

# elementos

Revista de Ciencias Exactas, Naturales y Aplicadas

**¿Existen los  
Agujeros Negros?**

**Notas sobre el  
Concepto de Espacio  
Absoluto:  
Newton y Einstein**

**Importancia del estudio  
de la Electroquímica  
en la formación de  
Químicos  
Farmacobiólogos**

**El Álgebra Lógica de  
George Boole**

REVISTA TRIMESTRAL  
No. 1 • año 1 • Vol. 1  
OCTUBRE-DICIEMBRE  
1984

UNIVERSIDAD  
AUTONOMA DE PUEBLA

RECTOR  
Lic. Alfonso Vélez Pliego  
SECRETARIO GENERAL  
Dr. Daniel Cazés Menache  
SECRETARIO DE RECTORIA  
Lic. José Doger Corte



DIRECTORES  
Jorge Barona Díaz  
Jesús Mendoza Álvarez  
CONSEJO EDITORIAL  
María de la Paz Elizalde González  
Julio Mendoza Álvarez  
Jesús Reyes Corona  
Gerardo Torres del Castillo  
Fotografía  
Centro de Información  
y Documentación de  
la Cultura Audiovisual UAP

ELEMENTOS es una publicación trimestral de la Universidad Autónoma de Puebla. Los artículos firmados son responsabilidad de su autor. Se autoriza la reproducción de artículos citando la fuente. Toda correspondencia debe dirigirse a: **ELEMENTOS Revista de Ciencias Exactas, Naturales y Aplicadas**; Instituto de Ciencias de la Universidad Autónoma de Puebla, Maximino Avila Camacho 219. Puebla, Pue., México.

Precio del ejemplar:  
en México 100 pesos m.n.  
en el Extranjero 2.50 u.s. dólares



Revista de Ciencias Exactas Naturales y Aplicadas

REVISTA TRIMESTRAL No. 1 • año 1 • Vol. 1 • OTUBRE-DICIEMBRE DE 1984

## Indice

EDITORIAL ..... 2

### ARTICULOS

¿Existen los Agujeros Negros?  
*Deborah Dultzin Hacyan* ..... 4

Después de la Gran Explosión  
*Rodrigo Huerta* ..... 9

¿Cómo se formó el mundo?  
*Edward P. Tryon* ..... 12

Notas sobre el Concepto de Espacio Absoluto: Newton y Einstein.  
*Elia Nathan Bravo* ..... 16

Johanes Kepler  
*Luis Rivera Terrazas* ..... 31

Importancia del Estudio de la Electroquímica  
en la Formación de Químicos Farmacobiólogos.  
*Martín Marino Dávila Jiménez* ..... 34

El Concepto de Elemento en el Liber Paramirum de Paracelso.  
*Lourdes Rensoli Laliga* ..... 36

Simetría ¿Para qué?  
*Ma. Eugenia Mendoza, Cristóbal Tabares* ..... 46

El Algebra Lógica de George Boole.  
*Mauricio Beuchot* ..... 48

Absolutismo y Relativismo en Lógica.  
*Jean van Heijenoort* ..... 52

Una Sugerencia.  
*Juan José Rivaud* ..... 57

El Mundo Físico del Niño.  
*Jean Piaget* ..... 58

AUTORES Y COLABORADORES ..... 61

### INFORMACION

El Departamento de Físico-Química del ICUAP.  
*María de la Paz Elizalde González* ..... 62

# EDITORIAL

La importancia y el impulso dado a la labor científica a partir del Movimiento de Reforma Universitaria Democrática en nuestra máxima Casa de Estudios, así como el respaldo de una tradición de actividad intelectual de cuatro siglos han dado forma al nacimiento de Elementos, medio de comunicación en Ciencias Exactas, Naturales y Aplicadas de la Universidad Autónoma de Puebla. Con esta nueva publicación periódica, que se suma al esfuerzo editorial que nuestra Universidad realiza, se da respuesta a un problema importante de la formación e investigación científicas, que es el de la comunicación, el de la expresión de los conocimientos científicos.

El desarrollo de la mente del hombre hasta adquirir la actitud del análisis científico de la realidad, se ha caracterizado en su aspecto histórico por un enfrentamiento con ideologías y posiciones irracionales, contienda que se ha recrudecido y manifestado en forma violenta en el momento de la aparición del Método Científico, principalmente en el caso de Galileo. No está por demás poner énfasis en el camino difícil que la Ciencia ha tenido que recorrer después de siglos para poder establecerse en al menos un sector del pensamiento humano. Por otra parte, posteriormente a esta lucha inicial dada por la razón en su forma científica, surgen Sistemas Filosóficos que pretenden dar una explicación total de la realidad, y que al hacerlo sobreestiman en mayor o menor grado los alcances y la función de la Ciencia, como sucede en el Sistema de Kant por el lado de la tradición fenomenológica y con la visión filosófica de los Positivistas Lógicos en la corriente de la Filosofía Analítica. Después de moverse por estos extremos, es decir, de ser un objeto de condena y exterminio para pasar a ser más tarde un elemento de explicación filosófica que sitúa al hombre en una posición de seguridad frente al devenir histórico, tal parece que la Ciencia al parejo de la Filosofía, han cesado en su pretensión de la explicación absoluta de la realidad.

