

La química física y sus relaciones con otras ciencias

Dr. PABLO KRASSA K.

(Discurso de incorporación como Miembro Académico de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile).

El enorme progreso que ha habido durante el último siglo en el campo de las ciencias ha traído consigo, como consecuencia lógica, la creación de los especialistas, acontecimiento poco favorable en muchos aspectos.

Hace algo más de 100 años el eminente pensador alemán Goethe justificadamente pudo expresar a través del personaje de su creación, el Fausto, el haber estudiado filosofía, leyes y medicina y aún teología. Su contemporáneo Humboldt todavía representaba al sabio universal que dominaba —por lo menos a grandes rasgos— todos los campos de las ciencias naturales. Esta especialización inevitable de nuestros tiempos no se conforma con la universalidad de los pensamientos. Pues la ciencia es una sola y no hay campos en los cuales pueda prescindirse de los resultados de otros. Pero la especialización tiene todavía otro grave inconveniente. El individuo que estudia un determinado ramo se aferra con excesiva tenacidad a la tradición escolar, no mira sino en una sola dirección. Y es notable observar que, muy a menudo, los grandes progresos de la ciencia se deben a personas ajenas a la escuela tradicional, personas cuya experiencia adquirida en otros campos les permiten ver lo que los maestros del arte especial no percibían. Así debemos uno de los progresos fundamentales en la Química Física a un médico: Roberto Mayer. Fué él quien formuló el primer principio de termodinámica, a saber: el de la equivalencia del calor y de la energía mecánica. Demostró que el calor no es una substancia, como se creía antes, sino una forma especial de la energía. Aun más hizo este descubrimiento no a raíz de un experimento físico o químico, sino lo dedujo como consecuencia del hecho que el color de la sangre humana es diferente en zonas tropicales y frías.

La necesidad de una visión más amplia es especialmente patente en las disciplinas situadas en el límite de diversos ramos científicos y se comprende que los resultados de tales estudios influyen no sólo en estos campos limítrofes, sino que su acción va mucho más allá y que a veces es inesperada.

Demostrar tanto la influencia como la íntima relación que se constata entre la Química Física y otras ciencias es el objetivo de la presente disertación. Resultados de esta índole tienen el mérito de procurarnos una satisfacción especial, tal vez porque nos demuestran con mayor claridad la universalidad de la naturaleza.

La Química Física puede definirse como la aplicación de las leyes físicas a los fenómenos químicos. Estas leyes son de carácter cuantitativo en oposición a los experimentos más bien cualitativos de la antigua química. Es por lo tanto la introducción de las matemáticas en el campo de la química lo que caracteriza esta nueva época; y podemos señalar como su origen el año 1775, fecha en la cual el eminente sabio Lavoisier empleó, por primera vez, la balanza para controlar una reacción. No es extraño que los resultados inmediatos fueran sorprendentes. El caos que caracterizaba las observaciones realizadas por los alquimistas y que se debía a la continua repetición—con pequeñas variaciones—de los mismos experimentos destinados a encontrar la piedra filosofal o el metal precioso, se despejó de golpe y fué posible clasificar y ordenar los conocimientos químicos. Toda coordinación significa simplificar, reducir a un menor número de principios la variedad de fenómenos que la naturaleza nos proporciona. Además permite establecer, con anticipación, la conducta que seguirán los sistemas o reacciones no observadas hasta el momento. Abrense así caminos hacia lo desconocido y este campo cubierto de nubes, aparentemente impenetrables, se nos aclara y de vez en cuando se observa el resplandor de una nueva luz. ¿Qué mayor satisfacción que la de haber contribuído a un pequeño aumento de nuestros conocimientos de la naturaleza que, aunque nunca nos permitirá develarla completamente, a medida que la reconocemos nos presenta mayor número de fases desconocidas? En forma bien significativa se han comparado nuestros conocimientos con una esfera sumergida en lo desconocido y cuyo contenido aumenta continuamente. Pero, desgraciadamente, a medida que el volumen de la esfera crece, también se extiende su superficie y por lo tanto su contacto con lo desconocido.

No es de extrañar que las primeras influencias de la Química-Física se sintieron en el campo de estas mismas ciencias y muy especialmente en el de la química. Comenzó lo que hoy día llamamos la Química Física clásica con sus repercusiones inmediatas en la industria química.

Los estudios sobre el equilibrio de las reacciones explicaron muchas anomalías aparentes que se presentaban en el trabajo industrial. Quiero mencionar un ejemplo. En la elaboración del hierro se había observado que los gases que salían del alto horno, productos de combustión del coque, tenían una elevada ley en óxido de carbono, es decir, sólo habían reaccionado en parte con los minerales de hierro. Se pensó poder corregir este defecto aumentando la altura de los hornos, dando así mayor oportunidad a los gases para reaccionar. Se gastaron cientos de miles de dólares en construcciones nuevas y ensayos infructuosos. El estudio teórico de la reacción reveló inmediatamente lo inútil de estos esfuerzos, porque demostró que siempre se llegaba a un equilibrio y que era imposible evitar la presencia de óxido de carbono, si se quería producir hierro metálico. La existencia de tal equilibrio desempeña un papel preponderante en todas las reacciones metalúrgicas, influye sobre la composición de los metales obtenidos y de las escorias formadas. Se comprende, por esto, que el estudio de las leyes que lo rigen, especialmente en relación con la temperatura y el calor producido en las reacciones, constituyó uno de los capítulos más importantes de esta Química Física clásica. Pero dichos estudios repercutieron inmediatamente en otra ciencia; a saber: en la geología. Se entiende que la tierra antes de solidificarse constituía una enorme masa fundida, compuesta de metales, por una parte, y de oxígeno, por la otra. La formación de las rocas ígneas debe haber seguido las mismas leyes

de equilibrio que podemos estudiar en el laboratorio. Ellas determinan la solidificación y separación de las diversas rocas y cualquiera alteración de la sucesión regular que la teoría exige nos indicará perturbaciones posteriores. Esto permitirá, a menudo, establecer relaciones que pueden tener importancia práctica en la ubicación de minerales. Los procesos de separación de las sales de las soluciones acuosas, muy posteriores a la época de la formación de las rocas, también se rigen por leyes físico-químicas. A este respecto interesa mencionar los estudios hechos por Vant Hoff sobre los depósitos de sales potásicas de la región central de Alemania. No solamente han servido para explicar la sucesión de las diferentes capas, sino han permitido llegar a ciertas conclusiones con respecto al clima que rigió en la época de su formación y la duración de su precipitación.

