

RESERVAS DE NUESTRO PLANETA EN MATERIAS PRIMAS Y ENERGIA

DISCURSO DE INGRESO EN LA ACADEMIA

leído por el Académico electo

ILMO. SR. D. CELSO GUTIÉRREZ LOSA

en el acto solemne de su recepción
celebrado el día 2 de febrero de 1964

*Excelentísimos e Ilustrísimos Señores,
Señores Académicos,
Señoras y Señores:*

Bien quisiera que mis primeras palabras pudieran reflejar fielmente mi profundo y cordial agradecimiento a todos los miembros de esta ilustre Corporación, que, con generosidad y atención indudables, me han invitado a formar parte de ella, y asimismo el reconocimiento del gran honor —y responsabilidad— que tal ingreso como miembro ordinario supone. En sus primeros artículos, el Reglamento regulador del funcionamiento y actividades de esta Academia de Ciencias establece en forma perentoria los fines generales para los que ha sido creada, a saber: el cultivo, progreso y propagación de las Ciencias y sus aplicaciones. No es hipótesis poco aventurada suponer que yo pueda ser un elemento eficaz en el logro de objetivos tan elevados pero lo que sí puedo ya asegurar es que, en la medida de mis muy limitadas posibilidades, colaboraré con todo entusiasmo y el mejor espíritu en esta noble tarea que tanto dignifica al que la realiza y que, además, representa un medio excelente de contribuir al progreso científico y cultural de nuestra España.

Si me siento abrumado por el hecho de contraer tal responsabilidad, no lo estoy menos cuando pienso que aquí vengo a ocupar la vacante de una de las personalidades más destacadas y uno de los químicos españoles más eminentes que han pasado por este lugar. Me refiero a Don Paulino Savirón y Caravantes, miembro fundador de la Academia y científico cuyo nombre está íntimamente ligado al prestigio no sólo de aquélla, sino también de nuestra Facultad de Ciencias y de la propia Universidad zaragozana.

Venido a Zaragoza en época relativamente reciente, no me ha sido dada la posibilidad de conocer personalmente a D. Paulino Savirón, pero, aparte de que por su obra había adquirido general fama, sí he podido reconocer aquí la estela y el recuerdo, todavía inmarchitos, de una figura señera que

ha destacado por su extraordinaria preparación y capacidad de trabajo, por sus dotes de observador perspicaz y atinado, por su gran contribución al desarrollo de la industria química española y por sus condiciones humanas, que le granjearon la admiración, el respeto y el afecto de cuantos le conocieron, que son muchos de los que ahora me escuchan.

En el curso de su dilatada vida académica, desde que, por oposición, obtenía en 1895 la Cátedra de Química Inorgánica de esta Facultad hasta su jubilación en 1935, D. Paulino Savirón ocupó sucesivamente todos los cargos en la Universidad zaragozana: fue Decano desde 1903 hasta 1918, Vice-Rector hasta 1932 y, finalmente, Rector hasta la fecha de su jubilación; y desde todos esos cargos fue un excelente propulsor de las tareas docentes, creando la Biblioteca de la Facultad de Ciencias y organizando y dirigiendo la revista "Anales de la Facultad de Ciencias de Zaragoza".

En el campo de la industria tuvo el Dr. Savirón una intervención tan destacada que, ya directamente ya a través de sus discípulos, la industria del cemento en España ha experimentado un gran avance bajo su dirección, tanto por el número de plantas erigidas y dirigidas, como por las investigaciones realizadas y las publicaciones con ellas relacionadas.

El reconocimiento expreso y general de sus dotes, méritos y obra lo reflejan los numerosos títulos y condecoraciones con que se le distinguió (entre ellos, el primer título de Doctor en Química Industrial otorgado en España), así como el hecho de haber sido miembro de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid y de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona. Además, fue miembro fundador de nuestra Academia y en la última etapa de su vida ostentó la presidencia de la misma, desde cuyo puesto realizó tan magnífica labor que, como dice el Prof. Martín Sauras en su nota necrológica dedicada a D. Paulino, la hizo resurgir y llevar a su florecimiento posterior. Por eso, creo interpretar el sentir de todos al aprovechar esta ocasión para dedicar un efusivo recuerdo al maestro, cuyas huellas aun perduran y perdurarán por mucho tiempo.

Y pasemos ahora a desarrollar el tema elegido para corresponder a la obligación reglamentaria que atañe a todo recipiendario. El deseo deliberado de que el tema a tal fin escogido, exento de formulismos matemáticos y de conceptos más o menos abstrusos, pudiera ser de interés general y, al propio tiempo, la actualísima importancia del problema referente a las reservas en materias primas y energía del planeta en que vivimos, creo son razones suficientes para justificar el título elegido para nuestra consideración.

I

No es nuestro propósito enfocar el tema elegido para la presente disertación desde un punto de vista meramente económico o geopolítico, ya que —entre otras razones— ello conduciría a una exposición cargada en datos numéricos y estadísticos que, con su monotonía inevitable, acabarían cansando, casi con seguridad, la atención de todos Vds. Además, un tal tratamiento dejaría sin considerar algunos aspectos esenciales, que justamente son los que han de constituir el tema fundamental. El problema de las reservas en materias primas y energía de nuestro planeta, que sólo hace unas cuantas décadas apenas preocupaba a la Humanidad, va adquiriendo con el tiempo una importancia creciente y —casi puede decirse— alarmante. Las estadísticas nos recuerdan a cada momento que la población mundial aumenta sin cesar y que, al ritmo actual de crecimiento, se duplicará antes de que transcurra medio siglo. Hoy por hoy, es todavía posible contrarrestar el crecimiento demográfico con un aumento paralelo —cada año superado— en la producción tanto de materias primas como de energía y, sobre todo, de alimentos, merced a una aplicación sistemática y ventajosa de aquellas técnicas o conocimientos que el científico, con admirable constancia, logra por el camino difícil y silencioso de la investigación. Pero, en un porvenir más o menos próximo, el problema llegará a ser angustioso, y, aun contando con las inevitables modificaciones en las necesidades y naturaleza de la futura civilización, cabe plantear, con todo fundamento, la pregunta, ¿hasta qué punto puede crecer impunemente la población y cuáles son las reservas totales que, a modo de un capital limitado, puede la tierra ofrecer al hombre?

Como queda dicho, nuestra intención es desprendernos de todo matiz puramente económico o político y considerar la cuestión desde un punto de vista científico, único, por otra parte, que nos estaría permitido. Antes, sin embargo, de entrar en materia, quizá fuera conveniente consignar, en pocas palabras, a la luz de los conocimientos actuales, cuál ha sido, desde el comienzo de la Creación hasta nuestros días, la historia probable de los elementos químicos.

La creencia primitiva de que, en el Universo, existen los mismos átomos que en el origen de los tiempos, tuvo que ser totalmente revisada como consecuencia del descubrimiento de nuevos hechos y de la aparición de nue-

vas teorías. Además, siempre había permanecido inexplicado el que determinados elementos, tales como el radio o el platino, fueran tan escasos, mientras otros, como aluminio y hierro, se hallasen tan abundantemente extendidos en la corteza terrestre. Gracias a la técnica espectroscópica, es posible establecer hoy las conclusiones con una mayor generalidad de lo que pudiera consentir nuestra observación más o menos inmediata. Es bien sabido que cuando un elemento es convenientemente excitado (por elevación de temperatura, por choque electrónico o por una luz de energía suficiente), emite, no una gama continua de frecuencias, sino unas cuantas líneas bien definidas características del átomo emisor y que sirven para identificarlo aun en mínimas cantidades. Más aun, a partir del estudio fotométrico de la intensidad de las líneas espectrales, pueden extraerse conclusiones no sólo cualitativas, sino también cuantitativas acerca del elemento en cuestión, lo que hace del análisis espectral uno de los métodos analíticos más potentes de que se dispone en la actualidad. Pues bien, estudiando los espectros del Sol y demás estrellas, los astrofísicos observaron que muchos elementos eran escasos no sólo en la tierra, sino en todo el Universo. La cuestión de la abundancia de los elementos, que últimamente ha sido —y sigue siendo— objeto de numerosas investigaciones, está íntimamente relacionada a su origen e historia ulterior; ello indica ya, en forma implícita, que la abundancia de un determinado elemento no ha de obedecer a factores más o menos casuales o arbitrarios, sino que, al venir impuesta por las circunstancias que rodearon su nacimiento, ha de encajar en un esquema general de regularidad en cierto modo previsible. Sabido es que el átomo está formado por un núcleo central positivo, donde se concentra casi toda su masa, en torno del cual se mueven electrones negativos en número normalmente igual al de cargas positivas nucleares, o protones. Y así como la configuración electrónica determina el comportamiento químico de un átomo, es la carga nuclear la que fija la naturaleza de un elemento. Cuando se comparan entre sí las abundancias de los distintos elementos, se observa que son precisamente los *núclidos*¹ de carga nuclear (o número atómico) par los más comunes, mientras que, de ordinario, los elementos raros están integrados por átomos *impares*, sugiriendo que estos últimos son menos estables que aquéllos y que, por tanto, han debido sucumbir en su mayor parte (si es que han llegado a formarse en gran cantidad) en las condiciones de extremo rigor que debieron prevalecer en la fase inicial de la vida del Universo. Otra regularidad observada es que, en general, un elemento es tanto más escaso cuanto mayor es su número atómico, esto es, cuanto más pesado es, hallándose la abundancia en una relación de proporcionalidad inversa con la séptima u octava potencia de la carga nuclear; así, por ejemplo, la abundancia cósmica del hidrógeno, el elemento más ligero, es alrededor del billón de veces superior a la del uranio, el elemento natural más pesado.

Con arreglo a una teoría muy verosímil, se supone que el Sol se hallaba en el centro de una nube de gas que se extendía aproximadamente hasta los límites actuales del sistema solar y cuya masa era tan sólo una décima parte de la del astro central. Por virtud de súbitas turbulencias y remoli-

1 Se asigna el nombre de núclidos a los distintos isótopos de un elemento.

nos en el seno de aquélla, se han producido condensaciones que condujeron a la formación de lo que se llamaron *protoplanetas*, con una masa muy superior a la de nuestros planetas y una composición idéntica a la de la materia cósmica. Posteriormente, se inicia el período de contracción del Sol hasta que éste alcanza el calentamiento termonuclear; entonces se produce una intensa evaporación de la materia protoplanetaria, como consecuencia de la cual su tamaño se reduce al de los planetas actuales. El tamaño de los astros secundarios es ya insuficiente para que en ellos puedan mantenerse las condiciones que requieren las reacciones termonucleares y, por tanto, comienzan a enfriarse. En tal momento cesa el proceso de fabricación de nuevos átomos y se inicia el de su sedimentación con arreglo al orden de las respectivas densidades, bien al estado libre o en el de la combinación más estable bajo las condiciones reinantes; los más pesados se concentran en el interior del astro, mientras los ligeros tienden a situarse en la zona periférica. Aunque las ideas acerca de la estructura y composición de nuestro planeta en aquellas regiones que no pueden ser objeto de observación directa, son altamente especulativas, el estudio combinado de la materia cósmica llegada a la tierra en forma de meteoritos, así como de los fenómenos sísmicos inducen a concluir que el centro de aquélla, hasta una profundidad de unos 2.800 Km., está formado por un núcleo metálico (siderosfera) integrado principalmente por hierro y níquel, rodeado de una capa, con espesor aproximado de 1.600 Km., constituida por sulfuros y óxidos de metales pesados (calcosfera). A continuación, se ha separado una capa más ligera de silicatos alumínicos y magnésicos (litosfera), sobre la cual flota otra de granito que no llega a cubrir toda la superficie de la tierra.

En el curso de la solidificación del magma fundido, la temperatura es aun tan elevada que la fuerza gravitatoria es incapaz de retener los productos gaseosos ligeros y, por consiguiente, la tierra carece todavía de atmósfera; los silicatos fundidos fijan grandes cantidades de agua, que al ser devuelta durante el enfriamiento, queda retenida en la materia semisólida, engendrando así presiones gigantescas que, desde entonces, habrían de transformar la superficie de nuestro planeta en lugar de intensa actividad volcánica. El vapor de agua restituido —junto con otros vapores ácidos— forma en torno de la tierra una densa capa cuya condensación posterior debió ser el origen de los océanos.