Sin embargo, es un grave y lamentable error el creer que la irracionalidad ha cedido en la lucha por posesionarse de la mente humana cuando por el contrario vemos como la irracionalidad se ha vuelto más sofisticada hasta llegar al extremo de concretizarse en objetos de consumo masivo, aún cuando lo más preocupante se ubica en la esfera del pensamiento y la visión que del mundo posee el hombre común, en la educación, en las relaciones interpersonales y en la política, sólo para mencionar algunas de las zonas de emergencias de la irracionalidad. Aunque pueda parecer paradójico, esta irracionalidad ha infectado a la Ciencia en su interacción con la Sociedad, con la mistificación del poder, al convertirse la actividad, por el uso que de ella hacen políticos y militares en un medio de opresión y dominación, en una consecución del poder por el poder mismo, por lo que se ha vuelto un factor determinante en la actual división internacional del trabajo, en las estructuras de dominación-sumisión.

Ante este panorama mostrado a grandes rasgos se hace urgente y necesario seguir contribuyendo con renovado esfuerzo a la edificación de una cultura científica, en la que los medios de comunicación promuevan el diálogo intelectual entre los individuos, trabajo que la Revista Elementos se apresta a realizar con responsabilidad y sentido del proceso histórico al que se incorpora.

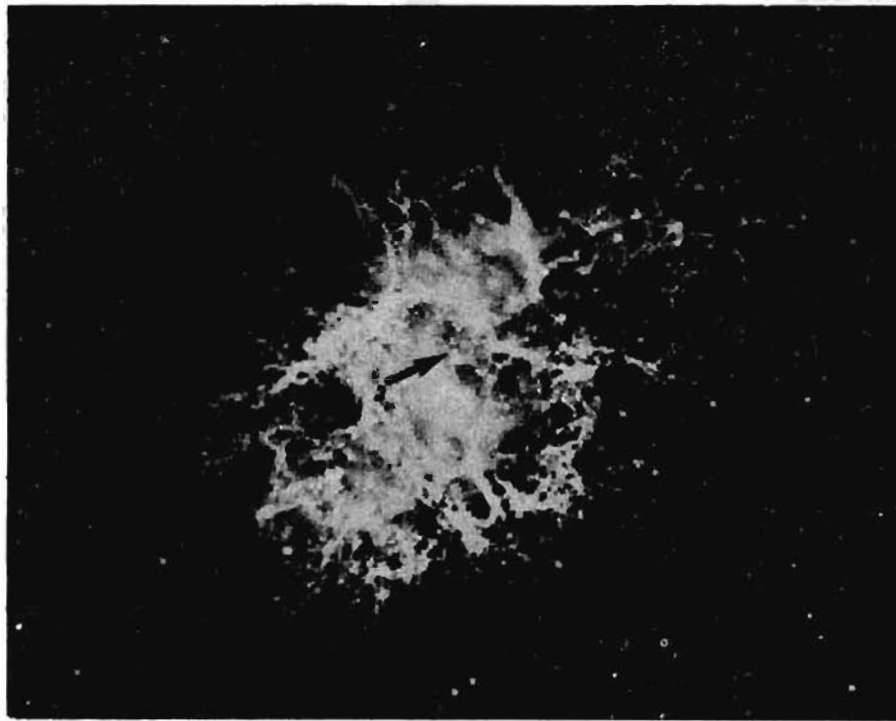
Existen dos causas más que dan origen a Elementos; la primera radica en el desarrollo explosivo de la Ciencia que a su vez ha provocado un aumento masivo de información científica de tal forma que uno de los problemas principales para el investigador contemporáneo lo es el de tener conocimiento y a su disposición de toda esta información producida. A su vez, los grupos sociales deben contar con medios de comunicación que detecten y difundan los productos del trabajo científico con el fin de incorporarlos como información a la formación de los futuros investigadores; creemos que es digno de mención el hecho que la Revista Elementos se constituye en la primera publicación de temas científicos en provincia. La segunda causa, que bien puede incluirse en la primera, se explica por necesidades didáctico-pedagógicas inmediatas en los profesores y estudiantes del área de Ciencias de la Universidad Autónoma de Puebla, ya que al considerar los problemas a los que estos estudiantes se enfrentan al comenzar sus estudios y aún durante éstos, se observa un desconocimiento de algunos de los elementos importantes para poder adquirir una buena formación en esta área del conocimiento, como son: un panorama más o menos amplio de las diferentes áreas de investigación científicas, la disciplina que su intelecto debe adquirir, vinculación con la realidad al manejar tecnicismos, ubicación histórico-filosófica de conceptos científicos, etc. y, al ser parte importante para el buen funcionamiento del aparato científico la formación sólida y rigurosa de sus futuros investigadores, es aquí donde Elementos se da a la tarea de reforzar el proceso de aprendizaje al proporcionar al estudiante una serie de artículos didácticos, divulgativos e informativos que le permitan profundizar y ampliar su búsqueda en el conocimiento de la naturaleza a través del método científico.