Otro progreso de nuestros conocimientos químico-físicos ha tenido gran influencia en la agricultura. Se trata de la determinación cuantitativa de la mayor o menor acidez de un medio, la que hoy día se expresa por el valor del pH. Sabemos que las diferentes plantas prefieren valores distintos del pH del suelo y su determinación es, en la actualidad, uno de los ensayos rutinarios en cualquier laboratorio de tierras. En vista de que los abonos producen una variación en la acidez del suelo, de acuerdo con su composición, la investigación de tal influencia es de suma importancia. Se ha dado el caso que la mayor acidez producida por un abono no sólo anula la acción favorable que pueda tener, sino que perjudica las cosechas. Así se explica, en gran parte, la ventaja que tiene el salitre chileno, sobre los abonos nitrogenados a base de sulfato de amonio, ya que éstos acidulan fuertemente el suelo. La razón de la gran influencia que tienen aún pequeñas variaciones del pH, probablemente reside en la sensibilidad de los bacterios del suelo frente a alteraciones de la acidez. Este comportamiento se nota también en los demás bacterios y en general en todos los procesos de los organismos vivos. De ahí la gran importancia del pH en las industrias de la fermentación y especialmente en la medicina, donde su alteración en los jugos que produce el cuerpo humano nos indica de inmediato una alteración patológica.

Las ideas sobre la forma de cómo se combinan los elementos y especialmente las teorías referentes a la unión de los átomos de carbono en las moléculas de los compuestos orgánicos, han suministrado la base sobre la cual se pudo desarrollar la industria de estos compuestos de carbono. Se llamaron compuestos orgánicos, porque al principio se creyó imposible sintetizarlos en el laboratorio, es decir, sin intervención de las fuerzas vitales. El desarrollo de la elaboración de tales productos sólo se logró a base de las teorías que formuló Kekulé respecto a la constitución de los compuestos más simples de carbono e hidrógeno, teorías que más tarde fueron completadas por Van Hoff y Le Bel.

Desde ese entonces el número de los compuestos orgánicos ha subido a varios cientos de miles. Vale la pena insistir en el hecho de que la producción sintética de las anilinas, de las sulfas, de las vitaminas, del caucho, de las resinas artificiales y de tantas otras substancias, que diariamente usamos, no habría sido posible sin la idea básica de la valencia y de la agrupación de los átomos de carbono en forma de anillos y cadenas.

Entre los grandes descubrimientos de esa época, que se sitúa a fines del siglo pasado y a principios del actual, quiero mencionar además el de los catalizadores y de su efecto. Se trata de substancias ajenas a la reacción que se persigue, de muy

distinta índole y naturaleza, y cuya sola presencia influye, en forma decisiva, en el giro y la velocidad de las reacciones. Quiero citar, como ejemplos de su aplicación industrial, a la síntesis del amoníaco y a la hidrogenación de los carbonos. Pero el caso tal vez más interesante y que domina nuestra vida es el de la asimilación de las plantas que usan cantidades ínfimas de fierro como catalizador para la formación del clorofilo, propiedad que ahora quiere aprovecharse para la producción artificial de alimentos. Pero en la naturaleza no es sólo esta reacción básica la que se rige por los catalizadores. En las fermentaciones intervienen sustancias o sus substratos, los fermentos y enzimas, que regulan y dirigen el desarrollo de descomposiciones determinadas o que sólo permiten el ataque de determinadas sustancias, tal como cada cerradura tiene su llave propia. Se emplean en abundancia catalizadores de todos los tipos en las reacciones químicas y no es extraño que su acción, aunque se trate a menudo de simples metales, se hubiese comparado con la de la fuerza vital, a la cual todavía atribuimos una potencia que no estamos en condiciones de imitar en el laboratorio. Ahora en otros casos el empleo de estos catalizadores y el estudio de sus acciones ha demostrado que no siempre son específicas, que su intervención no se debe a un fenómeno químico sino a propiedades más bien físicas. Un ejemplo que algunos de Uds. recordarán es el uso de una pequeña cantidad de platino finamente dividido que se empleó para encender una llama de gas, procurando que éste, mezclado con aire, pasara a través del metal. La mezcla por el solo contacto con el platino se calienta en tal forma que se inflama. ¡Qué enorme diferencia entre el trabajo pesado del hombre primitivo para obtener fuego y este sistema moderno! No obstante los dos procedimientos se basan en el mismo principio. El primero no necesita explicaciones. Hoy en día nadie dudará que la fricción produce calor. El segundo ya es más difícil de comprender. Pero recordemos que ya mucho antes se utilizaba el encendedor neumático, constituido de un pequeño compresor que dirigía un chorro de aire hacia un hongo yesquero (esponja). El aire comprimido se calienta y el calor sirve para encender la yesca. En analogía con este sistema supondremos que la mezcla de gas y aire, al pasar por el platino finamente dividido, se comprime, y en realidad la experiencia demuestra que el platino contiene una cantidad mucho mayor de gases que la que corresponde a su volumen. Los contiene en su superficie—absorbido como se dice—y la gran cantidad se explica por el extraordinario desarrollo de la superficie del metal. Así se nos revela el hecho de que la superficie de una sustancia difiere en sus propiedades físicas del resto del material y que en ella existen fuerzas apreciables que se pueden aprovechar.