No puede ocultarse que —como queda dicho— tales ideas son harto especulativas, pero lo cierto es que, aun hoy, la actividad volcánica se sigue manifestando en muy diversas formas, si bien en escala incomparablemente menor; además de los volcanes, existen las solfataras, fumarolas, geiseres, etcétera, que constituyen los últimos vestigios de la pasada inquietud geológica de la tierra. Los vapores expulsados y las aguas que afloran a la superficie contienen grandes cantidades de productos generalmente ácidos, capaces de modificar de modo profundo la configuración química de la corteza terrestre. Así, los ácidos fluorhídrico y clorhídrico expulsados en algunas fumarolas, pueden formar, en presencia de los silicatos, combinaciones metálicas volátiles, que, al reaccionar con el agua, depositan el metal al estado de óxido. De hecho, ciertos yacimientos o depósitos locales de algunos metales, como boro (depósitos de bórax), litio, rubidio, cesio, bario y aun hierro, se cree han tenido dicho origen.

Veamos ahora cómo podremos imaginarnos la separación que ha tenido lugar en la fase gaseosa, hasta llegar a una atmósfera con la composición actual, casi idéntica en todos los puntos de la tierra. Hemos consignado antes que, con gran probabilidad y a consecuencia de las temperaturas elevadísimas, la tierra debía hallarse inicialmente desprovista de todo entorno gaseoso que, más o menos, pudiera recordar a nuestra atmósfera actual. La mayor parte de los gases, no pudiendo ser retenidos por el campo gravitatorio, han escapado al espacio, pero cierto número de ellos (como el caso ya citado del vapor de agua) han tenido, además, otro destino. Así, aunque el nitrógeno —gas de extraordinaria inercia química— excitado térmicamente se vuelve reactivo y susceptible de combinarse con diversos metales para formar nitruros, una cantidad considerable del mismo ha quedado retenida en el magma fundido. Lo mismo debió suceder con el anhídrido carbónico, y la restitución posterior de tales gases ha dado lugar a una atmósfera que, por entonces, estaría integrada principalmente por nitrógeno, vapor de agua y gas carbónico. Una vez engendradas las inmensas masas oceánicas, cuyas aguas eran sobremanera ricas en productos ácidos, comienzan a actuar sobre las rocas por ellas bañadas, extrayendo, en primer término, sodio y otros metales alcalinos y alcalino-térreos, y formando así la sal marina. Por su parte, el anhídrido carbónico reacciona con la cal y la magnesia para dar lugar a bicarbonatos solubles, con lo que unos cuantos elementos químicos fueron extraídos de las rocas y concentrados —en grandes cantidades— en las aguas del mar. Alcanzado el límite de solubilidad, las sales disueltas comienzan a precipitar sucesivamente empezando por el bicarbonato ferroso, quien, al depositarse, forma extensas áreas de hierro sedimentario. El hecho mismo de que, en tales depósitos, el hierro aparezca siempre en su grado inferior de oxidación, demuestra que la atmósfera se hallaba entonces casi desprovista de oxígeno, el cual debió desaparecer en el proceso de oxidación de los metales, en especial, del propio hierro.

En una etapa ulterior, aparece la vida sobre la tierra. El elevado contenido de carbónico en la atmósfera y las condiciones óptimas de temperatura, debieron favorecer el desarrollo de una vegetación exuberante que, produciendo oxígeno en gran escala, ha sido el punto de partida de una serie de procesos que modificaron profundamente la configuración externa de nuestro planeta. Las aguas de los océanos, cargadas de anhídrido carbónico, actúan como reguladores del contenido de éste en el aire, devolviendo a la atmósfera aquel que las plantas consumen por virtud de la función clorofiliana y como consecuencia de la cual se libera oxígeno. Cuando la cantidad de carbónico en disolución es insuficiente para atender a los requerimientos de la vida vegetal, los bicarbonatos solubles (principalmente de calcio y magnesio) ceden una parte de su contenido en aquél y precipitan, al mismo tiempo, en forma de carbonatos, originando así enormes depósitos sedimentarios, de los que los Alpes Dolomíticos constituyen un ejemplo bien conocido.

Es interesante observar que la pérdida de calcio o en el mar, ha tenido un efecto profundo en el curso de la evolución. Todos los animales marinos precarboníferos estaban reciamente protegidos por una coraza calcárea,

pero, con el tiempo, ésta fue desapareciendo en forma gradual al disminuir la proporción de sales cálcicas disueltas en los océanos.

Las regularidades citadas acerca de la distribución de los elementos químicos en las regiones de la superficie terrestre accesibles a nuestra observación, no son, sin embargo, fáciles de reconocer. Las separaciones más interesantes desde nuestro punto de vista tuvieron lugar en la sedimentación de la capa de silicatos, precipitándose, en primer término, los componentes de punto de fusión más elevado y enriqueciéndose así determinados elementos en el magma todavía fundido. Cabe observar inmediatamente la extraordinaria importancia práctica de la Geoquímica para lograr un conocimiento adecuado de las reservas en primeras materias que encierra nuestro planeta. Por de pronto, proporciona el fundamento teórico para explicar la formación de determinados yacimientos e indica qué elementos son paragenéticos, qué papel desempeñan el agua y el viento en la disgregación de minerales y rocas, y dónde es de esperar la aparición de determinados sedimentos de materiales técnicamente útiles.

Además, la Geoquímica ha permitido llegar al conocimiento de que, las primeras materias indispensables para la vida, están implicadas en ciclos permanentes. Así, bajo la acción catalítica de la clorofila, el pigmento verde de los vegetales, y, sobre todo, en presencia de la luz solar, las plantas llevan a cabo un complicado proceso en virtud del cual, previa fijación de anhídrido carbónico de la atmósfera, así como de agua, sintetizan sus hidratos de carbono. De las plantas, pasa el carbono al hombre y animales, en los cuales se quema parcialmente de nuevo a carbónico para suministrar la energía calorífica que requieren ulteriores procesos de síntesis de moléculas complejas. Otra parte del carbono revierte a la atmósfera, asimismo en forma de anhídrido carbónico, en el curso de la putrefacción de restos vegetales y animales. También el fósforo, elemento indispensable para los seres vivos, muestra un ciclo análogo en el mar. Con la muerte de los habitantes submarinos, se produce una sedimentación ininterrumpida de combinaciones fosforadas en el fondo de los océanos, que representa una ingente despensa de alimentos. Por efecto de las corrientes marinas, el fósforo vuelve a la superficie de las aguas. La gran riqueza piscícola de los mares islandeses y la abundancia de ballenas en las aguas del Antártico, tienen su causa última en el flujo constante hacia el Polo Norte de las aguas profundas cargadas de sustancias fosforadas y nitrogenadas. Por otra parte, el desarrollo del *plankton*, utilizado como alimento, se halla decisivamente favorecido por la mayor solubilidad del oxígeno en el agua fría. Así se explica que los mares tropicales y subtropicales, cuyas aguas poseen una temperatura relativamente elevada frente a la de los polares, constituyan una especie de desiertos marinos infecundos, pues, en ellos, además de faltar el aporte de sustancias nutritivas procedentes de las aguas profundas, acontece que, debido a la mayor temperatura, la solubilidad del oxígeno es inferior. En este ciclo también interviene el nitrógeno, elemento indispensable en la síntesis de los albuminoides. Pero, a su vez, dicho elemento participa en otro muy importante que, con intervención de ciertas bacterias, tiene lugar entre el aire (que contiene un 78 % de nitrógeno) y algunas plantas. Ciclos en los que se hallen implicados organismos existen igualmente en el caso del vanadio —elemento necesario en la respiración de los crustáceos—

y probablemente también en el del molibdeno. Con seguridad, se conoce la existencia de un ciclo orgánico en el yodo para el *zooplankton* y *fitoplankton*, aparte de otro inorgánico entre el aire, las aguas de lluvia, el suelo, los ríos y el mar.

Estos ciclos en los que intervienen sustancias de interés biológico fundamental, no son, sin embargo, perfectos; por el contrario, presentan una serie de fallos que excluyen toda posibilidad de una regeneración completa e indefinida del elemento o compuesto correspondiente. Así, por ejemplo, el anhídrido carbónico es arrastrado por las precipitaciones atmosféricas y, en el suelo, contribuye en forma decisiva al ataque de las rocas; los productos formados son transportados (mecánicamente o en disolución) al mar, de donde —al menos, en un futuro previsible— no retornarán. De esta suerte, han desaparecido grandes cantidades de anhídrido carbónico para constituir enormes sedimentos carbonatados, que, en ocasiones, han vuelto a emerger en forma de macizos montañosos. Por otra parte, grandes masas de plantas —sobre todo, en pasadas épocas geológicas— no han llegado al último estadio de la putrefacción, sino que se han transformado en carbón, constituyendo así una reserva de energía que tantos beneficios ha proporcionado y proporciona al hombre. Con ello, han sido separadas de la atmósfera grandes cantidades de anhídrido carbónico, que los procesos de combustión en las instalaciones industriales sólo devuelven en parte, pues no siempre son los yacimientos de carbón accesibles al hombre, bien por estar situados debajo de los océanos o porque su profundidad es superior a las posibilidades de la técnica actual. En todo caso, cuando el tiempo se mide en la escala geológica, se aprecia un empobrecimiento progresivo de carbónico en la atmósfera, que, en parte, es compensado por las nuevas aportaciones procedentes de volcanes y grietas en la corteza terrestre, pero que, en definitiva, no es posible detener. Una cosa análoga acontece con el fósforo. De las combinaciones de este elemento sedimentadas en las profundidades marinas, sólo una parte se recupera para el ciclo biológico. La pérdida resulta compensada de un lado, por los fosfatos que proceden de la disgregación de rocas, y, de otro, por el elevado contenido en fósforo de los residuos del metabolismo humano que, recogidos en una red de canalizaciones urbanas, son conducidos a los ríos en todos los países civilizados; con ello, pierde el hombre de modo continuo e irreversible tan importante materia. También el yodo está desapareciendo en los sedimentos marinos, y el vanadio se enriquece —a través del reino animal— en algunos yacimientos de hierro y carbón.

La Naturaleza no trabaja, pues, sin pérdida; pero los períodos de tiempo que han de transcurrir para que, por vía natural, se modifique sensiblemente la faz biológica de la tierra, son de magnitud geológica. Tales variaciones sólo podrían ser observables en períodos históricos, cuando una causa persistente actuase sobre el curso natural de los acontecimientos, y, de hecho, influencias de este tipo son llevadas a cabo por el hombre desde la antigüedad y cada vez en mayor escala.

En su legítima aspiración de que la Naturaleza pueda servir a sus necesidades materiales y energéticas, el hombre, desconociendo las relaciones más profundas, puede provocar efectos que, en ocasiones, son más nocivos que beneficiosos. Cada vez son más numerosos los ejemplos en los que la

codicia incontrolada en su eterna lucha contra un ambiente desfavorable, priva al hombre justamente de aquellas fuentes valiosas que él mismo busca y protege. Las plagas de cactus y de conejos, como consecuencia de irreflexivas colonizaciones, han cambiado el cuadro de la agricultura australiana en forma radical. La desconsiderada destrucción de bosques ha transformado —en un período de tiempo asombrosamente corto— en secas y estériles, regiones húmedas y fértiles de los países mediterráneos y ciertas zonas de Norteamérica. La exterminación de focas y ballenas en los mares árticos y el mismo destino que, a pesar de todas las medidas de protección, espera a sus congéneres del antártico, corta definitivamente toda futura posibilidad de un aprovechamiento racional de tan valiosa reserva animal. La desolación de las estepas africanas parece tan segura como la aniquilación de los enormes rebaños de bisontes en Norteamérica.

Esta evolución exterminadora provocada por el hombre, que tiende a despoblar la biosfera o bien a hacerla parcialmente inhabitable, tampoco se ha detenido ante las reservas en minerales y energía de nuestro planeta. Tales reservas pueden ser de dos clases: aquellas que, en la escala del consumo humano, pueden considerarse como inagotables y aquellas otras cuya duración es esencialmente limitada. Al primer tipo pertenecen el oxígeno, nitrógeno y los gases nobles del aire, que constituyen una fuente muy valiosa, sobre todo, en la explotación de menas, en la preparación de abonos y en la industria de la iluminación. Respecto de los demás planetas, la tierra ha sido altamente favorecida en cuanto a su riqueza en agua se refiere; pero si bien, en conjunto aquélla es más bien elevada, su distribución, en cambio, siendo tan desigual, planteará difíciles problemas al técnico del futuro. De enorme trascendencia económica sería que, mediante sistemas de riego y otras medidas adecuadas, pudieran transformarse en florecientes jardines y fértiles terrenos (como ya lo fueron en otras épocas), zonas en la actualidad totalmente desérticas del Norte de Africa. Un efecto concomitante a tales planes pacíficos de conquista sería, además, la moderación de condiciones climáticas extremas. Tampoco la sal común, la cal y las combinaciones de magnesio y aluminio, que forman poderosos depósitos, llegarán jamás a ser materias escasas. Podría decirse que el futuro pertenece a los metales ligeros que, aparte de su gran abundancia global, se hallan concentrados de preferencia en la corteza terrestre. Es, sin embargo, curioso hacer notar que casi todo el aluminio que obtiene la industria procede de un mineral más bien escaso (bauxita), pese a que dicho elemento es uno de los constituyentes fundamentales de las arcillas, tan extendidas en la naturaleza.

