendo el cumplimiento de los equilibrios hidrostático y geostrófico y la distribución de los vientos superficiales del este y del oeste, dependen de la escala y estructura de los torbellinos. Así un transporte de momento cinético hacia los polos se produce generalmente por una configuración de senos y cuñas cuyos ejes están desplazados hacia el este con el aumento de la latitud. Un transporte de calor hacia los polos se produce cuando dicha configuración se desplaza al oeste con el aumento de la altitud. Para estos problemas, que son de los más importantes en la teoría de la circulación general, falta una explicación cualitativa adecuada.

Algunos intentos para esa explicación se basan en la teoría clásica de la turbulencia; otros, se fundan en la teoría de la estabilidad baroclínica del flujo sobre el plano beta. Ambos postulados nos llevan a un número de conclusiones correctas. Pero, como ya hemos dicho antes, a pesar de ciertos éxitos alcanzados en explicar detalles o problemas particulares la dificultad es grande para formar una teoría unificada combinando estos éxitos parciales. Ahora bien, en estos tiempos, como consecuencia de los recientes progresos de la ciencia y de la tecnología, es posible tratar la atmósfera como un sistema físico único y tenemos la esperanza y convicción de que una explicación completa de los hechos principales se efectuará al conseguir resultados rigurosos de los problemas parciales que hemos señalado.

GRANDES PROBLEMAS DE LA FISICA CONTEMPORANEA

No podemos por menos de señalar algunos grandes proble-

mas de la Física contemporánea. En la exposición de los problemas de la circulación general nos hemos limitado a la atmósfera más próxima a la superficie terrestre. A pesar de ello estamos convencidos de que sus fenómenos están vinculados a lo que ocurre mucho más lejos. Todos han oído hablar de una capa atmosférica conductora, la ionosfera, situada a unos 90 km sobre el suelo. Sin entrar en detalles se puede asegurar que la potencia reflectora de esa capa varía con la actividad de las manchas solares. Así nos ponemos en contacto con las cuestiones de la ciencia denominada *Astrofísica*. Estamos en el comienzo de la exploración del espacio de los astros. Hemos dicho ya que las técnicas desarrolladas para estos fines sirven para un mejor conocimiento de nuestra atmósfera. Pero la Astrofísica trata de problemas que, comparados con las dimensiones de nuestra Tierra, son extremadamente grandes. Las estrellas y las galaxias plantean problemas, unos, análogos, y otros, nuevos con relación a los de nuestro planeta ¿Cuándo y cómo se han formado las estrellas? ¿Cómo han evolucionado? ¿Qué relación hay entre el campo gravitatorio y las grandes energías producidas en su evolución? ¿Cómo es y está la materia cósmica? En esta ciencia las escalas del espacio y del tiempo son muy diferentes de las que estamos acostumbrados a manejar y el hombre tiene ante sí un campo infinito donde aventurarse.

En el interior de las estrellas, en el espacio interestelar, en el universo, en general, parece que la materia se encuentra en un estado de gran excitación, debido a las altas temperaturas y a la baja presión. Modernamente se estudian sus propiedades y aplicaciones en el laboratorio, habiéndose denominado *plasma* a este estado en que predominan las interacciones electromagnéticas entre los núcleos y los electrones. En este campo se está realizando actualmente un gran desarrollo de la investigación.

Este tema nos permite pasar de los fenómenos de gran escala a los de pequeña, muy relacionados también por otros motivos. Desde 1932 en que Anderson halló el positrón, Chadwick descubrió el neutrón y Fermi publicó su teoría de la desintegración beta, estamos inmersos en una nueva física que trata de la *composición del núcleo* y de sus elementos constitu-

tivos y que quiere conocer las fuerzas e interacciones que se ejercen entre ellos.