El ejemplo más conocido en el cual se aplica esta propiedad de las superficies es la formación de espumas. Desde las ampollas de jabón, que divierten a chicos y grandes, hasta la espuma formada de aire y clara de huevo—merengue—se trata de formaciones compuestas de un líquido y de un gas—aire—que tienen todo el aspecto de un cuerpo sólido y que sólo deben su forma rígida a su enorme superficie en relación con su masa y a las energías superficiales correspondientes. Pero la aplicación de estos sistemas no se limita a la vida diaria. La industria más importante del país—la del cobre—está basada en un procedimiento de concentración por medio del uso de espumas, el que permite aprovechar minerales que tienen leyes del orden de 1 a 2% de metal y que los transforman en productos de 20 o más por ciento. Sin esta aplicación de un principio de la química física, la industria del cobre prácticamente

no existiría en el país en la actualidad y hay 100 otros ejemplos similares. Todos los procesos de lavado, de tintorería, etc., aprovechan la posibilidad de formar espumas y últimamente este sistema se está aplicando aún a la producción de un concreto esponjoso que luego se ensayará en el país, como nos ha sido comunicado hace poco en un trabajo del Instituto de Investigación y Ensayo de Materiales de esta misma Facultad.

La espuma se forma de capas delgadas de líquido que encierran burbujas de gas. Su contrapartida es la neblina formada por gotitas de líquido sumergidas en el aire. Nuevamente hay una superficie enormemente desarrollada en relación con el contenido material. Así se explica que las gotas de la neblina no se juntan entre sí y se mantienen tanto tiempo sumergidas en el aire. Las nubes que cubren el cielo necesitan un impulso especial para caer. ¿Quién no habrá sentido asombro al ver las enormes cantidades de agua que caen durante una fuerte lluvia y que antes habían estado suspendidas en el cielo? Pero hay más. A veces la humedad ni siquiera logra condensarse para formar neblinas, a pesar de haber un exceso de vapor de agua en la atmósfera. Los diarios han dado cuenta de los ensayos efectuados para producir lluvia artificial, verificados en EE. UU. Parece que todavía no se ha llegado a un resultado definitivo en los experimentos que se efectúan bajo el patrocinio de la General Electric y dirigidos por uno de sus físicos más eminentes, el Dr. Langmuir. Nació la idea durante la última guerra a raíz del interés que causaron dos problemas aparentemente muy distintos. El primero se refirió a la dificultad que afrontaron los aviones al pasar a través de nubes de gran altura y que hasta causaron su destrucción debido a la enorme cantidad de hielo que se precipitaba en sus alas. El segundo problema se relacionó con la producción de neblinas artificiales, destinadas a ocultar objetos y operaciones bélicas. Un estudio demostró que la presencia de partículas sumamente pequeñas, distribuidas en una atmósfera sobresaturada de vapor de agua, permitía, bajo ciertas condiciones, su condensación en forma de neblinas y el crecimiento de las gotitas formadas por combinación, lo que produce su precipitación espontánea. Su primera aplicación práctica tuvo este procedimiento al tratarse de despejar las nubes sobre un aeródromo y permitir así el vuelo y aterrizaje normal de los aviones. Es interesante que una de las substancias que se empleó para obtener el fin indicado fué el yoduro de plata y así se vislumbró una nueva aplicación para el yodo chileno. Desgraciadamente las cantidades necesarias son tan ínfimas que aún generalizando el sistema, el correspondiente consumo no tendría importancia.

En otro orden de fenómenos la división infinitesimal de la materia también tiene muchas aplicaciones prácticas. ¿Quién no conoce el espléndido color rojo del vidrio rubí?, pero pocos sabrán que éste se debe a finísimas partículas de oro metálico diseminadas en el vidrio. La distribución finísima de ciertos óxidos origina la opacidad de los vidrios lechosos y de los objetos enlozados. En todos estos fenómenos no se trata de soluciones verdaderas, es decir el producto disperso no se ha dividido completamente, sino que forma todavía partículas enormemente grandes en comparación con las moléculas propiamente tales, partículas más ínfimas que según nuestras ideas actuales pueden existir.

Cuando se ha alcanzado tal división final, formándose una solución verdadera, el aspecto cambia, pero no deja por esto de proporcionarnos fenómenos interesantísimos. Una solución acuosa de una sal, como el agua del mar, no parece distinguirse

mucho del agua pura y no obstante sabemos que en ella existen fuerzas que corresponden a las de un gas comprimido a unas 20 o más atmósferas. Hay un fenómeno por todos conocido que permite apreciar estas fuerzas. Se trata del hecho de que el agua es capaz de subir en los árboles a alturas mayores de 20 metros para alimentar las ramas, hojas y frutas. No basta para explicar este comportamiento el fenómeno de la capilaridad. Para comprenderlo hay que recurrir a la tensión osmótica que rige en las soluciones al interior de las células y que es más que suficiente para aspirar el agua de la tierra, hasta alturas aun mucho mayores. Vale la pena mencionar que el descubrimiento de esta tensión osmótica no ha sido hecho por un químico, sino que se debe a los trabajos de un botánico.

He abandonado el estricto orden cronológico al referirme también a estudios de los últimos tiempos, porque ellos están basados todavía en los resultados de lo que he llamado la Química Física clásica. Uno de sus más eminentes maestros, Wilhelm Ostwald, ahora nos parece demasiado aferrado a las ideas antiguas, porque no quiso reconocer, sino en sus últimos años de vida, los resultados de los estudios sobre la naturaleza discontinua de la materia y sobre los elementos que la forman. Estos estudios inauguraron una nueva era más moderna y culminaron con el descubrimiento de la disgregación de la materia. No quiero ocuparme en esta conferencia de las aplicaciones de estos estudios teóricos que tienen relación con la bomba atómica o con la generación de energía mediante la transmutación de los elementos. No se trata en estas aplicaciones de la repercusión de la química física en otros campos de la ciencia, ellas no han influido en el sentido de procurarnos nuevas visiones. Me limitaré más bien a señalar algunos aspectos menos conocidos, pero no menos sorprendentes.

Cuando Bequerel y los esposos Curie descubrieron la radioactividad y Roentgen los rayos X, el interés general se concentró en las aplicaciones que podrían tener estos nuevos conocimientos en la medicina. A las primeras radiografías poco nítidas, por ejemplo de las manos, en las cuales se pudo notar, con especial claridad, un anillo colocado *ad hoc*, y que todavía recuerdo, siguió el desarrollo de una técnica acabada. No sólo se logró ver el esqueleto del cuerpo humano y las cavidades en los pulmones, sino luego se descubrieron los medios químicos que permitían hacer impenetrables a los rayos X, ciertos órganos, como el estómago, la vesícula y los riñones. El examen de rayos X así se ha transformado en un instrumento para establecer un diagnóstico, no sólo en las clínicas, sino para ser usado a diario por el médico. Por otro lado estos mismo rayos y los de los elementos radioactivos han contribuido a aliviar y a prolongar la vida de un sinnúmero de enfermos de cáncer.