Pasemos ahora a considerar el problema, más serio, que plantean aquellos otros depósitos cuyo agotamiento se prevé para un futuro más o menos próximo. A esta clase pertenecen, ante todo, el carbón y los metales pesados, como níquel, cobre, zinc, estaño y plomo, para los cuales las necesidades son cada vez mayores. Otros metales, como vanadio, cromo, manganeso, molibdeno, wolframio, platino, cadmio, tántalo y cobalto, se emplean preferentemente para ennoblecer los anteriores. De ellos ha de disponerse también en cantidad suficiente como material de construcción de cierta clase de utensilios y para ser utilizados como catalizadores en la industria química.

La corteza terrestre representa, en realidad, una reserva gigantesca de metales pesados. En cada tonelada de roca existen, por término medio, 4,7 Kg. de hierro, 20 g. de zinc, 18 g. de níquel, 10 g. de cobre, 7 g. de wolframio, 1,5 g. de molibdeno y 0,8 g. de plomo; pero una explotación económica de dichos metales cae fuera de toda consideración. Sólo son a este respecto interesantes las concentraciones metálicas que, por virtud de los procesos geoquímicos ya aludidos, aparecen en determinados lugares de la superficie terráquea. La formación de tales depósitos exigió el transcurso de millones de años como consecuencia de un proceso que, casi con seguridad, no volverá a repetirse. Su aprovechamiento no podrá llevarse a cabo más que una vez. La demanda de primeras materias es hoy de tal cuantía que, con el tiempo, ni los más potentes yacimientos podrán subvenir a ella; se prevé que, al ritmo actual, algunos metales, como níquel, cromo, zinc, estaño y plomo, se agotarán antes de un siglo. Las cifras son concluyentes a este propósito. Desde el siglo pasado hasta nuestros días, se ha multiplicado en forma asombrosa la cantidad de hierro que anualmente se extrae de la tierra. En 1961, el consumo de hierro, por persona, en los Estados Unidos, fue de 488 Kg.; suponiendo que la población mundial fuera, en números redondos, de 3.000 millones de habitantes y el consumo individual el ya consignado, las necesidades en dicho metal importarían unos 1.340 millones de toneladas por año. Las reservas del gran depósito de hierro de Cerro Bolívar, en Venezuela, considerado como el mayor descubrimiento del siglo, se estiman en unos 500 millones de toneladas de mena. En su virtud, la demanda de hierro podría sólo satisfacerse mediante el descubrimiento anual y explotación exhaustiva de casi tres yacimientos iguales al de Cerro Bolívar. Entre los años 1900 y 1925 se ha extraído de las minas una cantidad de carbón superior a la consumida en toda la historia de la Humanidad anterior a 1900. Si todos los países consumieran proporcionalmente la misma cantidad de cobre que los situados en la vanguardia de nuestra civilización, las reservas en dicho metal (unos 100 millones de toneladas) sólo alcanzarían para unos 5 años. Estas cifras adquieren para el hombre un valor dramático si se tiene en cuenta que, de las reservas totales en primeras materias hasta una profundidad en el suelo de unos 1000 metros, sólo la cienmilésima hasta la millonésima parte existen en la forma de depósitos que puedan ser prácticamente explotables.

La frontera entre los metales comunes y aquellos que, con denominación algo vaga, se designan como metales no comunes, está cambiando constantemente. Un metal hoy raro puede transformarse mañana en familiar. Un ejemplo bien conocido es la forma en que el aluminio y el magnesio, metales considerados como raros hasta hace algunos años, han pasado a adquirir la máxima importancia técnica e industrial. Titanio y zirconio están a punto de experimentar un proceso análogo, debido principalmente a sus excelentes condiciones para la construcción de plantas de energía nuclear. Otro tanto cabe decir, en fin, del germanio, el elemento sensible en los transistores.

Además, la evolución que ha experimentado, desde el siglo pasado, el concepto de la estrategia militar se ha reflejado, sobre todo, en el incremento de los recursos productivos y ha exaltado la valoración de lo que ahora se llaman *materias estratégicas* y *críticas*, es decir, de sustancias

esenciales en caso de guerra, cuya obtención en cantidad y calidad adecuadas en un determinado país, es insegura en un tiempo limitado. Necesidades de este orden se han traducido en el acaparamiento de cierto número de minerales (casi siempre los mismos en los diversos países) que de esa forma desaparecen del mercado mundial y ven así aumentada su estimación en una medida antes insospechada.

Son tres las principales circunstancias que determinan la utilidad probable de un metal: disponibilidad, facilidad de extracción y propiedades. Hemos señalado reiteradamente que la moderna civilización demanda cantidades inmensas de productos metálicos, pero, a menos que el hombre pueda extraerlos de la tierra en la cuantía necesaria, su uso ha de restringirse por excelentes que sean sus propiedades; así, los metales del grupo del platino serían sustancias de inmejorables cualidades que añadir a la lista de materiales estructurales, si de ellos pudiera disponerse en cantidades, no de algunos kilogramos, sino de toneladas. La dificultad en la recuperación de un metal, que afecta mucho a su precio y producción en gran escala, juega un papel a veces decisivo, siendo así por lo que metales (zinc, mercurio, estaño) con propiedades generales inferiores, pero, en cambio, fáciles de aislar, se vengán utilizando con profusión desde hace ya varios siglos. El hierro, muy abundante y, además, fácil de extraer, adquirió pronto un papel dominante.

Los organismos oficiales de Norteamérica han hecho una estimación de las necesidades que este país tendrá hacia 1975 respecto a sus primeras materias, y así como para el zinc y cobre se prevé un aumento en el consumo del 50 al 65 %, 135 % para el plomo y más del 250 % para aluminio y wolframio, para el hierro en cambio, las previsiones ascienden sólo al 60 %. La reducción prevista para el futuro en el consumo de este metal, es una indicación expresiva del cambio notable observado desde la segunda guerra mundial en el cuadro de los metales básicos. Siempre se ha considerado la producción de acero como índice de la potencia económica de un país, pero de unos cuantos años a esta parte el hierro está perdiendo, como tal indicador, su posición privilegiada. Ello se acusa, sobre todo, en los países de vanguardia, tales como Estados Unidos, donde las estadísticas demuestran que el consumo de acero "per capita" en 1961 ha sido menor que en varios países europeos, y se espera que, en un futuro próximo, esta diferencia se acentúe.

Y es que en sus aplicaciones encuentra hoy el hierro una competencia creciente en el aluminio, magnesio, titanio, cemento y, asimismo, en plásticos del tipo del polietileno y polipropileno; y en este progresivo declinar del hierro se hallan implicados graves problemas económicos. Desde luego, no es de esperar un desplazamiento inmediato del acero en los países de gran desarrollo económico, donde las exigencias en dicho metal son —y aun seguirán siendo— considerables, pero, sin duda, las naciones de economía inferior deberán estudiar cuidadosamente las posibles alternativas antes de fundamentar su desarrollo ulterior en una mayor producción de acero.

La amenaza planteada por el agotamiento de los recursos minerales comenzó a despertar la alarma poco después del último conflicto mundial, hasta el punto que, en algunos países, se pensó —e incluso se inició— la

explotación de menas inferiores. Por fortuna, el desarrollo de nuevas técnicas de exploración ha permitido descubrir en época reciente depósitos minerales de tal importancia, que han incrementado de modo considerable las reservas conocidas de nuestro planeta. Así, por ejemplo, los extensos yacimientos de hierro de Ontario y Cerro Bolívar fueron hallados merced al empleo de un magnetómetro, que mide las anomalías o irregularidades del flujo magnético terrestre producidas por minerales enterrados; al mismo procedimiento se debe el hallazgo de los yacimientos de cobre en Quebec, de plomo en Missouri y de bauxita en Surinam y Venezuela. Con las técnicas de inducción electromagnética, tan utilizadas en tiempos de guerra para detectar minas, se descubrió el enorme depósito de níquel en Manitoba y el de cobre en Ontario.

Todo esto implica, por otra parte, un problema geopolítico bastante serio. Como es lógico, son los países de la vieja Europa aquellos cuyas existencias y riquezas minerales se han escudriñado más exhaustivamente y mejor se conocen sus posibilidades actuales y futuras; por el contrario, cabe muy bien dentro de lo posible que, en aquellas regiones de difícil acceso (Siberia, Asia Central, el interior africano, el Norte de Canadá y quizá también la Antártida), existan ricos yacimientos no descubiertos aún por el hombre. Huelga decir que, con ello, el potencial económico se irá desplazando cada vez más a los países citados, de los que, desgraciadamente, dependerá la industria europea en escala creciente. En la actualidad, el mercado de wolframio (de tanta importancia en la industria bélica) está controlado casi exclusivamente por China, que, además, posee las nueve décimas partes del antimonio mundial, mientras que en Malasia se hallan los yacimientos de estaño más importantes de la tierra; sólo dos o tres países europeos (entre ellos, España) pueden considerarse autárquicos respecto al zinc, cuya gran producción radica en Norteamérica, así como la del molibdeno, níquel y titanio. Brasil se ha convertido en el primer país productor de berilio y, en fin, Sudáfrica posee las tres cuartas partes del cromo mundial.

Acaso pudiera parecer sorprendente la ausencia de la plata y el oro en la lista de metales pesados de real importancia. De hecho, ambos elementos son, técnicamente, de aplicabilidad limitada. La aureola con que el ojo del profano rodea a dichos metales, pierde mucho de su brillo ante la mirada exigente del técnico, constituyendo un ejemplo característico del desplazamiento, por la moderna técnica, del antiguo concepto de valoración. Como elementos de número atómico impar, son escasos y, además, nobles y relativamente blandos, pero aleados con cobre se prestan excelentemente para acuñar monedas. En cambio, tanto el uno como el otro parecen tener, de momento, pocas aplicaciones técnicas, por lo que no es de prever sean objeto inmediato de una desenfrenada especulación futura, como ocurrió en el caso del platino. Durante varios siglos, la relación de valores entre oro y plata fue de 12 a 1. Hacia mediados del siglo pasado, fueron descubiertos importantes filones de oro, con lo que el precio de la plata ascendió y la relación pasó a ser de 9:1. Sin embargo, a partir de 1870 el valor de la plata comenzó a bajar y hubiera sido hoy casi irrisorio de no mediar una protección deliberada. Lo curioso es que la causa de ello ha sido el florecimiento de la moderna electrotecnia, que demanda grandes cantidades de

cobre. Este metal ha de obtenerse en el más alto grado de pureza, si se quiere que la pérdida en el transporte de corriente se mantenga entre límites tolerables. Ahora bien, el afinado más eficaz y barato del cobre es por vía electrolítica, en la que, como subproducto en forma de barras anódicas, al lado de otros metales nobles en menor cuantía, aparecen siempre pequeñas cantidades de plata. De esta suerte, la Electrotecnia desencadenó la desvalorización de dicho metal, del que necesariamente se producen cantidades superiores a las que el mercado demanda. Para la economía de aquellos países con patrón plata, como Méjico y China, ello ha tenido efectos catastróficos.

El caso citado pone de manifiesto cuán difícil es mantener un equilibrio permanente entre la demanda y la oferta. La dificultad en el terreno económico que plantea una superproducción, sólo puede ser superada creando nuevos campos de aplicación. Así, durante los últimos años, las fábricas americanas de automóviles utilizaron la plata como aditamento en revestimientos metálicos, para lo cual se presta de modo excelente. Estas aleaciones contienen además, cadmio, cuya producción viene, en cierta manera, controlada por la de zinc, ya que, como subproducto, aparece en su metalurgia. A consecuencia de sus buenas condiciones protectoras, la demanda de cadmio crece constantemente y su escasez plantea ahora dificultades a la industria. Un nuevo ejemplo lo ofrece el rodio, fiel acompañante del platino; es un metal de hermoso brillo plateado y de gran estabilidad química que, no obstante, poseía dominios de aplicación muy restringidos. A fin de distraer el exceso de su producción, se halló un procedimiento para recubrir galvánicamente objetos de adorno con una capa de rodio; pero entonces la demanda creció tanto que la cantidad de metal disponible no alcanza ya para tales fines.