El hallazgo del positrón, o electrón positivo, en la radiación cósmica fue la confirmación experimental de las consecuencias teóricas anticipadas de la ecuación relativista de la mecánica ondulatoria de Dirac (1927). La teoría general de Dirac, uno de los grandes ejemplos de la potencia del razonamiento matemático, reunió la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad. Demostró que el electrón debía necesariamente, o sea, como consecuencia de su teoría y no simplemente como hipótesis, estar animado de un movimiento de rotación sobre sí mismo (spin), llevando un momento magnético típico. Estableció además una simetría fundamental correspondiente a la existencia de dos clases de materia, la materia propiamente dicha y una antimateria de propiedades equivalentes pero de cargas opuestas, caracterizada por números cuánticos diferentes. Los descubrimientos realizados posteriormente de los antiprotones, antinucleones, etc., han sido guiados por la teoría de Dirac y se han basado en la idea general de que las antipartículas deben ser como las imágenes dadas por un espejo de las partículas. Todo esto ha conducido a la moderna consideración experimental y teórica de los principios de simetría muy arraigados y debatidos por los filósofos del pasado.

El descubrimiento del neutrón como elemento constitutivo del núcleo reveló la existencia de una nueva fuerza natural que no tenía carácter eléctrico, ni gravitatorio, pero que entre protones y núcleo actúa *fuertemente* y ha sido origen de una nueva concepción de la estructura de los átomos.

La teoría de Fermi sobre la desintegración beta, basada sobre la hipótesis, primeramente propuesta por Pauli, de la existencia del neutrino, muestra la existencia de una cuarta clase de fuerza natural entre partículas elementales que, en comparación de la anterior fuerza nuclear, se considera como *débil*, pues su intensidad es 10 millones de veces menor.

El sistema nuclear se especifica por su número de masa, número total de protones y neutrones. Su estudio ha sido guiado por la analogía con los estudios del átomo. A falta de una teoría satisfactoria acerca de la naturaleza de esas nuevas fuerzas, se

han ideado modelos nucleares y últimamente se admite la existencia de partículas subnucleares, denominadas «quarks», (Gell-Mann 1962).

De todas maneras, aunque en este siglo los progresos acerca de la estructura de la materia han sido espectaculares, la física de las *partículas elementales* se encuentra con una tarea de grandísimas dificultades, tanto en materia propiamente experimental, cuanto en ideas y teorías que expliquen los nuevos fenómenos.

La aplicación de las teorías atómicas ha permitido realizar grandes progresos en fenómenos como la *superconductividad* y el *estado superfluido* a muy bajas temperaturas. Las propiedades del *estado sólido* constituyen otro gran campo actual de estudio y progreso. Se aplican sin descanso los conocimientos adquiridos acerca de la estructura cristalina de los metales y del mecanismo de control de los semiconductores.

LA FISICA EN LA UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

Hasta ahora hemos expuesto abreviadamente un problema de las ciencias atmosféricas y una panorámica de los campos actuales de trabajo en la Física. Pero creo que en este lugar es fundamental que hable un poco del problema de la Física en la Universidad de Salamanca.

Esta Universidad no tiene solera en los estudios referentes a las ciencias físicas. El gran auge y desarrollo de la Física coincidió con la decadencia de nuestra Universidad. Pero analicemos la situación actual.

La realidad es que en esta Universidad no se cultiva una de las ramas de la Ciencia que en este siglo XX progresa e interesa más en el mundo. Es difícil pensar que no nos damos cuenta porque todos estamos disfrutando o sufriendo los resultados de los avances de la Física: viajes espaciales, cintas magnetofónicas, ultrasonidos, técnicas de calentamiento y refrigeración, la energía eléctrica y sus grandes centrales, la iluminación eléctrica, diferentes tipos de pilas y acumuladores, el teléfono, las ondas electromagnéticas, la radio, la televisión, los rayos X,

laser y maser, la automática, las rápidas calculadoras, el microscopio electrónico, la energía atómica, las bombas y centrales nucleares, etc. La prensa diaria habla cotidianamente de temas parecidos. Por otra parte en el campo de la Física se concede anualmente un premio Nobel a la vez que en otras cuatro especialidades. Con este motivo se vuelve a escribir miles de líneas referentes a la Física. Se insiste en sus aplicaciones a otras ramas de la ciencia y del saber, en su forma de esquematizar el Universo y se la considera, por ello, como paradigma de las ciencias exactas. En consecuencia, hemos de pensar que la Universidad salmantina no es sensible a este aspecto del saber humano, puesto que se ha trabajado poco para acoger en su seno los estudios de Física.