En nuestro primer número de presentación comenzamos la temática de la revista con diferentes enfoques sobre el problema del espacio físico en la Física Clásica y Moderna, desde un planteamiento técnico acerca del origen del Universo, así como un análisis de algunas de las implicaciones que se desprenden de la interpretación de ciertas Teorías Cosmogónicas en las que el descubrimiento de algunos fenómenos macroscópicos relacionados con el estudio de los diferentes tipos de estrellas observables han permitido un conocimiento más exacto del Universo que habitamos, hasta el exámen de los conceptos filosóficos a los que están ligados la Mecánica Clásica y la Teoría de la Relatividad. En el campo de la Historia de la Física se presenta un estudio sobre uno de los iniciadores del Método Científico que contribuyó fundamentalmente al desarrollo de la Astronomía, Johannes Kepler. También dentro del área de Historia de la Ciencia, en este caso, de la Química, presentamos una colaboración que publicaremos en dos partes sobre uno de los precursores de la Química Moderna, artículo muy interesante que entre otras cosas nos muestra como el nacimiento de la Ciencia no fue espontáneo, sino que hunde sus raíces en hombres que aún se encuentran ligados al pensamiento medieval como Paracelso; y continuando con la Química nos encontramos con un artículo didáctico sobre Electroquímica en el que nos damos cuenta de la conjunción que se presenta entre la Química, Física y Biología en esta parte importante de la Química Moderna; en seguida se presenta un breve análisis sobre un concepto que ha estado presente en la historia de la percepción estética y del conocimiento humano, y que sin duda es uno de los más inmediatos e interesantes, nos referimos a la simetría. Ofrecemos también a nuestros lectores estudios sobre lógica-matemática, que desde fines del siglo pasado han marcado un cambio importante en el desarrollo de la Matemática Moderna así como otros artículos que esperamos sean de utilidad a nuestro público lector y agradeceremos todos los puntos de vista y sugerencias de los lectores que pueden hacerse llegar a nuestra redacción y que publicaremos en el próximo número en la sección de correspondencia.

Los Directores

# ¿Existen los Agujeros Negros?

DEBORAH DULTZIN HACYAN



La Nebulosa del Cangrejo. La flecha indica la posición del pulsar (estrella de neutrones). (Foto: Observatorio de Lick).

Algunas de las teorías que han revolucionado de manera más drástica nuestra concepción del mundo, han sido tan adelantadas para su época, que además de explicar una serie de fenómenos naturales, han predicho la existencia de otros cuya realidad es imposible verificar en ese momento. Sin embargo, al pasar el tiempo, con el adelanto de la tecnología, estas predicciones se verifican. Un ejemplo es la Teoría de la Relatividad General (TRG) que predijo hace casi setenta años, la existencia de "agujeros negros" en el Universo.

La TGR es una teoría de la gravitación propuesta por Albert Einstein algunos años después de que él mismo propusiera la Teoría de la Relatividad Especial (TRE). La TRE nació en 1905 y revolucionó la física, con conceptos totalmente nuevos e incomprensibles para el "sentido común". Según la TRE ningún cuerpo o mensaje puede viajar más rápido que la luz, el espacio y el tiempo son conceptos relativos: por ejemplo, el tiempo transcurre más o menos lentamente, según la velocidad de quien lo

mede; es decir, no existe un tiempo absoluto. Además, la TRE introdujo un nuevo concepto: el espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Este nuevo espacio es la unión del espacio "común y corriente" —que todos sabemos tiene tres dimensiones— y del tiempo, interpretado como una cuarta dimensión. La constancia de la velocidad de la luz, nos permite medir el tiempo en unidades de longitud y viceversa.

La TRE no es capaz de explicar el fenómeno de la gravitación (la existencia de una fuerza de atracción universal a la cual están sujetos todos los cuerpos y cuya ley fue enunciada por Newton) y por ello, alrededor de 1915, Einstein propuso una nueva teoría: La Relatividad General. Esta teoría contenía la anterior (TRE) y además explicaba la gravitación de una manera realmente revolucionaria: según la TRG los cuerpos deforman el espacio-tiempo a su alrededor. La sola presencia de un objeto masivo produce una curvatura del espacio-tiempo, y es esta curvatura la que es sentida por otros cuerpos como atracción gravitacional. Debido a la curvatura del espacio-tiempo alrededor de un cuerpo masivo, otro cuerpo que pase cerca, no seguirá como trayectoria una línea recta, sino una trayectoria curva. Esto, en la práctica, es lo que se observa como atracción gravitacional.

La deformación del espacio-tiempo actúa también sobre los rayos de luz: por ejemplo, los rayos de luz provenientes de las estrellas lejanas se curvan ligeramente al pasar cerca del Sol (este efecto, predicho por la TRG, se ha podido comprobar observando las estrellas cerca del disco solar durante un eclipse de Sol). Además la TGR predice, como la TRE, una relatividad del tiempo: un observador lejano vería que el tiempo transcurre más lentamente cerca de un cuerpo cuyo campo gravitacional sea sumamente intenso.

La curvatura de una superficie ordinaria se estudia mediante la geometría. Para estudiar la curvatura del espacio-tiempo de cuatro dimensiones producida por los cuerpos masivos, se usa una geometría llamada la Geometría de Riemann. Con esta herramienta matemá-

tica Einstein obtuvo las ecuaciones que nos dan el campo gravitacional a partir de la geometría del espacio-tiempo.