Una forma de subvenir a las necesidades y de retrasar en lo posible la inevitable penuria que, de algunas materias, ha de sentirse, consistiría en intensificar la recuperación de materiales viejos que, una vez cumplido el fin para el que fueron destinados, se desechan, de ordinario, como inservibles. En el futuro, esto ha de tener una gran importancia. El químico ha de hallar nuevos métodos de extracción y enriquecimiento de menas que permitan explotar minerales más pobres. Ya en la actualidad se obtienen cobre, berilio, hierro, grafito, etc. aplicando un método químico-físico de concentración de menas llamado de *flotación*, a partir de minerales que, en el estado de la técnica de hace medio siglo, no hubieran sido explotables. Las escorias amontonadas en el curso de muchos años son sometidas a modernos tratamientos, con lo que, de productos de desecho que eran, se convierten de esta suerte en depósitos económicamente interesantes. El estudio detenido de los productos intermedios o secundarios que se forman en el desarrollo de un proceso técnico, abre, a veces, nuevas posibilidades, como en el caso —ya indicado— del afinado electrolítico del cobre. Las escorias Thomas poseen una riqueza en fósforo del 11 %, mientras que en el mineral de partida el contenido en dicho elemento era del 0,5-0,8 %. De las menas niquelíferas canadienses procede gran parte del platino y paladio que utiliza el comercio y cuya explotación directa no hubiera sido posible. La gran ventaja de obtener un producto considerado como secundario en un proceso industrial es el ahorro, no sólo en horas de trabajo,

sino también de energía que, de otra suerte, hubiera sido preciso consumir. Todo el uranio extraído en los depósitos de Sudáfrica es —con pocas excepciones— un subproducto en la obtención del oro; y en los yacimientos del norte africano, que siguen en orden de importancia, la explotación del uranio es rentable por ser un acompañante —¡ya no tan indeseable!— de los fosfatos.

Una posible solución del futuro habría, pues, que buscarla en aquellos campos no considerados, hasta ahora, como técnicamente explotables. En este sentido, cabe citar el beneficio de menas a profundidades superiores a las usuales, así como la extracción de sustancias disueltas —bien que en mínimas proporciones— en los inmensos depósitos marinos. Tanto en un caso como en otro, la técnica se vería frente a problemas de nuevo tipo, algunos de solución difícil de entrever. La circunstancia de que, con la profundidad, crece más o menos regularmente la temperatura, hace que, a profundidades superiores al kilómetro, las condiciones de trabajo sean radicalmente distintas de la minería usual, en la que el hombre es el elemento base. De otra parte, el océano constituye un yacimiento líquido de acceso más fácil, pero donde las concentraciones son, en general, ínfimas; el contenido en boro, por ejemplo, es de 4,8 partes en un millón, mientras que el de hierro —elemento abundante en la superficie sólida— es de 2 partes en mil millones. Con todo, los problemas mecánicos y químicos ligados a la obtención de sustancias en tales condiciones, aunque formidables, llegarían, sin duda, a ser resueltos; de hecho, algunos elementos raros, como el berilio, han comenzado ya a ser extraídos del océano en escala incluso industrial. Es una circunstancia afortunada el hecho de que ciertos organismos animales y vegetales tengan el privilegio de asimilar selectivamente determinadas sustancias que, de esta suerte, se concentran en ellos. Por ejemplo, ciertas algas marinas pueden concentrar el yodo tan eficazmente, que durante muchos años han constituido la fuente comercial más importante de dicho elemento. No menos notable es que el cobre y aun el vanadio sean constituyentes esenciales en la sangre de algunos animales marinos, a pesar de que, en las aguas oceánicas, el contenido en los mismos es del orden de una parte en diez mil millones. Tales hechos ponen de manifiesto que los métodos biológicos de concentración, además de cómodos para el hombre, son tan eficaces, que su desarrollo en gran escala parece quizá interesante. Es evidente, sin embargo, que no podrían constituir una solución definitiva, entre otras razones, porque algunos elementos tan importantes como el estaño y el wolframio no existen en el mar en cantidades apreciables.

II

Los recursos energéticos de la Tierra

Es característica del hombre moderno el desenfrenado consumo de energía a que van ligadas casi todas sus actividades de la vida cotidiana. Hace sólo un par de siglos, todas sus fuentes de energía partían del aprovechamiento de la fuerza de los vientos y de las aguas, pero ahora la situación

es fundamentalmente distinta. La energía por individuo se multiplicó enormemente cuando, mediante la máquina de vapor y los motores de combustión, logró transformarse, en gran escala, energía química en trabajo mecánico. Y la revolución que ello desencadenó en la vida del hombre fue uno de los fenómenos más complejos y profundos derivados de la Química. El profano no tiene generalmente conciencia de que la técnica actual, cuya intervención percibe más o menos claramente en todos los aspectos de su vida, se sostiene merced a fuentes de energía de naturaleza casi exclusivamente química, pues alrededor del 80 % de la producción mundial de energía procede de la combustión de petróleo y carbón, un 15 % de la del gas natural y sólo un 2 % tiene su origen en saltos hidráulicos. Este último porcentaje sería todavía menor si las propiedades de la corriente eléctrica no hicieran posible transportarla a grandes distancias.

Las reservas que la corteza terrestre encierra aún en petróleo y carbón son necesariamente limitadas y, además, consumidas a ritmo creciente. Es muy probable que con el hallazgo de nuevos yacimientos carboníferos o de aceite mineral, nuestras predicciones tengan que experimentar sucesivas rectificaciones, pero, aparte de que tales descubrimientos son cada vez menos probables, ello —como ya indicábamos en otro lugar— no haría más que retrasar —quizá no mucho— una situación insoslayable. En todo caso, el efecto calorífico de las existencias de petróleo actualmente conocidas es equivalente a unos 56 mil millones de toneladas de carbón, cantidad sólo 40 veces superior al consumo en 1960. Con tal evaluación se calcula, por ejemplo, que los yacimientos americanos se agotarían en el breve plazo de 12 años. Por fortuna, las reservas reales de combustible líquido deben ser muy superiores a las que hoy conocemos; la exploración de nuevos yacimientos implica costosas perforaciones del terreno, que únicamente se llevan a cabo cuando lo exigen las necesidades comerciales. Así resulta que de año en año aumentan las reservas petrolíferas "comprobadas", duplicándose casi regularmente cada 12 años. Esto hace altamente aventurada una evaluación, siquiera sea aproximada, de las reservas totales del precioso combustible, y, por ello, las estimaciones más recientes oscilan entre un equivalente de 0,5 y 1,6 billones de toneladas de carbón. Es verdad que la industria conoce ya algunos métodos para obtener, por vía sintética, en condiciones de presión y temperatura fácilmente asequibles, mezclas de hidrocarburos parecidas a los petróleos naturales, pero aun cuando tales métodos han de aumentar, sin dula, en importancia con el tiempo, no podrán satisfacer las necesidades de la creciente mecanización de nuestra técnica.

Las perspectivas respecto al carbón son algo más halagüeñas, puesto que sus reservas conocidas se estiman en 2'32 billones de toneladas; y aunque tan sólo fuese recuperable una parte de las mismas, su duración se prevé para varios siglos. Además, cantidades muy superiores a las de carbón existen todavía en la litosfera en forma de pizarras bituminosas, cuyos yacimientos son hoy explotados únicamente allí donde, a la circunstancia favorable de un elevado contenido en productos volátiles, se añade la posibilidad de explotación al aire libre. Por su parte, las reservas de gas natural se han cifrado en unos $1,58 \cdot 10^{13}$ metros cúbicos. En 1960, el consumo total de energía fue equivalente a 4.235 millones de toneladas de carbón, pero ya se calcula que en el año 2.000 dicho consumo será unas cinco veces mayor,

con lo que, operando con un valor medio, la duración de todos los combustibles fósiles no será más allá de unos pocos siglos.

Durante milenios, el combustible y la fuente de energía más importante para la Humanidad fué la madera. Por fortuna, tal aplicación, en nuestros días, ha perdido no poco en importancia, pues la madera constituye un material tan útil por diversos conceptos, que su empleo como combustible es, muchas veces, un dispendio reprobable. La energía eléctrica de origen hidráulico se cifra actualmetne en una cuantía equivalente a unos 150 millones de toneladas de carbón, y una evaluación más bien favorable de las posibilidades mundiales, indica que, a lo sumo, dicha cantidad podrá llegar a multiplicarse por 20; es decir, en todo caso, no absorberá más que una pequeña fracción de las futuras necesidades. Los saltos hidráulicos constituyen, no obstante, la fuente de energía principal en países montañosos tales como Suecia, Noruega, Suiza, Grecia, Irlanda y Portugal. También ha sido considerada la posibilidad de obtener energía aprovechando las mareas oceánicas, pero, según parece, las instalaciones necesarias son complicadas y el rendimiento, harto pequeño; la energía que puede proporcionar la de Severn Barrage, hoy por hoy seguramente la mejor acondicionada, es sólo equivalente a un millón de toneladas de carbón por año. En época reciente, la potencia hidráulica ha polarizado proyectos de riegos, transporte fluvial, control de alimentos, etc. Las explotaciones de esta naturaleza, ponen además, de manifiesto la necesidad de una colaboración en escala internacional. Así, se ha propuesto hace pocos años la construcción de una planta hidroeléctrica en el río Tsangpo (Tibet) capaz de suministrar anualmente de 150.000 a 330.000 millones de Kw. equivalentes a unos 130-200 millones de toneladas de carbón. La transcendencia de tal proyecto en el campo industrial sería tan grande que, por ejemplo, se podría multiplicar por cinco la producción mundial de aluminio, cuya extracción —como es sabido— exige gran cantidad de energía. Asimismo, se ha sugerido la posibilidad de embalsar en el Mar Rojo, las aguas del Océano Indico; la evaporación natural rebajaría en unos 4 metros por año el nivel del Mar Rojo, calculándose que, al cabo de pocos años, se podría generar una energía equivalente a unos 35-36 millones de toneladas de carbón por año. Posibilidades del mismo tipo existen en el Estrecho de Gibraltar, así como en todos aquellos lagos que, como los andinos y los de las Montañas Rocosas, están situados a grandes altitudes. En fin, tanto el calor procedente del interior de la tierra, como la transformación práctica de la fuerza del viento, son fuentes de energía de interés puramente local u ocasional, y no es probable lleguen a constituir nunca una contribución importante a la producción total de energía en el mundo.

Desde que fueron inventadas las máquinas térmicas, la mayor parte de la energía útil proviene, en último término, de una combustión seguida de un ciclo de operaciones en un sistema cuyo rendimiento depende de la diferencia entre las temperaturas de una región caliente (caldera u hogar) y otra fría (refrigerante). Las instalaciones prácticas de esta clase pueden alcanzar —en el mejor de los casos— un rendimiento del orden del 33 por ciento, aunque ya se prevé que, contando con el perfeccionamiento técnico, aquél podrá elevarse al 45 %. Pues bien, si los procesos de combustión se llevaran a cabo electroquímicamente mediante una pila galvánica, los ren-

dimientos podrían aumentar de modo considerable. De ahí, el interés de lograr una "pila de combustión" electroquímica en la que la combustión (a temperaturas moderadas) de carbón, hidrógeno u óxido de carbono, generase fuerza electromotriz. Por desgracia, se presentan dificultades prácticas muy grandes empleando los combustibles convencionales (sólidos o líquidos) en la construcción de tales dispositivos; por ejemplo, una pila de carbón, además de requerir temperaturas de unos 700° C, mostraría una resistencia interior muy elevada. Uno de los intentos de esta índole más interesantes parece ser el realizado recientemente por F. T. Bacon, en la Universidad de Cambridge. En esencia, se trata de una pila de hidrógeno-oxígeno con un electrolito líquido (disolución del 27 % de hidróxido potásico) contenido en un recipiente metálico poroso, que trabaja, bajo presión, a una temperatura de unos 200° C mantenida por el calor desarrollado en el propio proceso de pila. A una baja resistencia interior, une este elemento la posibilidad de alcanzar un rendimiento del 98 %. Por la ausencia total de humos, la célula Bacon ofrece, además, excelentes perspectivas de aplicación a vehículos de tracción, aunque su gran tamaño como planta técnica (superior al de una máquina diesel) limitaría, de momento, tales posibilidades a la tracción ferroviaria.