Para que nadie crea que sólo son palabras hablaré de esta cuestión en términos físicos, lo que servirá de ejemplo de cómo se pueden aplicar las leyes de la Física a cuestiones tradicionalmente colocadas al margen de estos estudios.

Vamos a establecer una similitud entre la ciencia y la energía. Así como la energía se origina en la materia por procesos distintos y, en particular, la energía radiante se produce por procesos moleculares, atómicos, nucleares, etc., de sus constituyentes, la ciencia se crea por el estudio y la investigación en los focos del saber que son principalmente las Universidades. Una cualidad del saber y de la ciencia, comparable con la de la energía, es que para su transmisión y propagación no es esencial el contacto material. La energía radiante actúa con mayor o menor eficacia e igualmente las Universidades irradian su saber.

La energía radiante se propaga por el espacio en forma de onda que se caracteriza por su frecuencia. No suele haber radiación rigurosamente monocromática y la que así se denomina abarca en todo caso un intervalo de frecuencias. Igualmente la ciencia se caracteriza por sus especialidades o ramas. Nuestras mucetas de diferentes colores lo manifiestan. Sus aplicaciones varían de una forma casi continua, igual que las propiedades de las ondas radiantes con la frecuencia.

Los focos de energía condensados se caracterizan por los

poderes de absorción y emisión. Paralelamente la Universidad la caracterizamos por su *poder de absorción* definido como cociente entre el saber captado por sus miembros y el saber total incidente que la llega de otros focos. El *poder emisivo* se refiere a los saberes que la Universidad emite a su exterior como producción suya. Ambos caracteres dependen de las propiedades, naturaleza, o estado de la Universidad y, en general, son también función de la especialidad o rama del saber.

Tiene mucha importancia la fracción que es absorbida por la Universidad, es decir, que no se pierde para ella. La Universidad completa es la que capta toda la sabiduría radiante que incide sobre ella, es decir, la del poder absorbente igual a la unidad para cualquier rama o especialidad. En la energética de la radiación el cuerpo con esas propiedades se conoce con el nombre de cuerpo negro. No vamos a dar nombres a esa Universidad perfecta en su poder absorbente; la calificaremos de completa por ser el modelo o prototipo en nuestra idea de la Universidad.

En nuestro mundo de intercomunicación todos los cuerpos sociales, limitados por superficies de diversos caracteres y más o menos aislados unos de otros, emiten, absorben, reflejan, etc., las noticias, conocimientos, el saber en general. En una sociedad en equilibrio se tiene que cumplir la ley de Kirchhoff: la relación entre los poderes emisivo y absorbente de un cuerpo o institución, para cada rama o especialidad de la ciencia, es siempre la misma y depende de la temperatura de equilibrio. En nuestro caso, al igual que decimos al hablar de la estructura de la materia, la temperatura representa la energía cinética media, el índice general del nivel de vida de una comunidad o, en pocas palabras, su nivel térmico. Si una Universidad no absorbe ciertos saberes o materias tampoco podrá emitirlos a su alrededor, ni podrá, en consecuencia, dar soluciones a los problemas de esa rama. La sociedad que la rodea y envuelve a esta Universidad no podrá beneficiarse debidamente del desarrollo de esas materias. Si una Universidad absorbe o capta todo el saber que le llega sobre una materia su poder absorbente es máximo, es decir, la unidad y tendrá máximo poder emisivo. La Universidad completa es aquella que tiene la unidad como poder absorbente correspondiente a todas las materias. En ese caso irradia al má-

ximo de sus condiciones internas o estructurales y la sociedad que la envuelve puede aprovechar esa energía. En general, la Universidad, como toda obra humana, no es totalmente completa, absorbe sólo una fracción de la energía incidente sobre ella y, en consecuencia, emite, esa misma fracción de lo que emitiría una Universidad completa con la misma temperatura.