Ultimamente se ha dado un nuevo impulso al aprovechamiento de la radioactividad, debido a que existe la posibilidad de producir elementos radioactivos artificiales. Las enormes máquinas ciclotrones, betatrones, etc., ideadas para estudiar la constitución de la materia, suministran — como especie de subproductos — isótopos radioactivos de los elementos corrientes. Su aprovechamiento en estudios biológicos ya ha permitido aclarar muchos problemas, hasta ahora insolubles. Así se ha comprobado que el fosfato de calcio no se mantiene en forma inerte, sino que se renueva continuamente, en el esqueleto óseo, aun habiendo terminado éste su desarrollo. El empleo de estos elementos radioactivos artificiales, en el campo de la medicina, se encuentra sólo en su etapa inicial y pueden esperarse notables progresos en el futuro.

Quiero mencionar, al mismo tiempo, otra clase de terapéutica que se ha desarrollado sobre la base de los estudios físicos. Me refiero a la ultratermia, el tratamiento con corrientes eléctricas, similares a las que se emplean en la radio, pero con una longitud de onda diferente y que sirve para calentar los tejidos por los cuales pasan, permitiendo así el acceso directo del calor al interior del cuerpo. De paso sea dicho que actualmente se piensa usar este procedimiento para asar la carne u otros alimentos y no será sorprendente ver instalados los aparatos de ondas en las cocinas del futuro, reemplazando a las antiguas de carbón y leña.

Los rayos X encontraron también amplio campo en la industria, en la cual sirven como detectores de fallas en el material. Se han construido aparatos con tensiones hasta un millón de voltios para poder examinar gruesas piezas metálicas empleadas en aviones y otros aparatos que exigen especial seguridad. En este campo ha surgido últimamente un aliado o si se quiere un competidor. Se trata del ultrasonido, es decir de ondas acústicas de tal longitud que el oído humano es incapaz de captarlas. La reflexión de tales ondas en los huecos interiores de los metales permite la ubicación de fallas y la eliminación de las piezas defectuosas. Es interesante anotar que los oídos de ciertos animales perciben sonidos más agudos que nosotros. Se ha discutido mucho tiempo la razón por qué los murciélagos son capaces de volar en la obscuridad sin chocar con obstáculos. Aun tendiendo en una pieza una red de alambres se observó que los murciélagos nunca tropezaron con ella. Ultimamente se ha descubierto que disponen de un órgano para producir un silbido tan alto que nosotros no lo percibimos y cuyo eco registra su oído cuando se acercan a obstáculos que les obstruyen el camino. Extrayéndoles este órgano o el oído pierden por completo esta facultad. El hombre, que siempre ha sabido construir aparatos de perfección más finos que los que la naturaleza le ha suministrado, hoy día emplea este ultrasonido y su eco para guiarse con mayor seguridad. Así barcos han sido equipados con tales aparatos. Estos no sólo pueden medir la profundidad del mar y anunciar el acercamiento de obstáculos, como témpanos o rocas desconocidas, sino que aun permiten detectar cardúmenes que se encuentran en las profundidades y hasta identificar por la naturaleza del eco percibido la clase de peces que los forman.

La industria, para fines de control, también se sirve de las radiaciones ultracortas, las que sufren variaciones en su propagación cuando chocan con partes metálicas. Una fábrica de bombones de chocolate de Norteamérica que tuvo que pagar una fuerte indemnización a raíz de un accidente causado por un trocito de metal contenido en uno de sus chocolates, examina actualmente toda su producción mediante tales rayos antes de entregarla a los consumidores.

Nuevamente he abandonado el orden cronológico en el desarrollo de nuestros conocimientos de Física y Química y vuelvo a los primeros años del presente siglo y los descubrimientos de elementos radioactivos para señalar sus efectos en otra disciplina.

Los estudios de las transformaciones radioactivas demostraron que muchas de entre ellas son muy lentas y que sus velocidades no varían aún alterando las condiciones de temperatura y de presión dentro de los límites accesibles en nuestros laboratorios. Entre otros hechos se descubrió que el uranio se convierte—después de pasar por una serie de otros elementos, entre los cuales se encuentra el radio—finalmente en un elemento estable al cual se le ha dado el nombre de Radio G. Este Ra-