Transformada en una u otra clase, es, en realidad, la energía solar la fuente última de todas las demás. No tiene, pues, nada de extraño que, desde hace ya más de un siglo, se esforzara el hombre en idear algún procedimiento para aprovechar la energía que la tierra recibe tan generosamente y cuyo valor se estima en unos $1,8 \cdot 10^{17}$ watios por minuto. No es ésta una cifra que podamos representarnos fácilmente; baste decir que cada 40 horas, nos envía el Sol una cantidad de energía equivalente a todas las reservas de carbón, petróleo y gas juntos. En el aprovechamiento, tan completo como fuera posible, de estas inmensas disponibilidades, aplicó el hombre todas aquellas técnicas que, en cada época, consideraba la Física como más plausibles, pero, por desgracia, ninguno de los métodos pudo competir con los combustibles usuales o con las plantas hidroeléctricas. Con todo, los progresos realizados durante estos últimos años, bien en el perfeccionamiento de las técnicas o con el hallazgo de nuevos métodos, han hecho revivir recientemente el interés hacia este campo de la investigación. Históricamente, el primer intento para convertir la radiación solar en energía eléctrica se fundaba en la fuerza electromotriz que se origina cuando, en un circuito integrado por dos metales, las dos soldaduras se hallan a distinta temperatura. Aun operando con los materiales más idóneos, este procedimiento, que, de resultar eficaz, podría transformar profundamente la configuración de las tierras desérticas africanas, conduce a un rendimiento no superior al 1 % en energía eléctrica. Rendimientos aún menos interesantes se obtienen con las células fotogalvánicas, en las que la fuerza electromotriz se engendra al iluminar tan sólo uno de los dos electrodos sumergidos en un electrolito. En fin, otra posibilidad de convertir en eléctrica la energía solar, consistiría en hacer uso de las bien conocidas células fotoeléctricas, a las que el selenio debe su mayor popularidad; pero este método tampoco hubiera pasado de ser mera curiosidad técnica, si últimamente no hubiera resucitado como consecuencia de los avances registrados en el campo de los semiconductores, cuerpos éstos que, tanto desde el punto de vista

científico como técnico, han polarizado, de unos años a esta parte, la atención de muchos físicos. La sustancia fundamental en la nueva pila solar es el silicio, uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, y el principio operante se basa en los fenómenos que tienen lugar en las superficies de contacto de un semiconductor *n* (donde la conducción eléctrica es por electrones) y otro *p* (en que el defecto de electrones, o —dicho de otra manera— la existencia de huecos positivos, es responsable de la conducción). El silicio químicamente puro, como el diamante y el germanio, tiene, a la temperatura ordinaria, las propiedades de un aislante. Si se le impurifica con mínimas cantidades de un elemento tal como el fósforo o el arsénico, pertenecientes al grupo siguiente de la Tabla periódica, resulta un semiconductor del tipo *n*, pero si la impureza es de algún elemento del grupo anterior, como boro y galio, se obtiene un semiconductor *p*. Como es sabido, la luz puede considerarse integrada por corpúsculos llamados *photones*, cuya energía es inversamente proporcional a la longitud de onda. Cuando un fotón de la energía necesaria incide sobre un cristal de silicio, podrá engendrar un par hueco-electrón con amplia libertad de movimientos dentro del cristal, de tal manera que, bajo la acción de un campo eléctrico, electrones y huecos positivos se acumularán en regiones distintas y engendrarán así una diferencia de potencial que podrá actualizarse en una corriente eléctrica. De esta suerte, la energía luminosa se transforma directamente en eléctrica, con un rendimiento que, en las experiencias preliminares llevadas a cabo en los Laboratorios americanos de la Bell Telephone, llegó a ser del orden del 11 %. No se duda ya que, en plazo breve, tal rendimiento podrá elevarse al 15 o 20 % operando con baterías solares de silicio, pero, no obstante, ha de transcurrir todavía algún tiempo hasta que el aprovechamiento de luz solar por este método pueda competir airoosamente con las fuentes convencionales de energía.

En principio, parece mucho más fácil el empleo directo de la radiación solar en forma de calor, concentrándola convenientemente por medio de lentes o de espejos. Intentos de esta naturaleza, seguramente los más primitivos, han adquirido nueva actualidad merced al perfeccionamiento progresivo en la construcción de los elementos ópticos necesarios. No ha mucho los rusos anunciaron sus planes para la instalación de una gran central de energía solar en Armenia, con la que, empleando 1.300 espejos, esperaban generar unos 2.500.000 kw-h.

Si tanto el número de habitantes como el consumo de energía por individuo permanecieran constantes, se podría cubrir durante mucho tiempo todas las necesidades energéticas. Ahora bien, las estadísticas de los organismos internacionales indican que la población del planeta aumenta muy deprisa, y aunque, en efecto, parecen percibirse algunos signos de estacionamiento en la Europa Occidental, no acontece así en los países asiáticos, donde la aplicación de la medicina moderna se ha de traducir en un ritmo de crecimiento aun mayor. A finales de siglo, se espera que la población mundial llegue a los 6.000 millones de habitantes, y a mediados del que viene, la Humanidad contará con unos 13.000 millones. Actualmente, la población terrestre aumenta en 45 millones por año, pero pronto lo hará en 75 millones anuales, de modo que, cada 40, se duplican más o menos las cifras totales. Además, tal crecimiento vendrá probablemente asociado a un cam-

bio en los hábitos y modos de vida de los pueblos más primitivos para seme- jarse a los europeos, aumentando con ello la demanda de energía por indivi- duo. Una de las principales causas de dicho incremento radica en la ten- dencia a utilizar la energía transformada en electricidad, que es la forma más adecuada tanto para usos técnicos e industriales como domésticos, pues ello implica ya una pérdida esencial bajo la forma de calor.

En resumen, las evaluaciones sobre la demanda de energía que hemos consignado, aun siendo de carácter necesariamente aproximado, ponen de manifiesto los serios problemas del futuro. Tales problemas no son, sin em- bargo, los mismos ni igualmente importantes en los distintos países. De una parte, Norteamérica y unos pocos países europeos parecen disponer de re- cursos suficientes de energía convencional (carbón, petróleo, gas natural y potencia hidráulica); pero de otra, las naciones más industrializadas de Europa se aproximan rápidamente a una situación en la que se verán inca- paces de mantener su actual nivel de vida sin acudir a nuevas fuentes de energía.

A la vista de tales consideraciones, cabe prever las inmensas dificultades que habrían de surgir a la vuelta de una cuantas décadas y que, sin duda, conducirían a un control drástico de las fuentes energéticas existentes. Por fortuna, no parece que pueda llegarse a tal situación, porque la energía nuclear, que ha comenzado ya a ser utilizada, ofrece posibilidades casi ili- mitadas.

Que los núcleos atómicos encierran cantidades de energía muy superio- res a las que se ponen en juego en las reacciones químicas ordinarias, era sabido desde hace ya bastante tiempo. La energía suele expresarse en este campo, en una unidad que recibe el nombre de *electrón-voltio*, entendién- dose por tal la que adquiere un electrón sometido a la caída de potencial de un voltio. Aun en los procesos químicos más exotérmicos, como son, por ejemplo, los de combustión, la energía liberada es del orden de un electrón- voltio por átomo, mientras que en las reacciones nucleares el balance ener- gético se cifra en millones de electrón-voltios por átomo. Esto era ya cono- cido desde el momento en que las reacciones nucleares pudieron ser inter- pretadas e, incluso, artificialmente provocadas. Lo que, en cambio, no se sabía, era la forma de liberar tales energías en gran escala.

Si, pues, los núcleos atesoran energías tan considerables, cabe pregun- tar por qué razón éstas no se ponen de manifiesto espontáneamente. La ex- plicación descansa en una teoría propuesta por Gamow, ya en 1928, para interpretar, desde el punto de vista de la mecánica cuántica, la emisión de partículas alfa por los núcleos radiactivos. En pocas palabras, la cuestión es como sigue. Cuando un protón (partícula cargada positivamente) se apro- xima a un núcleo atómico, será repelido por éste, y sólo con una velocidad suficientemente elevada podrá llegar a sus proximidades. Este y otros he- chos de observación pueden interpretarse satisfactoriamente si se supone que el núcleo yace en el fondo de un pozo de potencial cuyas paredes sólo podrán ser salvadas por un proyectil positivo animado de la energía ciné- tica necesaria. Según la Física clásica, cuando la partícula intrusa no posee el impulso suficiente para "trepar" por la barrera de potencial, no podrá penetrar en el núcleo, pero Gamow demostró que, desde el punto de vista de la mecánica ondulatoria, las cosas no son tan rigurosas. En efecto, toda

partícula tiene una cierta probabilidad de atravesar la pared ("efecto túnel"), probabilidad que, naturalmente, es tanto menor cuanto más elevada sea la barrera. Si se quiere, pues, alcanzar el pozo de potencial con una partícula de pequeña energía, bastará bombardear el núcleo tantas veces como sea preciso hasta que, finalmente, se acierta en el blanco. El éxito suele manifestarse de alguna forma, ya que la partícula incidente aporta al núcleo una energía de enlace capaz de excitar su estado normal.

Vistas así las cosas, en los procesos químicos ordinarios acontece algo parecido. Es, por ejemplo, un hecho bien conocido que, a pesar de que el carbón arde en el aire, puede, sin embargo, conservarse indefinidamente en su presencia. Los átomos de carbono y las moléculas de oxígeno no reaccionan en las condiciones ordinarias, porque su energía no es suficiente para vencer su mutua repulsión inicial. Cuando el movimiento es más vivo (es decir, cuando se produce una elevación local de temperatura), aumenta el número de choques activos que determinan el comienzo de la reacción química. Y el mismo calor que el proceso desarrolla permite que, comunicando la energía de activación a los átomos adyacentes, aquél se propague en último término a toda la masa. Las reacciones químicas y los procesos nucleares se inician, por tanto, con arreglo a un mecanismo parecido, sólo que en estos últimos las energías de activación son millones de veces superiores.

¿Qué es, en definitiva, lo que comúnmente se conoce con el nombre de energía atómica o —más propiamente— energía nuclear? El fundamento de todos los métodos para el aprovechamiento de la energía nuclear, es la famosa relación de equivalencia entre masa y energía:

$$E = m \cdot c^2,$$

donde c designa la velocidad de la luz (aproximadamente, 300.000 km./segundo = $3 \cdot 10^{10}$ cm./seg.). La masa de un protón (núcleo del átomo de hidrógeno) corresponde a una energía de unos 931 millones de electrón-voltios, es decir, 931 MeV. Esto quiere decir que, si se lograra transformar en energía la masa de un gramo de hidrógeno, se liberarían unos $5 \cdot 10^{26}$ MeV, es decir, una energía equivalente a la desprendida en la combustión de algunos miles de toneladas de carbón. Tales procesos de "desmaterialización" se presentan, de hecho, en la mutua aniquilación de partículas y antipartículas, por ejemplo, en el choque de un protón con un antiprotón (2). Ahora bien, como en nuestro mundo no pueden existir normalmente antiprotones, sino que han de ser obtenidos por vía artificial, con el concurso de potentes dispositivos aceleradores, tal proceso, como fuente de energía, queda, pues, fuera de toda consideración.

En los procesos nucleares sólo puede ser utilizable la llamada energía de enlace de los núcleos atómicos. Ya queda dicho en otro lugar que estos últimos están integrados por protones y neutrones (*nucleones*). Si Z es el número de orden de un elemento en el sistema periódico (*número atómico*), su núcleo contiene Z protones y N neutrones, verificándose entonces que:

$$M_z = ZM_p + NM_n + Q/c^2,$$

siendo M_p , M_n y M_z las masas respectivas de protón, neutrón y núcleo de

2 Partícula de masa idéntica a la del protón, pero con carga negativa.

carga Z , y Q es la energía de enlace. Resulta, pues, que la masa de un núcleo atómico no es exactamente igual a la suma de las masas de sus partículas integrantes, sino algo menor. Este defecto másico es la fuente de todas las energías nucleares o termonucleares, ya que su cuantía corresponde a la energía liberada en la síntesis del núcleo atómico. Cuando se representa gráficamente la energía de enlace media por nucleón en función del número atómico, se ve que es pequeña en el caso de núcleos ligeros y alcanza un máximo en los medianos, para luego decaer lentamente al penetrar en el dominio de los núcleos pesados. Un detenido examen de la curva, muestra las distintas posibilidades de obtención de energía. De una parte, en la región de los núcleos ligeros, la fusión de dos o más va acompañada de liberación de energía, mientras que en la de los núcleos pesados es, por el contrario, la escisión nuclear el proceso espontáneo que puede emitir energía. Justamente este último tipo de procesos es el que tiene lugar en las bombas atómicas y en los reactores nucleares que en la actualidad se hallan en marcha, en tanto que el primero —la fusión— es el fundamento de las energías termonucleares que se actualizan de modo explosivo en las bombas de hidrógeno y, en forma naturalmente controlada, en las estrellas fijas.