En 1916 Schwarzschild obtuvo la primera solución a dichas ecuaciones, para el caso particular de una estrella, o cualquier cuerpo masivo que tenga la forma de una esfera. Esa solución de Schwarzschild se reducía, en primera aproximación, a la ley de gravitación de Newton y, en segunda aproximación, predecía efectos casi imperceptibles, pero que hoy en día han sido comprobados con bastante precisión, entre ellos: la curvatura de los rayos luminosos al pasar cerca del Sol y el corrimiento del perihelio de los planetas. Aparte de estos efectos, todos muy importantes, pero que, por falta de espacio, no podemos examinar con más detalle, la solución de Schwarzschild predecía un fenómeno curioso: si un cuerpo de masa  $M$  tiene toda su masa concentrada en una esfera de radio  $2GM/c^2$ , llamado radio de Schwarzschild ( $G$  es la constante de gravitación y  $M$  la masa del cuerpo, y  $c$  la velocidad de la luz), entonces ningún cuerpo, ni la luz, ni ningún tipo de información, podría escapar desde dentro de esa esfera.

En el lenguaje de la relatividad general se puede decir que el espacio-tiempo se curva a tal grado que... ¡se cierra sobre sí mismo! Todo lo que está atrapado en ese pedazo de espacio cerrado nunca podrá salir al mundo exterior. Un objeto puede entrar en este "agujero negro", pero, nunca podrá escaparse de ahí.

Existe otra manera de comprender lo que significa un agujero negro, y esta idea se le había ocurrido ya a Laplace a fines del siglo XVIII.

Es bien sabido que para poder escapar de un cuerpo celeste —por ejemplo, un planeta como la Tierra— es necesario alcanzar una cierta velocidad, llamada velocidad de escape, que para la Tierra es de 11.2 km/seg. Si una nave cohete no alcanza esta velocidad, llegará de todos modos a cierta altura, pero después la Tierra lo atraerá hacia abajo otra vez. Esa velocidad de escape depende de la masa del cuerpo celeste y de su radio (más precisamente, de la distancia entre el centro del cuerpo celeste y la superficie desde la cual se lanza el cohete). Por ejemplo, la velocidad de escape desde la superficie del Sol es de 615 km/seg. Ahora bien, ¿qué pasaría si el radio del Sol fuera la cuarta parte de lo que es permaneciendo su masa constante? ... En ese caso la velocidad de escape sería el doble: 1,230 km/seg. En general, mientras más pequeño es el radio y mayor es la masa de un cuerpo celeste, mayor es su velocidad de escape. Por ejemplo, si una estrella tuviera la misma

masa que el Sol, pero un radio menor que 3 km, entonces la velocidad de escape sería mayor que la velocidad de la luz: 300,000 km/seg. ¿Y qué quiere decir esto? ... Siguiendo el razonamiento de Laplace, un cuerpo celeste con esas características no dejaría que se escape de su superficie ningún rayo de luz, ni ningún otro objeto (como hemos dicho antes, la TRE nos dice que velocidades superiores a la de la luz son imposibles). En pocas palabras, ese cuerpo celeste no emitiría ni el más leve rayo de luz, y para cualquier observador sería un "hoyo negro" en medio del espacio.

Antes del descubrimiento de la TRG no se sabía que la luz también era afectada por la gravedad, de modo que las ideas de Laplace fueron tomadas como mera especulación. Por otro lado, la masa de un "hoyo negro" debería estar concentrada en un volumen increíblemente pequeño. Por ejemplo, para que una estrella de la masa del Sol se vuelva "agujero negro", tendría que comprimirse en una esfera de sólo 3 km de radio. Esto, a su vez, implicaría que la densidad fuera tal que una cucharadita de agujero negro pesaría ¡alrededor de diez mil millones de toneladas! ¿Pueden realmente existir tales cuerpos en el Universo? Aún suponiendo que existen, ¿de dónde vienen, y cómo pudieron formarse?

La respuesta a esta última pregunta la ha dado recientemente la astrofísica. Y, en particular, la teoría de la evolución estelar.

### Estrellas y agujeros negros

Uno de los fenómenos más difíciles de explicar para la teoría de la evolución estelar es: cómo se forman las estrellas. La hipótesis más aceptada nos dice que las estrellas se forman de las nubes de gas y polvo que hay en el medio interestelar. Cuando este material se condensa, se forma una "protoestrella", que después se sigue contrayendo por la acción de su propia gravedad. Al contraerse, la temperatura y la presión en el centro aumentan y llega un momento en que son tal altas que en el interior de la estrella se empieza a desencadenar una serie de reacciones, llamadas termonucleares; en este momento, la estrella "se enciende". Las estrellas están hechas fundamentalmente (en un 80 por ciento) de hidrógeno ( $H$ ); las reacciones termonucleares transforman el hidrógeno en helio ( $He$ ) y esta transformación libera cantidades fabulosas de energía, en forma de luz y calor. En estas condiciones, la presión en el centro de la estrella es muy alta, tanto que contrarresta la acción de la gravedad. La estrella no se

sigue contrayendo, ni tampoco se desintegra, es decir, se establece un equilibrio (equilibrio entre las fuerzas de gravedad y presión que actúan en sentido opuesto).