Radio G. es idéntico con el plomo, en todas sus propiedades, con la sola excepción que su peso atómico es un poco más bajo que el del plomo corriente. El ritmo de esta transformación del uranio y de sus descendientes es proporcional a su cantidad. El tiempo en el cual se desintegra el 50% de un elemento radioactivo se ha designado como su período y su valor para el uranio es del orden de 109 años, es decir de 1,000 millones de años. Si ahora encontramos en un mineral ciertas cantidades de Uranio y de Radio G. podemos calcular el tiempo que la formación de este último ha demandado. Debemos suponer, al hacer este cálculo, que el mineral en referencia no contenía plomo o Radio G. al depositarse y que nada se ha perdido desde ese entonces. Esta suposición es justificada puesto que las condiciones de precipitación del Ur y del plomo (o Radio G) son completamente distintas. Nuestro cálculo del tiempo transcurrido para formar la cantidad de Ra G. presente, de todos modos dará un valor mínimo y que además sólo comprende el período durante el cual la tierra ya era un cuerpo sólido en condiciones similares a las actuales. Resulta así que nuestro planeta debe haber existido, en forma parecida a la actual, durante más de 1,500 millones de años. En especial la presencia de uranio y plomo en las rocas de diferentes épocas geológicas permite calcular la edad de estas mismas. Así resulta para la época Arcaica una edad de 1,500 a 1,850 millones de años, para la edad del precámbrico 915 a 986 millones, para el cambrio superior 450 millones, para el pérmico inferior 225, para el cretáceo 60 y para el mioceno 38 millones de años. Otro método similar consiste en determinar la cantidad de helio contenido en las rocas uránicas y de torio, respectivamente. Ambos elementos forman este gas helio en su descomposición y conocemos el ritmo de esta producción. Nuevamente hay que suponer que no ha habido escape de helio durante todo el tiempo transcurrido y que el uranio o torio existía en la formación examinada desde un principio. Los tiempos calculados por medio de este método son algo inferiores a los que resultan aplicando el anterior. Así para rocas arcaicas se deducen 710 millones de años, para el carbón 150 millones, para el cenozoico 31 y para el oligoceno 8.4 millones de años. Finalmente, se ha usado en tercer método que se basa en la turbidez que causan los rayos emitidos por substancias radioactivas en los minerales y que se notan como halos cuyos diámetros aumentan con el tiempo. Se han observado en minerales de mica halos con diámetros hasta 0.04 mm., de lo cual se deduce una duración que varía entre 20 a 400 millones de años. Aunque estos datos no concuerden exactamente indican que la tierra tiene que haber existido en el estado actual desde hace más de 2,000 millones de años. Está en contradicción a este resultado el cálculo obtenido por Lord Kelvin anteriormente. Según él la tierra no puede haber demorado más de 100 mil años para pasar del estado completamente líquido al actual, si no existiese una fuente de calor especial. Esta discrepancia se explica ahora por medio de la misma radioactividad. La descomposición de los elementos uranio y torio y especialmente la del radio produce calor en cantidades muy superiores a las que se obtienen por unidad de masa en las reacciones químicas corrientes. Se ha determinado que las rocas contienen en término medio 3.10^{-12} g. de radio por gramo, o bien 3 miligramos por 1,000 toneladas. Un gramo de radio produce, por hora, 138 calorías y el calor total obtenido, suponiendo que sólo la capa exterior de la tierra, hasta unos 20 kilómetros de profundidad, contenga la proporción de radio indicada, bastaría para compensar la pérdida de calor de la tierra por radiación hacia el espacio, manteniéndose así constante su temperatura. Es cierto

que el resultado no satisface plenamente, puesto que no explica por qué la presencia de radio sería limitada a una capa tan delgada y por qué falta a mayor profundidad.

Un cálculo similar, hecho para el sol, desgraciadamente no da un resultado satisfactorio. Hay muchas razones para suponer que la radiación del sol no ha variado desde hace unos miles de millones de años. Ahora, aun suponiéndolo compuesto únicamente de uranio o de radio, no habría suficiente producción de calor para mantener su radiación durante un tiempo tan prolongado. No hay que olvidar que la energía emitida corresponde a unos 1,000 millones de millones de millones de kilowatt-horas por segundo. Helmholtz, que estudió el problema de la generación de esta energía, pensó en la contracción continua del sol, como posible fuente de calor, pero su cálculo demuestra que el calor así producido permitiría, a lo sumo, una duración de 50 millones de años, es decir un tiempo mucho menor que el que corresponde a la existencia de la tierra en su estado actual. Afortunadamente, esperamos haber salvado este problema, por lo menos en gran parte, suponiendo que hay otras reacciones nucleares que se producen en el sol y en las cuales se transforma masa en energía, según la ecuación descubierta por Einstein y comprobada en forma espectacular por la acción de la bomba atómica. Para explicar la radiación efectiva del sol se precisa la transformación en energía, de 4 millones 200,000 toneladas de materia por segundo. Afortunadamente, su masa es tan grande que aún así sólo disminuiría en un décimo de un por ciento al cabo de 15,000 millones de años, disminución que no influiría prácticamente. Falta, eso sí, establecer con exactitud cuál es el proceso nuclear que puede producir esta transformación de materia en energía y cómo se explica su desarrollo. Se ha sugerido la conversión del hidrógeno en helio, elementos que tiene el sol en abundancia. Según Bethe se efectuaría esta transformación a través de un ciclo en el cual intervienen el carbono y el nitrógeno, como catalizadores, elementos que también existen en cantidades apreciables en el sol. Este ciclo que no podemos realizar, por el momento, en el laboratorio necesita altas temperaturas, las que en el interior del sol se calculan en unos 20 millones de grados centígrados.

Ahora, hemos dicho anteriormente que las reacciones radioactivas no se alteran por variaciones de la temperatura y de la presión, como sucede con las reacciones químicas corrientes. ¿Por qué podrá suponerse entonces que estas otras reacciones nucleares pueden ser influenciadas por el aumento de temperatura? La explicación es sencilla. Para obtener reacciones nucleares se necesitan energías muy elevadas. En el laboratorio éstas pueden obtenerse acelerando, en forma artificial, partículas materiales, cargadas de electricidad, o bien partículas neutras, hasta que tengan una energía cinética suficiente para vencer la resistencia enorme del núcleo del átomo. Al elevar la temperatura, la energía cinética de todas las partículas aumenta. La temperatura de 3,000°C que podemos alcanzar en nuestros hornos no es suficiente para obtener la energía cinética requerida, pero sí es la de 20 millones de grados que rige en el interior del sol. El conocimiento de las energías necesarias para obtener las diferentes reacciones nucleares y la ley que rige la variación de la energía cinética de una partícula con la temperatura, nos permite calcular cuál será la reacción nuclear posible. Es así como Bethe ha llegado a establecer el ciclo que según pensamos mantiene el calor solar.