Imaginemos que un protón, animado de gran velocidad, incide sobre un núcleo ligero. Si la partícula logra penetrar en éste, entran inmediatamente en juego las fuerzas atractivas de los neutrones y puede suceder que el protón quede sencillamente captado. Ello produce entonces una perturbación en el equilibrio energético del núcleo, el cual recupera su estado normal emitiendo el exceso de energía en forma de radiación gamma, y ésta, transformada en calor, puede ser técnicamente utilizable.

Así expuesto, parece éste un método relativamente sencillo para la obtención de energía. En la práctica, sin embargo, no lo es tanto, y ello porque, en general, los protones no pueden penetrar en los núcleos a consecuencia de la repulsión electrostática que, sobre el intruso, ejercen sus congéneres preexistentes en aquéllos. Es verdad que tal dificultad podría ser superada utilizando proyectiles suficientemente acelerados con las potentes máquinas de que hoy dispone el físico atómico. Pero, aun así, este método sería técnicamente inadecuado. En primer lugar, porque el tamaño minúsculo tanto del proyectil como del blanco hace muy escasas las probabilidades de éxito; se dispara, por así decirlo, a ciegas, y, en números redondos, por cada cien mil disparos sólo uno acierta en el blanco. Y, en segundo lugar, porque la energía liberada en un encuentro ocasional es mucho menor que la que ha tenido que consumirse para acelerar los proyectiles. En definitiva, tales experiencias son científicamente muy interesantes, pero inapropiadas desde el punto de vista de su aplicación técnica.

Desde un principio, se consideró que el neutrón —desprovisto de carga— sería el agente ideal de transmutación. De hecho, en ausencia de repulsión electrostática, podrá llegar imperturbable a todos aquellos núcleos —incluso pesados— que para el protón resultaban inaccesibles. Con todo, no eran todavía los neutrones los proyectiles incuestionables para obtener energía aprovechable, pues ellos mismos tenían que ser producidos merced a un proceso nuclear cuya probabilidad de realización —por las razones antedichas— será necesariamente pequeña.

Tampoco el descubrimiento de O. Hahn, a fines de 1938, parecía tener otro interés que el meramente científico. Al bombardear núcleos de uranio con neutrones lentos, aquéllos parecían escindirse en otros dos de tamaño comparable, a diferencia de lo que acontecía en todas las demás transformaciones nucleares conocidas hasta entonces en las que de los núcleos sólo podía arrancarse una partícula ligera. El fenómeno, además, iba acompañado de un desprendimiento energético muy elevado. Pero cuando, en 1939, fue repetida la experiencia por diversos investigadores, se observó que, no solamente se engendraban dos núcleos de tamaño intermedio, sino que, en cada proceso de ruptura nuclear, aparecían también dos o más neutrones, los cuales, convenientemente frenados, podrían desencadenar, a su vez, nuevas escisiones. Con ello quedaban sentadas las bases para un proceso en cadena que consentiría obtener energía en forma técnicamente útil. Por desgracia, poco después se vio el mundo envuelto en los horrores de una segunda conflagración, y los físicos atómicos de las potencias beligerantes, atendiendo a las exigencias del momento, se encontraron ante la necesidad de transformar en una terrible arma de guerra lo que, desde un principio, pudo ser la fuente de mayor prosperidad y mejor entendimiento entre los pueblos. La Humanidad recuerda aun con espanto los efectos aniquiladores de las bombas atómicas lanzadas en 1945 sobre Hiroshima y Nagasaki, que precipitaron el desenlace de la contienda en el Extremo Oriente.

Pero no es el aspecto bélico lo que aquí nos interesa, sino, ante todo, las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear obtenida en los reactores o *pilas atómicas*. ¿Qué es y cómo funciona un reactor? Aunque, en la actualidad, se hallan en marcha un número bastante elevado de tales instalaciones con características y funcionamiento diversos, nos vamos a referir únicamente a la más común y sencilla del tipo llamado *piscina*. Consiste ésta en un recinto de varios metros de altura y profundidad lleno de agua y en cuyo centro se hallan dispuestas unas cuantas barras de uranio que, por bombardeo neutrónico, van a desencadenar el proceso. Se ha demostrado que la ruptura nuclear mediante neutrones tiene lugar de preferencia con el isótopo uranio 235, el cual existe en el uranio natural en una proporción del 0,7 %; por ello, las barras utilizadas en la mayor parte de los reactores no están formadas por uranio natural, sino por el llamado *uranio enriquecido*, que contiene una proporción relativamente elevada del isótopo 235.

El agua desempeña aquí tres funciones principales. En primer término, actúa como un moderador o frenador de los neutrones rápidos. No todos los neutrones pueden escindir los núcleos de uranio 235 con la misma probabilidad, sino que ésta es tanto mayor cuanto más lentos son los neutrones, ya que así aumenta la interacción entre ambas partículas. Ahora bien, como los neutrones procedentes de la ruptura nuclear salen animados de gran energía, es evidente que el proceso en cadena sólo puede asegurarse frenándoles hasta adquirir una energía que sea función exclusiva de la temperatura ambiente (*neutrones térmicos*). Ello acontece haciéndoles chocar con núcleos de los elementos más ligeros; así, por ejemplo, en cada colisión de un neutrón con un núcleo de hidrógeno en reposo, aquél pierde aproximadamente la mitad de su energía, siendo la fracción cedida tanto menor cuanto mayor sea la masa del núcleo atómico. De ahí que los mo-

deradores más eficaces sean las sustancias hidrogenadas, de las que el agua es la más abundante, cómoda y barata. No obstante, no es el agua el moderador ideal, ya que un cierto número de neutrones son captados por los núcleos de hidrógeno para engendrar deuterones (es decir, núcleos de hidrógeno de masa dos), hasta el punto que, en un reactor con uranio natural y con agua como moderador, las pérdidas neutrónicas son superiores a las ganancias y, en consecuencia, no puede automantenerse. Por eso, los moderadores que casi exclusivamente vienen en consideración son el agua pesada (que contiene deuterio en su molécula) y el grafito, pues, aunque menos eficaces que el agua ordinaria, apenas captan neutrones.

La segunda función del agua es como elemento refrigerador. Cuando los neutrones salen despedidos del uranio en procesos sucesivos de ruptura nuclear, una parte de la energía desarrollada se manifiesta en forma de calor, cuyo aprovechamiento es lo que constituye el objeto de las denominadas centrales de energía nuclear. El reactor de piscina sirve principalmente, no para obtener calor, sino radiación y, por tanto, aquél debe ser alejado para evitar que el uranio funda.

En fin, la tercera misión del agua es la de agente protector frente a la intensa emisión radiativa de la pila. Es por eso por lo que la inmensa mayoría de los reactores están provistos de una gruesa capa protectora de cemento que, ante todo, detenga los neutrones fugitivos. El reactor de piscina es, pues, de una gran sencillez, si así puede hablarse, ya que la moderación, refrigeración y protección son desempeñadas por una misma sustancia.

La gran variedad de reactores pueden encuadrarse, fundamentalmente, en tres grupos que, según la naturaleza del material escindible, los especialistas denominan: 1) reactores *lentos*, que utilizan uranio natural, 2) reactores *intermedios*, con uranio natural enriquecido en uranio-235 y 3) reactores *rápidos*, en los que la carga inicial puede ser material fisionable puro y que, además, pueden suministrar nuevo "combustible" como subproducto.

¿Cómo se pone en marcha una pila atómica? Parece, a primera vista, que para iniciar el proceso fuera necesario introducir deliberadamente unos cuantos neutrones. Ello, sin embargo, no es preciso, ya que a nuestro planeta llega, de los espacios interestelares, una radiación continua que, aunque poco intensa, es altamente penetrante. Dicha radiación, llamada *cósmica*, al destrozar los núcleos atómicos con que tropieza, da lugar, al mismo tiempo, a los neutrones que, a modo de espoleta, inician la reacción en cadena. Una vez comenzada ésta, debe procurarse, no sólo que no adquiera una velocidad explosiva, sino que, además, funcione de una manera regular y controlada. Evidentemente, esto acontecería cuando por cada neutrón desaparecido en una ruptura, se engendrara otro en las mismas condiciones. La experiencia demuestra que, si bien al escindirse un núcleo aparecen, por lo general, varios neutrones, no todos pueden participar en el proceso en cadena. En efecto, un cierto número de ellos es captado por el moderador o por el uranio-238 (que, en tal caso, no se rompe), y el ligero exceso de neutrones que aun pueda existir se pierde a través de la superficie del reactor. Esto último equivale a decir implícitamente que hay un tamaño crítico en la marcha controlada de cada pila, de tal manera que por debajo de él, se escaparían la mayor parte de los neutrones y el reactor in-

terrupiría su función. En la práctica, se controla fácilmente la marcha de la reacción introduciendo, a mayor o menor profundidad, barras de sustancias que, como el cadmio o el boro (cuatro veces menos eficaz, pero de punto de fusión mucho más elevado), son enérgicos absorbentes neutrónicos.

Bien que de pasada, parece obligado aludir a una importante aplicación técnica de los reactores nucleares, como es la obtención del plutonio. Acabamos de señalar que el uranio-238, en lugar de romperse, capta un neutrón lento transformándose en el núcleo de uranio-239; éste, sin embargo, es inestable y emitiendo dos electrones sucesivamente, da origen al plutonio, cuya vida media (unos 39.000 años) es demasiado corta para que pueda encontrarse en la naturaleza. Esta es la causa de que haya de ser obtenido y aislado en las pilas atómicas, cosa de gran interés por cuanto que el plutonio muestra frente a los neutrones lentos las mismas propiedades fisiónables que el uranio-235. Fue la sustancia utilizada en la primera bomba atómica y aun hoy sigue desempeñando un papel principalísimo en este aspecto. Finalmente, mediante un proceso análogo, el torio se transforma en el isótopo uranio-233, que también es escindible, aumentando así considerablemente la reserva de aquellos productos que pueden mantener una reacción en cadena.

La aplicación más importante que han de tener en el futuro los reactores nucleares será, sin duda, la de constituir excelentes fuentes de energía. En efecto, el rápido movimiento de los neutrones procedentes de la ruptura nuclear, se transmite, por virtud de los choques incesantes, a todos los demás átomos y, en definitiva, el reactor se calienta. Con el calor desarrollado puede transformarse el agua en vapor, el cual podrá actuar de elemento motriz en toda clase de máquinas térmicas. La forma más apropiada para transportar y aprovechar el calor engendrado en una pila atómica, es todavía un problema en fase de estudio, pero, según parece, son los metales alcalinos —sobre todo, el sodio— los que ofrecen mejores posibilidades como elementos de transporte, ya que a su bajo punto de fusión unen una elevada conductividad calorífica.

El futuro de los reactores nucleares como fuente de energía depende, naturalmente, de las existencias en minerales de uranio y torio. Según afirman los geólogos, la abundancia del uranio en la corteza terrestre es alrededor de 4 partes por millón, siendo la del torio unas tres veces mayor. Ambos elementos son, pues, tan abundantes como el zinc, plomo y estaño y, desde luego, más que el mercurio, plata y oro, pero, a diferencia de éstos, se encuentran tan dispersos en la naturaleza, que es casi excepcional hallarlos en yacimientos de concentración práctica. Los dos depósitos más importantes de mineral uranífero radican en Sudáfrica y Canadá, con un contenido del 1 al 4 % en óxido de uranio, pero la extracción del elemento a partir de menas inferiores es económica sólo cuando resulta como subproducto en otros procesos. En cuanto al torio, a pesar de su mayor abundancia, las concentraciones naturales son todavía más insignificantes que en el caso del uranio, siendo la única fuente comercialmente útil las arenas monacíticas de Travancore (India), a la que, en orden de importancia, siguen los yacimientos brasileños.