La vida de cada estrella es diferente (dependiendo fundamentalmente de qué tanta masa tenga la estrella), pero, en una forma muy general, la historia se puede resumir así:

Cuando casi todo el  $H$  de la estrella se ha transformado en  $He$ , se rompe el equilibrio y la estrella se contrae. La temperatura en el centro aumenta todavía más, hasta llegar a un momento en que es tan alta que el helio se empieza a transformar en carbón; vuelve el equilibrio y, al agotarse el helio, se repite el ciclo: esta vez el Carbono se transmuta y así sucesivamente hasta formarse el hierro ( $Fe$ ). Cada una de estas reacciones de transformación libera menos energía que la anterior. Cuando la estrella es fundamentalmente de  $Fe$ , podemos decir que empieza a agonizar, puesto que ya no es capaz de emitir más energía por reacciones termonucleares. ¿Qué le sucede entonces? ¿Cómo mueren las estrellas?

Algunas estrellas explotan y vuelven a ser lo que eran antes de formarse: nubes de gas y polvo. Pero, en la mayoría de los casos, la estrella, al explotar, no se desintegra por completo, queda una parte, llamada el "residuo" de la explosión. A las estrellas que explotan, se les llama "Supernovas".

¿Qué sucede con las que no explotan? ¿Y con los residuos de las que explotaron? Sucede que al no haber ya reacciones nucleares, la presión interna no es capaz de soportar el peso de las capas exteriores y la estrella se contrae, disminuye su radio paulatinamente, aumenta su densidad (se vuelve más y más compacta) y se va enfriando. Ahora bien, pensemos en el siguiente problema: ¿Qué tan compacto puede ser un cuerpo? En otras palabras, ¿existe algún límite a la contracción gravitacional? Este problema se ha estudiado desde hace muchos años.

En 1930, Chandrasekhar encontró que una estrella con una masa menor que 1.4 masas solares ( $1.4 M_{\odot}$ , que es como escriben los astrónomos), en el transcurso de la contracción gravitacional que sufre al final de su vida, puede llegar a una configuración de equilibrio en la que la contracción se detiene. La explicación de Chandrasekhar es la siguiente: Al contraerse la estrella, llega un momento en que la materia de la estrella se vuelve tan densa que los electrones de la estrella pasan a un estado, llamado por los físicos, "estado degenerado", en el cual la presión ejercida por los electrones es tan alta que puede de-

tener la contracción. De esta manera, se llega a una configuración de equilibrio en la que los electrones soportan el peso de las capas exteriores de la estrella. Estas configuraciones corresponden, en la práctica, a las estrellas conocidas como *enanas blancas*. Ahora bien, si la masa de una estrella, al iniciarse la contracción, es mayor que  $1.4 M_{\odot}$ , entonces los electrones no son capaces de soportar el peso de la estrella y ésta se sigue contrayendo. ¿Hasta cuándo?

En 1932 Landau demostró, teóricamente, que si la masa de la estrella fuera menor que  $3 M_{\odot}$  (en la actualidad este límite oscila entre 2 y 3 masas solares), la estrella todavía tendría salvación. Landau planteó que, en este caso, la estrella debería llegar nuevamente a un estado de equilibrio. Poco después de la publicación de Landau, en el mismo año, fue descubierta una nueva partícula atómica: el neutrón (cuyo nombre viene de que no tiene carga eléctrica); y, en 1933-34, los astrónomos Baade y Zwicky hablaron por primera vez de la posibilidad de la existencia de "estrellas de neutrones", y de su posible relación con las explosiones de Supernovas. Se pensó que podría ser en estas estrellas, precisamente, en las que se alcanzaría la nueva configuración de equilibrio, de la que hablaba Landau.

En estas estrellas, la densidad sería tan alta que los protones (que son positivos) chocarían con los electrones (negativos) para formar neutrones. De esta manera los núcleos atómicos se desintegrarían y todo el material de la estrella se convertiría en un "gas degenerado de neutrones", el cual, de manera análoga a como actúa el gas degenerado de electrones en las enanas blancas, ejercería la presión suficiente para detener la contracción gravitacional de la estrella.

Esta teoría, sin embargo, salva del colapso total sólo a las estrellas con masas menores que  $3 M_{\odot}$ . ¿Qué sucedería con las más masivas? (y se sabe que existen muchas estrellas con masas hasta de  $50 M_{\odot}$ ). En 1939 Oppenheimer y Snyder demostraron que estas estrellas no podían tener salvación. Que en este caso no podía existir *ninguna* configuración de equilibrio capaz de detener la contracción gravitacional, produciéndose entonces el *colapso gravitacional* de la estrella, que se haría cada vez más y más pequeña, más y más densa, hasta convertirse en... ¿? en uno de esos objetos celestes de los que hablaba Laplace: tan compactos que se vuelven invisibles, en uno de esos objetos tan densos, que el espacio a su alrededor se curva a tal punto que la luz queda atrapada, y de esta manera el objeto pierde toda conexión con el mundo exterior, desaparece del Universo dejando sólo: un hoyo negro.

Ahora nos podemos preguntar: muy bien, pero, ¿qué relación tienen todas estas teorías con la realidad? ¿Existen realmente las estrellas de neutrones y los hoyos negros?