Pero no es este ciclo la única posibilidad teórica imaginable para realizar transformaciones de materia en energía. Así, a temperaturas muy inferiores que oscilan

entre 400,000 y un millón de grados, el hidrógeno y el hidrógeno pesado (una clase especial de hidrógeno muy rara en la tierra) probablemente forman un isótopo del helio, es decir un helio de un peso atómico distinto del corriente. El calor que debido a tal reacción se produce en una estrella naciente—la que debemos imaginarnos como una masa muy tenue—impedirá que su contracción continúe y así la estrella tendrá que mantenerse prácticamente sin alteración o con pequeños cambios de temperatura hasta haber consumido todo el hidrógeno pesado contenido en ella. Terminado este proceso volverá a efectuarse una nueva contracción, con lo cual aumentará la temperatura. A dos millones de grados, probablemente, empieza la descomposición del litio en helio y así las distintas reacciones nucleares podrán seguir una después de otra. Es claro que los períodos de cada una de estas etapas se cuentan por millones de años y por lo tanto nosotros no podemos esperar observarlas en la misma estrella. Afortunadamente, hay estrellas de todas las edades y así se ha podido coordinar su evolución con las reacciones nucleares respectivas. De interés especial es el hecho de que existen estrellas pulsantes, cuya luminosidad varía periódicamente, observándose períodos que oscilan de 6 horas hasta un año. Parece que se encuentran en un estado de equilibrio inestable en el cual se oponen las energías producidas por la reacción nuclear a las de las fuerzas de gravitación. Cuando las últimas prevalecen la estrella se contrae y al mismo tiempo su temperatura sube: con esto aumenta la intensidad de la reacción nuclear y la mayor presión consiguiente produce una extensión de la masa gaseosa y así una dilatación de la estrella. Esta última produce el enfriamiento consecutivo y la contracción correspondiente a las fuerzas gravitacionales, de manera que el ciclo se repite.

Hemos entrado de lleno en uno de los más interesantes campos de aplicación de la química física. La astronomía, es decir el conocimiento del mundo que queda fuera de la tierra, ha ejercido una atracción sobre el espíritu humano desde los tiempos más remotos. Debido a la imposibilidad de llevar a cabo una investigación directa, se ha prestado a las más atrevidas especulaciones. Hace un siglo, lo único que podía establecerse con certeza se refería a los movimientos estelares y a la distancia de algunas de las estrellas más cercanas, la que podía medirse mediante los métodos trigonométricos corrientes. Es en este campo donde la aplicación de nuestros conocimientos de la constitución de los átomos y muy especialmente de sus núcleos (como ya vimos en parte) ha producido una verdadera revolución.

La base de todos los estudios a los cuales ahora quiero referirme debe buscarse en los trabajos de Kirchhoff y Bunsen del año 1860, según los cuales se explicaba, por primera vez en forma correcta, la aparición de líneas oscuras en el espectro solar, líneas que Fraunhofer había descubierto ya en el año 1817. Su posición coincide con las líneas luminosas que emiten los diferentes elementos en el estado gaseoso. Kirchhoff estableció que cada elemento emite a altas temperaturas radiaciones de una determinada longitud de onda, es decir, de un color determinado y que absorbe la luz del mismo color. Así pudo demostrar por primera vez que los mismos elementos existen tanto en la tierra como en el sol y en las estrellas. La luz que nos llega de las partes más lejanas del mundo nos sirve como señal de identificación y esta observación de golpe amplió nuestro campo de investigación del diminuto planeta que vivimos al universo entero.

Kirchhoff había señalado las diferentes clases de espectros. Cuerpos sólidos incandescentes emiten un espectro continuo, lo mismo sucede en los líquidos y en los gases muy densos. Por otra parte los gases diluidos emiten sólo ondas de ciertas longitudes, es decir ciertas líneas y así podemos inmediatamente establecer cuál es la naturaleza de la fuente luminosa que analizamos. Como ya hemos dicho, estos gases absorben luz en los mismos colores en que los emiten y si se coloca, por lo tanto, una masa gaseosa delante de otra sólida incandescente, veremos el espectro continuo interrumpido por las líneas oscuras de Fraunhofer. Esto es justamente lo que sucede con el espectro solar y, así, llegamos a la conclusión que el sol está compuesto de un centro de alta densidad, comparable a un sólido y de una capa exterior gaseosa, una atmósfera que lo cubre. No en todos los cuerpos estelares sucede así. Por ejemplo la nebulosa que se ve en la constelación del orión presenta un espectro de líneas luminosas y por lo tanto tiene que estar formado por un gas muy diluido.

Desde la fecha de estas primeras observaciones hasta hoy día hemos aprendido mucho y quiero mencionar algunos fenómenos y las conclusiones a las que ellos nos han permitido llegar.

Desde luego llamó la atención el hecho que los espectros de las diferentes estrellas variaban considerablemente en cuanto a la intensidad de las líneas correspondientes a diferentes elementos. La conclusión de que su composición difería fuertemente no pareció muy probable y luego se buscó una explicación en la posible variación de los espectros debidos a cambios de temperatura y de presión. Se puede determinar la temperatura de una estrella midiendo su radiación, es decir su luminosidad, conociendo la distancia y el tamaño de ella. Sólo en muy pocos casos estos datos pueden determinarse directamente. Viene a favorecernos el hecho de que existen muchas estrellas dobles, para las cuales se puede determinar la masa y la densidad y por lo tanto su diámetro, observando las velocidades con las cuales gira uno de sus componentes en torno del otro. Habiendo establecido la distancia es entonces posible determinar la temperatura, midiendo la radiación. Agrupando las observaciones se vió que a iguales temperaturas correspondían iguales clases de espectros y así la determinación del espectro ahora sirve a la inversa para conocer la temperatura. La regla tiene excepciones y sólo se puede aplicar a las estrellas que pertenecen a la así llamada serie principal, que afortunadamente forman la mayoría.

¿Cuáles son las razones de que los espectros de los átomos varíen con la temperatura y la presión? Quiero mencionar la más importante que nuevamente se ha podido establecer por medio de estudios químico físicos.