Esta Universidad salmantina tiene un poder de absorción muy bajo para los saberes de la Física. El poder de absorción de un cuerpo depende de la naturaleza de los medios materiales que constituyen su superficie. La superficie que limita nuestra Universidad, o sea, la frontera o separación entre ella y el medio ambiente, es el personal docente o, al menos, maduro en cuestiones científicas. Es decir, el personal con formación y dedicación suficiente para captar las radiaciones de la ciencia y del saber que cruzan el mundo científico. En esta Universidad hay pocas personas dedicadas a la Física. Y por tanto estas superficies absorbentes se saturan pronto y no pueden abarcar las emisiones que reciben de los demás focos. A los efectos de las radiaciones de la ciencia física la superficie de esta Universidad está constituida a lo sumo por paredes cromadas, buenas reflectoras, o peor aún, la sustancia constituyente de esta Universidad es casi totalmente transparente y aunque incidan en ella las radiaciones se pierden como ciencia no captada ni absorbida. Es esencial pues aumentar el personal de esta Universidad con formación en la ciencia física si queremos que emita y radie, sea madre engendradora y multiplicadora de esta especialidad. Esta ciencia emitida por la Universidad es la que producirá un impacto en el ambiente que la rodea. La presión sobre cualquier cuerpo de nuestra sociedad es proporcional a la densidad de energía científica que llena el espacio o a la velocidad que atraviesa el flujo científico irradiante. Ahora tenemos que estar totalmente subordinados a la energía científica que nos llega de otros focos lejanos.

En diversos momentos hemos dicho que el poder emisor e, igualmente, la presión o impacto en el medio ambiente es una función de la temperatura de la Universidad o del índice que nos señala su energía media. Esta energía, o vitalidad de la Universidad, es consecuencia de todo lo que constituye el organis-

mo en cuestión. En nuestro caso del personal y de los medios, o sea, del número de profesores, alumnos, administrativos, auxiliares, etc., de la calidad de las bibliotecas, aparatos, instalaciones, etc., y de las finanzas, para que todo bien armonizado, funcione con suavidad, buen acoplamiento y ajuste, como máquina perfecta que renueva rápidamente aquello que por edad, tiempo, veteranía o defecto inicial deba ser sustituido. Sería alargar mucho detallar la proporción que debe haber entre las distintas clases del personal y lo que incluimos en la denominación de medios económicos, que abarca los medios materiales, instrumentales, didácticos, técnicos, etc., y su interrelación para obtener la máxima temperatura o vitalidad para la Universidad. Pero sólo quiero destacar que tiene grandísima importancia, porque a buen seguro la ciencia global emitida por ella será proporcional a una potencia mayor que la unidad, acaso a la cuarta potencia de la vitalidad como ocurre en la radiación (Ley de Stefan). Es decir, si la vitalidad de la Universidad se duplica, los saberes emitidos por ella aumentarán diez y seis veces.