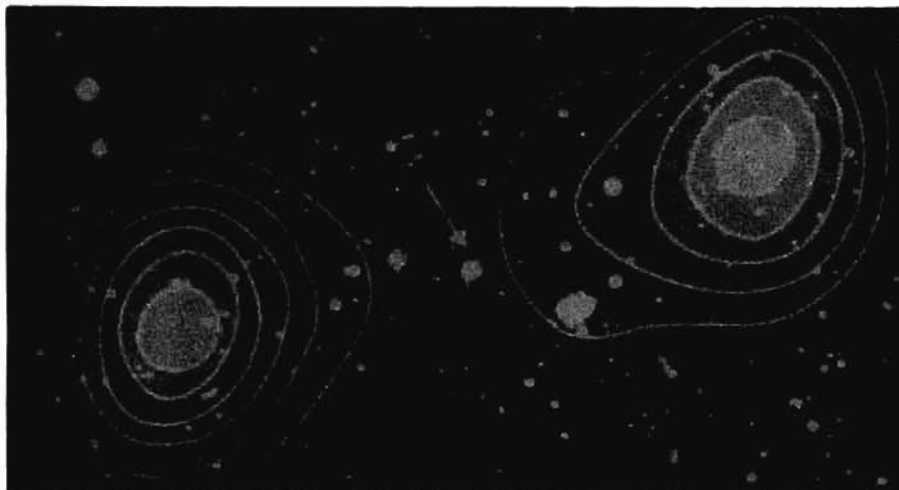
Las enanas blancas se conocían ya desde antes de que fuesen estudiadas teóricamente. Efectivamente, todas las que se conocen tienen masas menores que  $1.2 M_{\odot}$ , sus radios van de 3,000 a 20,000 km y sus densidades son tan altas que un  $\text{cm}^3$  pesa ¡una tonelada!

Las estrellas de neutrones se descubrieron 35 años después de que se había predicho su existencia. En 1968 se publicó un pequeño trabajo en el que se anunciaba que los radiotelescopios habían detectado un nuevo tipo de objetos celestes: unas fuentes de radio, muy compactas, que emitían pulsos regulares de unos cuantos segundos. Se les llamó "*pulsares*". En el mismo año, Gold ex-

plicó, a partir de consideraciones teóricas, que estos nuevos objetos debían ser estrellas de neutrones en rotación, y esta idea se confirmó posteriormente por las observaciones.

Si un hoyo negro no emite ni luz, ni ninguna otra señal ¿cómo podemos saber si existe o no? Desde luego que no podemos *ver* un hoyo negro, pero sí podemos detectar su presencia. Ya hemos visto que el campo gravitacional cerca de un hoyo negro es enormemente intenso (en otras palabras: el espacio a su alrededor está muy deformado). Existe una manera muy ingeniosa de detectar la presencia de hoyos negros a través de efectos gravitacionales. Para entender esta idea, es pertinente explicar brevemente lo que es un *sistema binario*.

La gran mayoría de las estrellas no están aisladas, sino que forman sistemas de dos, tres o más estrellas que interactúan gravitacionalmente entre sí. A un sistema de dos estrellas unidas gravitacionalmente, se le llama doble o sistema binario. En estos sistemas, ambas estrellas giran alrededor del centro de masa del sistema. Si las estrellas están suficientemente separadas entre sí, se pueden ver ambas a simple vista o con el telescopio, pero hay algunos sistemas que no pueden resolver (ver las dos estrellas por separado) ni con los telescopios más potentes. En estos casos, en que vemos una sola estrella, existe otro tipo de información que nos puede indicar que se trata en realidad de una estrella doble (o sistema binario): si el plano de las órbitas de las estrellas alrededor del centro de masa está sobre la línea visual (o muy ligeramente inclinado respecto a ésta), las estrellas se eclipsarán mutuamente al pasar una frente a otra; y esto se manifiesta como una variación en el brillo de la estrella visible (que corresponde a distintas porciones de las dos componentes). Tenemos además otra información muy importante: el espectro.\* En muchos casos al tomar el espectro de una estrella, aparecen dos espectros superpuestos y, si sacamos una secuencia de espectros, podemos detectar el desplazamiento de las líneas hacia el rojo o hacia el violeta, producido por efecto Doppler.\*\* Aún



Patidgalaxia Cigar A. La flecha indica la posición de la galaxia visible ópticamente. Se han dibujado sobre la fotografía, los isoccontornos de las regiones emisoras en radiofrecuencia. (Foto: Observatorio de Hale).

\* Al hacer pasar la luz de la estrella a través de un prisma o rejilla de difracción, obtenemos el espectro. En él aparecen un continuo y una serie de líneas características que nos dan información sobre la temperatura y otras características de la estrella.

\*\* El efecto Doppler nos dice que si la fuente luminosa está en movimiento con respecto al observador, la longitud de onda de las ondas luminosas aumenta o disminuye (es decir, se ve desplazada hacia el rojo o hacia el violeta) según si la fuente se aleja o se acerca.

en el caso en que veamos un solo espectro, podemos saber de la presencia de otra componente por el movimiento orbital que se refleja en el desplazamiento de las líneas. Se sabe también que si las dos componentes de un sistema binario están muy cercanas entre sí, puede haber un flujo del material de una hacia la otra (o entre ambas) debido a la atracción gravitacional. A este proceso se le llama: "acreción" de materia.