La teoría de Rutherford Bohr considera a los átomos como formados de un núcleo pesado, cargado de electricidad positiva, alrededor del cual giran partículas mucho más livianas, con cargas negativas, tal como los planetas giran alrededor del sol. Las órbitas de estas partículas—electrones—tienen posiciones bien definidas y cuando un electrón salta de una órbita a otra, el átomo absorbe o emite luz de una longitud determinada. Así se explica el espectro característico de los átomos de cada uno de los elementos. Pero en la mayoría de los elementos no existe uno solo, sino varios electrones por átomo. De éstos siempre el más distante tiende, con mayor facilidad a efectuar los saltos descritos. Si el átomo absorbe energía (luz) el electrón se coloca en una órbita más distante y al volver a su posición primitiva emite una de las líneas características. No obstante, si la energía absorbida es muy grande, el electrón

puede ser llevado a tal distancia del núcleo que prácticamente ya no pertenece al átomo. Hablamos entonces de la ionización del átomo. En el ión así producido, otro electrón puede tomar el papel de la partícula que salta de una órbita determinada a otras más distantes y al volver a su posición primitiva producirá otro espectro, es decir otra serie de líneas. La aplicación de la termodinámica a la ionización ha permitido calcular las temperaturas y presiones a las cuales se debe producir tal fenómeno. Estos factores varían fuertemente para los distintos elementos. Podemos así formar una escala de temperaturas en concordancia con la ionización de los diferentes elementos, la que se documenta por la aparición de los espectros correspondientes. Así Eggert pudo comprobar la teoría de Eddington relativa a la constitución de las estrellas. Saha estableció que las líneas de Fraunhofer correspondientes al rubidio y cesio faltan en el espectro del sol, no porque estos elementos allí no existan, sino porque se encuentran ionizados a la temperatura de unos $6,300^{\circ}$ que rige en la zona de inversión de la atmósfera solar. Los estudios actuales sobre los espectros permiten determinar con una precisión mucho mayor las energías necesarias para lograr la ionización de los elementos y los datos obtenidos están en absoluta concordancia con las observaciones anteriores.

La termodinámica también permite calcular la posibilidad de la disgregación térmica de los núcleos y las temperaturas necesarias para lograrla. Para los elementos pesados estas temperaturas sobrepasan lejos a las que se observan en cualquier parte del universo, pero para los elementos livianos esta disgregación térmica es perfectamente factible y ya la hemos señalado como razón por la cual se mantiene la temperatura del sol y de las estrellas.

Tomando en cuenta la ionización de los átomos se ha comprobado que la composición elemental de la materia es aparentemente la misma en todo el universo. En el sol se ha constatado la existencia de 61 de los 92 elementos terrestres. Entre ellos el hidrógeno y el helio son los más abundantes, pues forman el 80 y el 18% de volumen respectivamente. Pero no hay que olvidar que estas cifras se refieren a la capa exterior del sol—a su atmósfera—en la cual los elementos livianos predominan forzosamente. Estas observaciones nada nos dicen sobre la composición interior del sol y de las estrellas, la que seguramente es distinta. Así el estudio de los eclipses del sol ya ha demostrado que la proporción de hidrógeno contenido en la misma atmósfera del sol aumenta hacia el exterior y Eddington ha calculado que el sol en su masa total sólo tiene un 35% de hidrógeno. Al analizar el estado de la materia en el interior de las estrellas debemos considerar, en primer lugar, que las condiciones de temperatura y de presión que allí rigen son completamente distintas de las conocidas por nosotros. Sabemos que a temperaturas del orden de millones de grados ningún sólido o líquido puede existir debiendo transformarse forzosamente en gas. Pero sería absurdo suponer que por esto la materia en el interior de las estrellas tiene las propiedades de los gases, tal como los conocemos en la tierra. Los estudios químicos físicos nuevamente nos ayudan para comprender—hasta cierto punto—el comportamiento de la materia en condiciones tan extremas. Hemos visto que los átomos, al subir las temperaturas, pierden uno y más electrones, formando iones y electrones libres. A temperaturas del orden de 20 millones de grados, como rigen en el centro del sol, este proceso debe quedar muy avanzado y existirán entonces los núcleos parciales o completamente desprovistos de electrones, junto con electrones libres. Esta trans-

formación permitirá una reducción extraordinaria del volumen, la que se producirá debido a la presión de unos 10,000 millones de atmósfera calculada para el interior del sol. Sabemos que la dimensión lineal de los núcleos es 10,000 veces menor que la de los átomos y la mezcla desordenada de núcleos y electrones permitirá, por lo tanto, densidades muy superiores a las que tienen los sólidos corrientes. Esta conclusión no es una pura especulación. Muy al contrario, explica las densidades enormes que se han podido comprobar en algunas estrellas. El primer caso observado se refiere al acompañante del sirio, una estrella apenas visible en los telescopios corrientes y cuya densidad es 60,000 veces mayor que la del agua.

Densidades tan enormes casi no pueden imaginarse. Pero el mundo nos presenta también el otro extremo, la dilatación casi infinita de la materia. La podemos observar en las nebulosas y hasta cierto punto en la cromósfera del sol. El estudio de los espectros de éstas, ha complementado en forma muy notable nuestros conocimientos adquiridos en el laboratorio. He mencionado que las líneas de emisión del espectro se producen cuando un electrón, llevado de una órbita interior a una de mayor distancia del núcleo, vuelve a su posición primitiva. En el espectro visible del hidrógeno, estudiado bajo el mejor vacío que podemos producir, se han podido observar 6 líneas, lo que significa que el electrón que normalmente se encuentra en la segunda órbita, puede subir hasta la octava. En los espectros estelares se han podido determinar hasta 30 líneas. La posibilidad que tiene el electrón para elevarse a órbitas mucho más alejadas del núcleo se explica porque las distancias entre los átomos en estas regiones, casi vacías, son muy grandes. En el mejor vacío artificial, el electrón que quiere subir a una órbita mayor que la octava chocaría con otro átomo. Las longitudes de ondas observadas en los espectros estelares coinciden con las calculadas teóricamente y así la astrofísica, por su parte, complementa nuestros conocimientos químico físicos.

Volviendo a los servicios que la espectroscopía ha prestado en los estudios astronómicos y astrofísicos, quiero mencionar la existencia de ciertas estrellas que emiten un tercer tipo de espectros en los cuales se observan bandas. Según nuestros conocimientos estas bandas se deben a la presencia de compuestos químicos. La banda del cianógeno en estrellas relativamente frías demuestra que ellas en su superficie sólo alcanzan temperaturas inferiores a 2,000°.