Una evaluación global de las reservas naturales en "combustible nuclear" constituye tarea difícil, ya que no se trata de indicar simplemente las

cantidades totales de uranio y torio, sino la de aquellos minerales que, por sus características, son de explotación rentable. En tal sentido, se pueden cifrar los recursos mundiales de uranio en unos 25 millones de toneladas, y en un millón los de torio. Y puesto que el U-235 forma el 0,7 % del uranio natural, las disponibilidades en aquél son del orden de 175.000 toneladas, equivalente a una energía de 8×10^{14} kcal., que —dado el ritmo actual de consumo— asegurarían éste durante un período poco superior al siglo.

En cuanto al coste de la energía eléctrica generada por los reactores atómicos de fisión, se ha escrito mucho, pero casi todas las estimaciones fueron realizadas tomando por base la instalación de Calder Hall (Inglaterra), la primera en funcionamiento y ya superada en no pocos aspectos. Ni los combustibles nucleares ni los materiales estructurales empleados en la construcción de un reactor, han alcanzado todavía el precio definitivo; el coste, años atrás tan elevado por razones militares, está experimentando un descenso gradual hacia su valor final. Por el contrario, los combustibles convencionales son cada vez más escasos y difíciles de obtener, sobre todo en los países de Europa más industrializados. Su precio sube constantemente y más aun en aquellas zonas algo apartadas, donde el transporte (que en el caso del material atómico carece de importancia) resulta demasiado oneroso. Se cree por algunos que en 1980, la energía suministrada por una central nuclear será un 50 % más barata que la de las plantas térmicas. Ciertamente, la rentabilidad de la energía nuclear depende, en gran medida, de las circunstancias de cada país. En aquellos que posean mayor riqueza carbonífera o en energía eléctrica de origen hidráulico, tardará, sin duda, más tiempo en imponerse, pero, en cambio, su explotación será más rápida en los países o regiones donde el carbón o la energía eléctrica han de recorrer grandes distancias para ser utilizados. Otro efecto secundario de la obtención de energía nuclear será que el carbón no necesitará ya ser quemado, sino que, en su mayor parte, reverterá a la Química, donde sus múltiples aplicaciones le convierten en una sustancia de gran valor.

Como ya queda dicho, también la fusión de núcleos ligeros, principalmente hidrógeno, puede liberar energía; más aún, es ésta la fuente de energía nuclear más rica de que puede disponerse. Desde luego, mucho más que la procedente del uranio, porque este elemento es, con notable diferencia, más escaso que el hidrógeno. Cuando el mundo no había "asimilado" todavía los terribles efectos de la bomba atómica, se comenzó a hablar de la bomba de hidrógeno. Pronto se experimentaron los primeros tipos de esta clase de ingenios y, a pesar de todas las medidas de seguridad, unos cuantos pescadores japoneses perecieron víctimas de los efectos de una explosión que se provocó a muchos kilómetros del lugar donde se hallaban. La opinión pública, asombrada y atemorizada ante el poder enorme que la Ciencia había puesto en la mano del hombre, reaccionó con violencia contra el empleo de semejantes armas aniquiladoras. En el transcurso de la primera Conferencia Atómica de Ginebra, en 1955, el físico indio Bhabha causó gran sensación cuando expresó su esperanza de que, en un plazo prudencial, no sólo se hablará de la aplicación pacífica de la energía procedente de la ruptura nuclear, sino también de las aplicaciones pacíficas de las

energías termonucleares. Un reactor nuclear representa, en cierto modo, una bomba atómica controlada. Lo que Bhabha predecía era nada menos que una bomba de hidrógeno "domesticada". Los círculos científicos de las grandes potencias, no presentaron, en este campo, contribución alguna, y tardaron todavía algún tiempo en reconocer que, en efecto, se hallaban en curso investigaciones sobre dicho problema, que tales trabajos se llevaban a cabo en el secreto más riguroso y que, en todo caso, parecía aún dudosa la posibilidad de obtener algún resultado positivo.

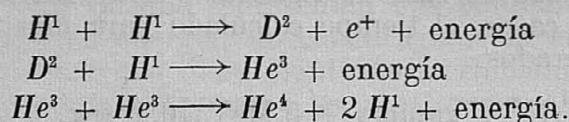
En realidad, la energía termonuclear es conocida ya desde hace tiempo y, precisamente, por la Astrofísica. Pero antes de seguir adelante, digamos en pocas palabras en qué consiste y cómo puede liberarse.

Ya hemos señalado la forma en que Gamow daba una explicación satisfactoria a la desintegración alfa de las sustancias radiactivas desde el punto de vista de la mecánica cuántica. Evidentemente, las relaciones podrán ser invertidas. Si, mediante el efecto túnel, una partícula alfa puede abandonar un núcleo, también podrá penetrar en él desde el exterior. Sólo se precisaría bombardearle con dichas partículas durante un intervalo de tiempo suficientemente largo. Cuando una partícula lograra penetrar en el blanco, allí quedaría alojada y así se habría engendrado un núcleo atómico más pesado. Pronto se sugirió que, dada la temperatura interna y composición (hidrógeno, en su mayor parte) de las estrellas fijas, en ellas deben tener lugar procesos de tal índole, si bien los proyectiles más fáciles de capturar no serían los núcleos de helio (partículas alfa), poco abundantes, sino los de hidrógeno (protones), con una sola carga eléctrica y —como queda dicho— extraordinariamente abundantes. A una temperatura de unos 20 millones de grados, es decir, en números redondos, la que se asigna a la región central del Sol, los protones tienen una energía media de 1.700 eV. En Física atómica, esta energía es demasiado pequeña para pretender el bombardeo de núcleos con algún éxito en plazo razonable; por ejemplo, en el bombardeo de litio 7 con protones, llevado a cabo en el laboratorio, el rendimiento del proceso comienza a ser apreciable cuando los protones poseen una energía de unos 8.000 eV. Así, pues, las energías medias en el Sol son bastante bajas, pero hay que tener en cuenta que, tratándose de un valor medio en una amplia zona de distribución, existirán también protones con energías mucho más elevadas. Al mismo tiempo, la probabilidad de remontar o atravesar la barrera de potencial aumenta fuertemente con la energía del protón. Los cálculos realizados sobre esta base, dentro del campo de aproximación que era permisible, reprodujeron el orden de magnitud de la energía emitida por el Sol.

Hacia 1938, Bethe y Weizsäcker, luego de un profundo estudio de las posibles reacciones de captura protónica, llegaron independientemente a la conclusión de que la mayor parte de la energía radiada por las estrellas de la llamada *secuencia principal*, era, con gran probabilidad, el resultado de un ciclo de reacciones que se distribuyen de la manera siguiente. En primer lugar, un núcleo de carbono 12 captura un protón y se transforma en nitrógeno 13; éste, sin embargo, es inestable y pasa a carbono 13 con emisión de un positrón (o electrón positivo). A continuación se produce la captura de un nuevo protón, pero como el nitrógeno 14 resultante es estable, puede capturar otro protón convirtiéndose en oxígeno 15 que es radiactivo.

y, emitiendo un positrón, se transforma en nitrógeno 15. En fin, éste vuelve a capturar un protón, con lo que el núcleo de oxígeno 16 así engendrado se halla en un estado tal de excitación que emite una partícula alfa y revierte al carbono 12. Con ello, se ha vuelto al punto de partida completando un ciclo en el que —utilizando un símil tomado de la Química— el carbono desempeña el papel de un catalizador, ya que, al final, siempre se regenera. Únicamente se consumen cuatro núcleos de hidrógeno para dar uno de helio, por lo cual suele decirse que en el Sol tiene lugar una “combustión” de hidrógeno en la que los núcleos de helio representan las cenizas. El “calor de combustión” es de unos 26,7 MeV, pero el tiempo que ha de transcurrir hasta una revolución completa del ciclo se calcula en 6.500 millones de años. Tomando por base el contenido en carbono que actualmente se asigna al Sol, se llega a una producción de energía de 2 ergios por gramo y segundo, valor que da plena cuenta de la energía irradiada por el Sol.

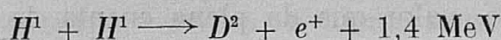
Cuando la temperatura estelar es, sin embargo, relativamente baja, la síntesis de núcleos de helio 4 tiene lugar de preferencia con arreglo a la llamada *cadena protón-protón*, la cual se compone de las reacciones nucleares siguientes:



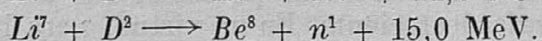
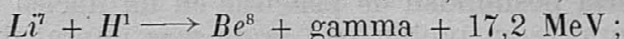
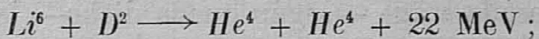
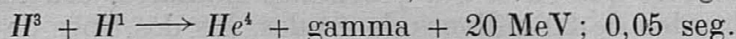
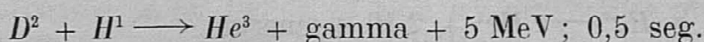
La energía neta aquí liberada es la misma que en el ciclo del carbono, y, de hecho, se admite que en el Sol y estrellas similares, con temperaturas interiores del orden de 20 millones de grados, los dos tipos de procesos tienen lugar en escala casi idéntica.

La ruptura de un núcleo pesado exige —según queda dicho— la captura de un neutrón. Como los neutrones no poseen carga alguna, aun los de menor energía tienen cierta posibilidad de penetrar en un núcleo atómico. Por el contrario, la captura de un protón será tanto más improbable cuanto menor sea su velocidad, ya que la barrera de potencial que ha de salvar aumenta rápidamente con energía decreciente. En su virtud, para liberar la “energía de fusión” no existe un proceso análogo a las bombas atómicas y reactores nucleares, sino que únicamente puede actualizarse manteniendo los reaccionantes durante algún tiempo a una temperatura tan elevada, que fuera apreciable la probabilidad de desencadenar una reacción de síntesis. Es por ello por lo que se habla ordinariamente de *energías termonucleares*. En las estrellas es relativamente fácil mantener su temperatura, porque existe una probabilidad muy remota de que la energía radiante liberada en la región central alcance directamente la superficie de la estrella. En opinión de Bethe, la radiación producida en el centro del Sol, a consecuencia del número enorme de choques que experimenta tarda unos 10.000 años en llegar a su periferia. Es como si la región central, donde se libera la mayor parte de la energía estelar, estuviera rodeada de un muro casi impenetrable que impidiera la emisión de aquélla hacia el exterior. Este “efecto de pared” no se debe a la presencia de alguna sustancia que el hombre pueda reproducir en la tierra, sino que es consecuencia directa de la magnitud del astro, de tal modo que no sería posible la existencia de

una estrella fija de las dimensiones de nuestro planeta y con las mismas condiciones físicas que reinan en el Sol; tal estrella no podría mantener la temperatura necesaria para las reacciones de síntesis. Esta es una circunstancia —podría decirse— afortunada para nosotros, los habitantes de la Tierra, puesto que impide que nuestro planeta pueda volar en mil pedazos en una experiencia nuclear "incontrolada". A raíz de las primeras bombas experimentales en el Océano Pacífico, era temido por algunos que la elevada temperatura producida en el agua pudiera desencadenar reacciones de fusión. Tales procesos son ciertamente posibles; lo que ocurre es que, para producirse en escala apreciable, se requiere que las condiciones de temperatura elevadísima persistan durante un intervalo de tiempo mucho mayor. Así, por ejemplo, a la temperatura de unos 20 millones de grados, la reacción



exige, para realizarse, un tiempo de 10^{11} (cien mil millones de) años. Ni que decir tiene que esto es de todo punto imposible. Si, pues, el hombre pretende liberar energía por procedimientos termonucleares, deberá acudir a otras reacciones. Algunas de ellas se indican a continuación, consignando asimismo, en algunos casos, el tiempo calculado para una temperatura de unos 20 millones de grados.



Al considerar, pues, la relación anterior, se ve inmediatamente que para una bomba de hidrógeno existen posibilidades mucho mejores con el deuterio. Ya la captura de un protón por deuterio es bastante más favorable que la unión de dos núcleos de hidrógeno ligero, pero aquélla resulta, a su vez superada por la fusión de un núcleo de tritio y otro de deuterio. Esta última satisface, al mismo tiempo, los requerimientos de ser extremadamente rápida y liberar una gran cantidad de energía, pero, en cambio, tiene el inconveniente de ser demasiado cara. En primer término, hace falta disponer de suficiente hidrógeno pesado, que forma sólo el 0,07 % del hidrógeno natural. Por su parte, el tritio H^3 , es un núcleo inestable, con un período de desintegración de unos 30 años, que se engendra en las explosiones nucleares desencadenadas por la radiación cósmica al incidir sobre la atmósfera terrestre, pero en tan pequeñas cantidades que ya su misma identificación exige el empleo de contadores especiales. La obtención técnica del tritio se lleva a cabo en pilas atómicas con elevada intensidad neu-

trónica. De elaboración bastante más barata deben ser las bombas de hidrógeno que toman por base las reacciones entre deuterio y litio, procesos que, además, transcurren con gran desprendimiento energético; pero la información acerca del tiempo medio pertenece todavía a los secretos celosamente guardados por las potencias interesadas.