¿Qué sucedería si en uno de estos sistemas binarios una de las componentes fuese un hoyo negro y la otra una estrella normal? En primer lugar, es evidente que veríamos una sola estrella y un solo espectro (el de la estrella), pero con las líneas desplazadas por efecto Doppler. No podríamos observar ningún efecto de eclipse, puesto que las dimensiones del hoyo negro son tan pequeñas (unos cuantos kilómetros) que su paso frente a la estrella sería indetectable. Pero el punto clave es el siguiente: se ha encontrado, teóricamente, que si en un sistema binario, es un hoyo negro o una estrella de neutrones lo que se está "chupando" el material de la otra estrella, el fenómeno de acreción sería tan intenso que debería emitirse una gran cantidad de energía en forma de rayos X. Ahora bien, para distinguir entre la presencia de un hoyo negro y una estrella de neutrones, todo lo que necesitamos es conocer la masa del objeto (como ya hemos visto, si la masa es mayor de unas  $2.5 M_{\odot}$ , tiene que ser un hoyo negro).

Mediante las observaciones del cielo, realizadas desde satélites artificiales, se han logrado detectar unas 100 fuentes de rayos X en nuestra galaxia. Algunas de estas fuentes son regiones extendidas (nebulosas, etc.) y otras vienen de regiones muy compactas (estrellas o sistemas de estrellas). De este tipo de fuentes de rayos X (compactos), varias se han identificado ópticamente con sistemas binarios. Más aún, con estrellas de las que se sabe desde hace tiempo, que deben ser dobles a pesar de que se observa *un solo* espectro. Uno de los ejemplos más interesantes (por ser el objeto más estudiado hasta ahora) es el de la fuente de rayos X llamada Cyg. X-1 (que está en la constelación del Cisne). Esta fuente se ha identificado con una estrella doble en la que el compañero no se ve (no aparece su espectro). Sobre el espectro de la estrella aparecen ciertas líneas, no pertenecientes al espectro estelar, y de las cuales se puede deducir la existencia de un flujo de material estelar que sale de la estrella y va hacia el objeto invisible. Ahora el punto fundamental: ¿Cuál es la masa de ese objeto invisible? Desgraciadamente, esto es precisamente lo más difícil de

calcular, ya que se puede hacer sólo por métodos indirectos. Sin embargo, los cálculos realizados indican que la masa de este objeto les mayor que  $10 M_{\odot}$ !

Para muchos astrónomos y físicos toda esta evidencia es contundente, y están convencidos de que en el Cisne se ha descubierto el primer hoyo negro. Para otros, sin embargo, la evidencia es convincente, mas no contundente.

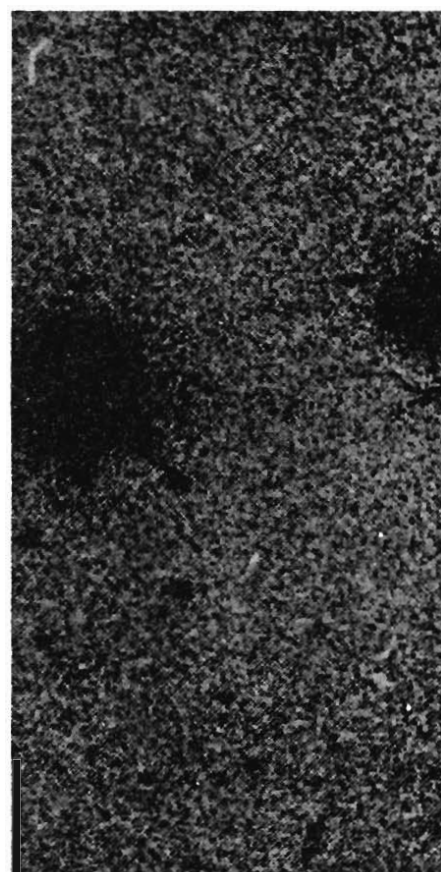
### Galaxias y agujeros negros

Las estrellas en el Universo se agrupan en grandes sistemas llamados galaxias. Nuestra galaxia, la Vía Láctea, tiene aproximadamente cien mil millones de estrellas y mide, en su máxima extensión, cien mil años luz aproximadamente un trillón de kilómetros. El Sol se encuentra cerca del borde de la galaxia a unos novecientos mil millones de kilómetros del centro de la galaxia.

Hasta hace relativamente poco, las galaxias se consideraban sistemas estables de estrellas, gas y polvo. Se creía que su apariencia podía cambiar debido solamente a la evolución estelar y la rotación galáctica. En los últimos diez años, ha llamado la atención el papel del núcleo galáctico, una pequeña región que, hoy en día, se considera como responsable de los fenómenos energéticos más espectaculares conocidos en el Universo.

El primer indicio de que los núcleos galácticos son escenarios de violenta actividad fue encontrado por Seyfert, quien descubrió, a mediados de los años cuarenta, un grupo de galaxias espirales con núcleos muy brillantes y líneas peculiares en sus espectros. Estas líneas no eran las líneas típicas que producen las estrellas, sino que son emitidas por una región gaseosa extendida a muy alta temperatura. Además las líneas eran muy anchas, lo que indicaba movimientos del gas con velocidades de varios miles de kilómetros por segundo.