Como ya he señalado, todos los espectros se caracterizan por la estricta exactitud con la cual aparecen sus líneas de emisión o absorción en determinadas longitudes de ondas, o bien —lo que significa lo mismo— con frecuencias determinadas. No obstante, esta aseveración sólo es válida en forma rígida si la fuente luminosa no se mueve en relación al observador. Si hay movimiento relativo la frecuencia varía, aumenta cuando la luz se acerca y disminuye en el caso contrario. Este efecto, al que se le ha dado el nombre de su descubridor, el físico Doppler, es completamente análogo a la variación que experimenta la altura de un sonido según si se nos acerca o se nos aleja. Se explica por el hecho de que en la unidad de tiempo captamos un mayor número de vibraciones cuando disminuye la distancia desde la fuente de luz o del sonido y menor número de ellas —menor frecuencia— al aumentar la distancia. Tal efecto Doppler se observa a menudo en los espectros de las estrellas y demuestra su movimiento con respecto a nuestro sistema. Así se nota un marcado efecto Doppler hacia mayores frecuencias —longitudes de ondas más cortas— en las protuberancias del sol, cuando se mueven hacia nosotros; el mismo efecto Doppler hacia ambos la-

dos, lo que produce un ensanchamiento de las líneas, se observa en el espectro que produce la totalidad del sol debido a su rotación, la que causa un alejamiento, por un lado y un acercamiento por el otro. Al observar uno de los componentes de una estrella doble se notan desviaciones periódicas de las líneas del espectro hacia uno u otro lado, según si dicho componente se nos acerca o retrocede. En muchos casos, debido a estas observaciones, se ha comprobado que se trata de estrellas dobles, aún cuando en el telescopio aparece un solo punto luminoso.

En las estrellas en general, el efecto Doppler permite determinar su movimiento en relación con nuestra tierra. En las nebulosas planetarias que aparecen después de la formación de una nueva estrella se ha comprobado una expansión continua con velocidades de más de 1,000 kilómetros por segundo. Finalmente, se ha establecido que las nebulosas extragalácticas, consideradas como sistemas similares a nuestra galaxia, se alejan con velocidades fantásticas que alcanzan hasta 100,000 kilómetros por segundo, lo que corresponde a un tercio de la de la luz.

A través de estas últimas observaciones se verifica un teorema deducido de las cosmologías de Einstein y de otros, el cual establece que el mundo está en continuo movimiento de expansión. La interpretación indicada del fenómeno Doppler, en el espectro de las nebulosas, aunque no es aceptada con unanimidad, habiéndose propuesto otra explicación, no deja de impresionar, puesto que es un fuerte argumento en apoyo de las teorías ideadas para explicar el mundo y para calcular su extensión y su masa.

El movimiento de un cuerpo que emite radiación, necesariamente influye en igual grado en las posiciones de todas las líneas de su espectro. Si se observan líneas que no han sufrido cambios, su origen debe buscarse en otra parte. Esto permite, desde luego, identificar los elementos de la atmósfera terrestre, por la cual pasan los rayos de cualquier cuerpo celestial, porque sus líneas de absorción no sufren desviaciones. Sucede otro tanto con respecto a la materia que queda entre las estrellas que observamos y nuestra tierra. Pues el espacio de ninguna manera es vacío, aunque la cantidad de materia que contiene por unidad de volumen es enormemente pequeña. El enrarecimiento queda compensado por las enormes distancias debido a las cuales miramos a través de capas sumamente gruesas del espacio. Gracias a las observaciones mencionadas se ha podido comprobar que hay dos clases de materiales en el espacio interestelar. Por una parte nubes de partículas muy pequeñas, con diámetros que varían de un cien milésimo hasta un millonésimo de centímetro y que están formadas probablemente en gran parte por sílice. Además, hay átomos de oxígeno, nitrógeno, calcio, sodio, potasio etc. La identificación de estos elementos ha sido muy difícil porque nuevamente se presentan muchos átomos ionizados y se producen espectros de iones que no se pueden observar en el laboratorio. No obstante mediante los cálculos teóricos se ha podido comprobar que no existe un elemento desconocido en las nebulosas y en el espacio interestelar, como primero se pensó y al cual se había dado el nombre de *nebulium*. Muchas de las líneas observadas pertenecen a átomos de oxígeno que han perdido uno o dos electrones. Entre las líneas observadas existen algunas, que no sólo ha sido imposible producir en nuestros laboratorios, sino cuya formación prohíbe la teoría. El hecho se explica por la enorme dilatación que rige en aquel espacio, gracias a la cual los átomos que han perdido su electrón, pueden

quedar sin reabsorberlo durante un tiempo prolongado, condición que no se puede alcanzar experimentalmente.

He señalado sólo algunos de los resultados que se obtienen aplicando las teorías de la constitución de la materia a los estudios astronómicos. Hay una infinidad de observaciones y conclusiones que no puedo abarcar. Pero conviene hacer una pregunta. ¿Qué finalidad tienen tales estudios, aparte de la satisfacción de brindarnos una ampliación de nuestros conocimientos? ¿Habrá jamás oportunidad alguna para aprovechar prácticamente estos resultados? Debemos tener sumo cuidado al contestar tales preguntas. Desde luego sabemos que mucho de lo que pareció absurdo hace poco, hoy en día se ha convertido en realidad. ¿Por qué no pensar entonces en la posibilidad de abandonar este planeta diminuto para buscar otro lugar en el universo? Es claro que lo primero que necesitamos conocer en tal caso son las condiciones que nos esperan, o sea el clima en las otras partes del mundo. Actualmente se investiga en forma científica la idea de construir aparatos que nos permitan abandonar la tierra. El primer objeto que se persigue es el de establecer a cierta distancia de nuestro planeta un satélite artificial que provisto de aparatos automáticos convenientes, serviría para transmitirnos observaciones de alto valor científico y que podría desempeñar un importante papel en el desarrollo de la televisión mundial.

Les pido perdón por haber ocupado demasiado tiempo, expresando ideas y conclusiones, en parte, algo extrañas. Pero la tendencia de discurrir sobre problemas más generales, dejando a otros el estudio más difícil y más penoso de los detalles es una debilidad de los hombres de mayor edad. Agrego a mis agradecimientos por haberseme brindado esta oportunidad los más profundos sentimientos de mi gratitud por el alto honor que me han conferido al nombrarme miembro académico de la Facultad.