Otro problema que se nos presenta por semejanza o comparación de la ciencia con la emisión de radiación es la distribución espectral de los saberes, o sea, la distribución de la energía científica entre las distintas especialidades o ramas del saber. Es posible que para cada temperatura índice de lo que constituye la energía media de la Universidad, se presente una determinada curva de distribución de la intensidad de los saberes. A mayores temperaturas es mayor la energía emitida para cada frecuencia o especialidad del saber y, por otra parte, la emisión máxima de la energía científica corre o se desplaza hacia longitudes más cortas, o lo que es lo mismo, a frecuencias mayores (Ley de Wien). En consecuencia, a más vitalidad de la Universidad tendremos más intensidad para un mismo saber, y, por lo tanto, más impacto y alcance a su alrededor. Pero, además, el corrimiento significa que los saberes predominantes, más intensos, van cambiando, igual que observamos el cambio de color de un cuerpo incandescente al elevar su temperatura. Al elevar la vitalidad de la Universidad se trabajará en la vanguardia de la ciencia, habrá más calidad, a la vez que se emitirá con más intensidad en toda la gama de especialidades. La pena, co-

mo decía al principio, es que esta Universidad no sea sensible, no abarque toda la extensión de las ramas del saber. En el caso que comentamos ahora no está emitiendo las frecuencias correspondientes a la Física. La realidad actual, repito, es que no tiene una superficie absorbente de la Física porque carece de personal maduro en esta especialidad y cualquiera que sea su vitalidad interior no podrá suministrar conocimientos nuevos y probablemente duraderos acerca de esta rama. Será ciega, no verá, y no podrá caminar por el sendero del progreso de la Física.

Todos habrán comprendido que en todo lo anterior hemos considerado la ciencia emitida por la Universidad concebida como cuerpo condensado, cuyas moléculas, o sea, los constituyentes de esa Universidad, se afectan mutuamente porque existe una gran interrelación. Es así como se valora la institución porque el saber emitido no depende de la calidad de un miembro particular. Esto no quita que pueda ocurrir que alguien, gigante solitario cual molécula aislada, emita en la frecuencia característica y propia de su singular estructura, destacando él sólo sin apoyo alguno. La emisión científica de estos gigantes solitarios obedece a leyes muy distintas de las expuestas anteriormente. La aparición de estos casos singulares está condicionada por reglas que no es el caso exponer ahora para no agotar vuestra paciencia.

Resumiendo este importante problema, que lleva ligados otros que ni siquiera menciono, quiero manifestar que si pretendemos que esta Universidad sea una realidad viva es necesario que evolucione y se adapte al mundo actual. Debe, por tanto, incluir el dominio de la Física entre sus enseñanzas y, más aún, debe actuar como un cuerpo negro, es decir, del color de la muceta de su representante, el Rector, y ser un emisor perfecto e integral de saberes. Debe también desplazar sus intensidades relativas paralelamente al desarrollo y nivel del mundo, lo que elevará la calidad de la ciencia que produce. Así, en el transcurso de los tiempos esta Universidad realzará su valoración y prestigio científicos, lo que redundará en beneficio general. Será

como un árbol enraizado en el pasado y que crece hacia el futuro realizando siempre lo que mi paisano Iparraguirre señalaba en su Guernikako arbola al cantar «eman da zabaltzatzu munduan frutua» (da el fruto y espárcelo en el mundo).

He dicho.

INDICE

| | Pág. |
|---|------|
| Significado de la circulación general | 8 |
| Técnicas de observación | 9 |
| Satélites meteorológicos | 11 |
| Sondeos horizontales con globos | 12 |
| Estaciones automáticas de superficie | 14 |
| Trazadores | 14 |
| Vientos de zona | 15 |
| Distribución de la presión media | 16 |
| Presión y vientos en altura | 18 |
| Distribución de las temperaturas medias | 19 |
| Distribución del vapor de agua | 21 |
| La corriente del chorro | 22 |
| Viento meridional... .. | 23 |
| Células | 24 |
| Otras circulaciones cerradas | 25 |
| El régimen extratropical | 26 |
| Modelos de laboratorio | 27 |
| Modelos numéricos | 29 |
| Perspectivas futuras | 31 |
| Grandes problemas de la Física contemporánea | 32 |
| La Física en la Universidad de Salamanca | 35 |

X640756335

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA



6404231348