No es nuestro propósito, sin embargo, considerar a fondo el problema de las armas explosivas termonucleares. Sólo diremos que, en este caso, no existe un tamaño crítico, como en las bombas atómicas, sino que sus efectos pueden hacerse tan grandes como se quiera, sin más que aumentar la masa de las sustancias participantes. En una bomba de hidrógeno, la bomba atómica, de por sí ya un arma terrible, juega el modesto papel de cerilla iniciadora de la reacción, al procurar, durante el breve espacio de una fracción de segundo, la elevada temperatura necesaria.

¿Y cómo está planteada la cuestión respecto al aprovechamiento pacífico de las energías termonucleares?

Las pilas atómicas ordinarias utilizan como materias primas uranio y torio, cuya abundancia en la naturaleza, aunque pequeña, es suficiente para atender a las necesidades del momento. Pero —como ya indicamos en otro lugar— a pesar de que representan una contribución sustancial a los recursos mundiales en energía, no constituyen, sin embargo, una solución definitiva al problema que tiene planteado la Humanidad. Sin duda, el reparo más grave que cabe oponer a los reactores nucleares es que sus productos de desecho son fuertemente radiactivos; y aunque, de momento, puedan ser eliminados con relativa facilidad, el problema se complicará cada vez más a medida que vaya aumentando el número de reactores en funcionamiento, hasta hacerse insoslayable. Es así como queda establecida la importancia de la energía termonuclear, ya que, lograda la meta de su obtención en forma controlada, la Humanidad habría resuelto, de una vez para siempre, el problema de la energía en que está fundamentada toda nuestra civilización. En los océanos existen reservas de deuterio de tal cuantía, que su utilización podría prolongarse durante millones de años; la cantidad global de dicho elemento en las aguas naturales se estima en 10^{14} toneladas que, aun contando con las pérdidas inevitables, representan un equivalente mínimo de unas 10^{30} calorías. Por otra parte, también sería más fácil de resolver el problema de la intoxicación radiactiva, puesto que en tales procesos de fusión apenas se engendran productos radiactivos. Es verdad, que, en cambio, aparecen neutrones sumamente energéticos que pueden provocar la formación de núcleos inestables.

Claro que no ha de resultar sencillo reproducir en la tierra los procesos que tienen lugar en el Sol. Ya la obtención de temperaturas tan elevadas representa una dificultad técnica considerable; pero, además, parece iluso pretender encerrar un gas así calentado en un recinto de paredes sólidas, pues a tales temperaturas todo sólido se evaporaría instantáneamente. Esto es, el gas habría de ser limitado por paredes gaseosas. Ahora bien, por virtud del movimiento caótico de sus moléculas, un gas no puede conservar espontáneamente la forma, a menos que su propio campo gravitatorio fuera lo bastante grande. Y cuando se calcula la masa capaz de engendrar un campo gravitatorio que contrarreste el efecto expansivo de la materia gaseosa incandescente, se encuentra precisamente la del Sol. Este astro-

constituye, pues, el mecanismo más pequeño para producir, en forma natural, energía termonuclear.

De toda evidencia, tales condiciones no pueden ser logradas en el laboratorio. Toda disminución en las dimensiones de la "planta" termonuclear ha de provenir: bien de una mayor presión gaseosa en el lugar de reacción, para incrementar así el número de colisiones, o bien de una mayor velocidad de las partículas, es decir, de una temperatura más elevada. El hecho de que en la cámara de reacción exista un gran número de partículas, justifica el uso de la palabra *plasma*, con la que, en Física, se designa, en general, aquel estado en que la materia, sometida a temperaturas elevadísimas, está integrada principalmente por núcleos más o menos desnudos y electrones arrancados de los átomos.

En principio, el físico conoce diversos métodos que permiten calentar un gas a temperaturas muy altas, así como encerrarlo en un espacio limitado. En el dispositivo ZETA (*Zero Energy Thermonuclear Assembly*), puesto a punto en Harwell en 1958, los ingleses aplicaron el principio del transformador. En esencia, consiste en un transformador por cuyo primario se hace circular, durante el breve tiempo de unas millonésimas de segundo, una fuerte corriente eléctrica; ésta provoca en el núcleo de hierro un intenso campo magnético que, a su vez, induce en la cámara de reacción un potencial elevado (de 100.000 hasta 300.000 voltios en el dispositivo inglés). La citada cámara donde se quiere provocar el proceso termonuclear, consiste en un anillo de 3 metros de diámetro y 1 metro de altura, en el que existe deuterio a una presión inferior a la millonésima de atmósfera. El potente campo eléctrico provoca una descarga a través del gas, a consecuencia de la cual los átomos de deuterio se desdoblán en núcleos y electrones que, acelerados por la tensión inducida, equivalen a una corriente de unos 200.000 amperios. Es una circunstancia afortunada en las experiencias de fusión nuclear el hecho de que, corrientes de tales magnitudes producen un campo magnético que tiende a contraerse sobre sí mismo; y —lo que es más importante— que a consecuencia de esta constricción, la temperatura del plasma en la corriente filiforme así engendrada, se eleva a unos 5 millones de grados centígrados, mientras la presión se iguala casi a la atmosférica.

En tales condiciones, durante el paso de la corriente primaria (y todavía algún tiempo después), las partículas chocan entre sí con extraordinaria violencia y rapidez, haciendo que se establezca el equilibrio térmico casi instantáneamente y, sobre todo, que algunos núcleos de deuterio reaccionen para dar helio 3, el cual, junto con los neutrones engendrados al mismo tiempo, transportan, en mayor o menor proporción, la energía liberada en el proceso. Desde el punto de vista del automantenimiento de la reacción termonuclear, hay que señalar que sólo la energía transportada por las partículas cargadas, únicas controlables por los campos aplicados, puede invertirse en sostener el proceso. Pero esta energía representa una pequeña fracción de la total, ya que, debido a su gran velocidad y poder de penetración, los neutrones participan con notable ventaja en el transporte de energía, la cual, aunque pueda ser exteriormente captada, no contribuirá ya al mantenimiento de la temperatura del plasma en el que la reacción tiene lugar. Con todo, las pérdidas más considerables pueden pro-

venir de la radiación emitida, sobre todo, si intervienen núcleos de carga media o elevada, que, por tal razón, han de ser severamente eliminados en esta clase de reactores. Pues bien, teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se calcula que la mínima temperatura para el sostenimiento de un sistema en el que se producen reacciones *D-D* (deuterio-deuterio), es de unos 350 millones de grados centígrados, mientras que, tratándose de un proceso *T-D*, la temperatura necesaria es "sólo" de 45 millones de grados.

Conviene destacar el papel fundamental que, en este tipo de experiencias, desempeña el efecto de constricción (o efecto *pinch*), ya que, aparte de contribuir a proporcionar, durante un plazo tan efímero, la elevada temperatura necesaria, mantiene además el gas en estado plasma alejado de las paredes de la cámara. Por ello, dicha constricción magnética actúa a modo de una botella inmaterial en la que el plasma se halla contenido. La "botella magnética" experimenta una serie de fluctuaciones en el espacio y en el tiempo que modifican su diámetro periódicamente, hasta que, por último, las partículas alcanzan las paredes materiales del recinto. Pero, mediante una bobina auxiliar, los físicos ingleses lograron estabilizar las oscilaciones durante el tiempo extraordinariamente "largo" de unas 5 milésimas de segundo.

A reserva de los progresos que, desde entonces, hayan podido realizarse (progresos que los países respectivos difunden con tan poco entusiasmo), han surgido, sin embargo, fuertes dudas acerca del éxito propugnado con el dispositivo ZETA. En un sistema meramente termonuclear, los neutrones mostrarían un movimiento desordenado, a modo de las moléculas de un gas abandonado a sí mismo; pero medidas ulteriores llevadas a cabo en el mismo Harwell pusieron de manifiesto la existencia de grupos de neutrones, entre los emitidos, cuya velocidad dependía de la dirección, demostrando así que, al menos, no todos los neutrones eran de origen termonuclear.

El problema fundamental en un reactor termonuclear, cuyo estudio y mejor resolución ocupa hoy día la actividad de elevado número de científicos, es, pues, el de calentar el plasma y mantenerlo en la cámara de reacción mientras dure el proceso. El gran número de posibilidades de abordar dicho problema justifica que, hasta el momento, no exista en este campo una sistemática acusada. Algunas máquinas (tipo *Columbus* americano y *Minni* inglés mostrados en la Exposición de Ginebra) utilizan descargas de gran energía con corrientes muy rápidas, que producen máximos de temperatura extremadamente cortos. En otro tipo de máquinas, la corriente crece con menos rapidez y, estabilizando el efecto de constricción, es posible prolongar sobremedida el intervalo eficaz de temperatura elevadísima. A esta clase pertenece el ya citado *Zeta*, así como —entre otros— los *Perhapstrons* americanos construidos en Los Alamos, los *Equateurs* franceses y el modelo *Alpa* ruso de dimensiones algo mayores. En el tipo de aparatos representados por los *Stellarators* instalados en Pinceton (EEUU), se sigue un procedimiento distinto: el plasma se somete a la acción de un campo magnético exterior producido por un solenoide, que asegura las condiciones de estabilización, mientras que el calentamiento se produce de un modo independiente, bien por caída óhmica (*calen-*

tamiento óhmico) o mediante campos eléctricos normales que producen en la cámara condensaciones y diluciones alternadas de las líneas de fuerza (*bombas magnéticas*). Como la intensidad del campo magnético aplicado decrece gradualmente al penetrar en el plasma, tal inhomogeneidad engendra un campo eléctrico que tiende a separar las cargas opuestas (iones y electrones) y que, asociado al magnético, impulsa al plasma hacia las paredes. Una solución parcial a este problema consiste en construir el tubo en 8, y de ahí la forma original de dicho tipo de aparatos. El modelo llamado *Stellator C*, se ha diseñado con una cámara de 20,4 cm. de diámetro interior y una longitud de 12m., y con él se espera alcanzar temperaturas de unos 200 millones de grados. Y en proyecto existe ya la construcción de un *Stellarator D* con 45 cm. de diámetro y 150 m. de longitud, cuyo coste se cifra en unos 200 millones de dólares. En otro tipo de máquinas mostradas en Ginebra, se utiliza un campo magnético de tal configuración que las partículas de elevada energía procedentes del exterior son obligadas a moverse en un espacio muy reducido, originando así una compresión del plasma mediante campos magnéticos (*campos especulares*), que justifican el nombre de *máquinas de espejo* (o también *Pyrotrones*) dado a tales dispositivos. El modelo ruso *Ogra*, de este tipo, con una cámara de 20 m. de longitud, constituye probablemente el mayor de los aparatos de fusión que, en la actualidad se hallan en construcción. En fin, un último método para confinación del plasma, fundado en conceptos nuevos, es el llamado *sistema Astron*. Consiste éste en producir, en la forma usual, un campo magnético axial en una cámara cilíndrica fuertemente evacuada, e inyectar entonces un haz de electrones rápidos (30-50 MeV) por uno de sus extremos. Como resultado de aquél, los electrones tienden a comprimirse en una capa coaxial (capa E) que, actuando a su vez sobre las líneas de fuerza del campo magnético, las concentra en sus inmediaciones. El plasma queda de tal modo confinado, incluso frente a las perturbaciones más fuertes, que las partículas cargadas sólo pueden escapar por virtud de un proceso lento de difusión. La experimentación se halla todavía en la fase preliminar, pero los resultados parecen prometedores.

Hemos expuesto, a grandes rasgos, las reservas que en materias primas y energía —los dos pilares sobre los que descansa la civilización— encierra nuestro planeta. Pero, ante todo, quisimos destacar también cómo el descubrimiento y la utilización de tales reservas son, en último término, el premio a los esfuerzos del hombre en su lucha perenne frente a una arcana naturaleza, cuyos secretos, al ser desvelados, constituyen, al mismo tiempo, la fuente de todas sus satisfacciones espirituales y de su bienestar material. Y mientras existan investigadores que a su insaciable sed de conocimientos asocien una generosa entrega de esfuerzos, cabe esperar con optimismo la resolución de los graves problemas que el futuro nos tiene, sin duda, reservados.

HE DICHO.