La importancia de este descubrimiento no pudo apreciarse sino hasta unos diez años después, cuando se acumuló más evidencia de la actividad nuclear de la galaxia con el descubrimiento de las "radiogalaxias". Este tipo de galaxias emiten energía en ondas de radio con una gran potencia. En estos objetos, la radioemisión proviene de dos gigantes nubes de gas a temperaturas sumamente altas (plasma) situadas a ambos lados de una galaxia central. Estas nubes no son ópticamente visibles (emiten ondas de radio, pero no luz), aunque frecuentemente la galaxia central que originó estas nubes sí es visible. Las nubes de gas emisoras de radio tienen típicamente un diámetro de unos seiscientos



Al centro el cuasar 3C 273. La orientación del chorro es en la dirección Sur-Oeste. (Foto: Greenstein y Schmidt).

mil trillones de kilómetros y se encuentran a una distancia aproximada de un millón doscientos mil trillones de kilómetros de la galaxia central. La estructura de estos objetos sugirió, casi desde su descubrimiento, la idea de que las nubes de plasma se originan por la eyección de partículas llamadas relativistas (cuyas velocidades son cercanas a la de la luz) desde el núcleo de la galaxia, en direcciones opuestas y a lo largo del eje de rotación.

La primera evidencia inequívoca de este tipo de eyección nuclear la proporcionó el estudio de la galaxia M87. El chorro de plasma (~ treinta mil billones de kilómetros de largo) se origina claramente en un núcleo brillante de la galaxia y está casi alineado con el eje mayor de la galaxia.

Aunque la eyección de chorros de materia con altas energías desde el núcleo no es la única manifestación de actividad nuclear, es un aspecto muy importante que debe explicar un modelo teórico; más adelante, volveremos sobre este punto.

Poco a poco se fueron acumulando otras observaciones que indicaban la existencia de potentes fuentes de energía en el núcleo de muchas galaxias,

pero la magnitud a la que podía llegar este fenómeno se presentó en toda su plenitud a principios de los años 60 con el descubrimiento de los *cuasares*.

Los cuasares son los objetos extragalácticos (fuera de nuestra galaxia) más lejanos que se conocen. Su apariencia es estelar (se ven como estrellas azules en placas fotográficas), y tienen una emisión de energía en el óptico de cien veces la energía emitida por toda una galaxia gigante. Esta energía, sin embargo, proviene de una región de dimensiones comparables a las de un núcleo galáctico o menos (unos cien mil millones de kilómetros). Aproximadamente un 10 por ciento son también potentes emisores de radio, y, de hecho, fue a partir de esta emisión como se descubrieron.

Uno de los primeros cuasares descubiertos fue el objeto llamado 3C 273, hasta la fecha el mejor estudiado por ser el de mayor brillo aparente (de hecho, como veremos, es el cuasar más cercano a nosotros).

Mediante ocultaciones lunares se logró separar la estructura de la emisión de radio frecuencia en dos componentes separadas unos 20 segundos de arco entre sí. Cuando la fuente de radio pudo ser identificada ópticamente, se encontró que una de las componentes correspondía, en posición, a lo que parecía una estrella azul, mientras que la otra, a un chorro de materia visiblemente ligado a la "estrella".

Sin embargo, la naturaleza verdaderamente extraordinaria de este objeto la reveló su espectro (ver pie de página en el inciso anterior). En apariencia, el espectro era similar al de las galaxias Seyfert y las radiogalaxias. M. Schmidt logró identificar líneas de hidrógeno con un corrimiento al rojo muy grande. Este corrimiento, interpretado en términos del efecto Doppler (ver explicación en pie de página del inciso anterior), implica que la fuente tiene una velocidad de recesión (alejamiento)—debida a la expansión del Universo de 0.15 c (c es la velocidad de la luz).

Hubble descubrió una relación entre la velocidad de recesión y la distancia, que se conoce como la ley de Hubble. En primera aproximación, esta ley es  $v = Hr$  (H es la llamada constante de Hubble, y r es la distancia de nosotros al objeto que se aleja). Usando esta aproximación se obtiene una distancia de unos 2,500 millones de años luz ( $2 \times 10^{22}$ , es decir, un dos seguido de 22 ceros, km) para el cuasar más cercano.

Muchos más cuasares se identificaron rápidamente (hoy en día se conocen aproximadamente 1,500), de los cuales 15 resultaron ser objetos del catálogo de objetos azules compactos elaborado por

Chavira e Iriarte a fines de los años cincuenta, usando una técnica fotográfica descubierta por Guillermo Haro. Estos 15 cuasares llevan el nombre del Observatorio de Tonantzintla.

Para explicar la generación de las enormes cantidades de energía en volúmenes tan compactos como sucede en los cuasares —y, aunque en menor escala, en los núcleos de muchas galaxias— los astrónomos Zeldovich, Novikov y Salpeter propusieron la idea, hacia 1964, de que en el centro de estos objetos se aloja un gigantesco agujero negro y que la energía se genera por acreción de materia que cae al agujero negro. Han pasado casi veinte años desde la formulación de esta teoría y, hasta ahora, todo parece indicar que es la mejor explicación.

Es importante aclarar que, a diferencia de la formación de un agujero negro por el colapso gravitacional de una estrella, (proceso que ha sido estudiado cuantitativamente), el proceso que puede dar lugar a la formación de un agujero negro supermasivo en el núcleo de una galaxia es un problema completamente abierto.

Aunque no se conoce el proceso mediante el cual se formaría este "super-agujero negro", es claro que cualquier opción alternativa que se ha considerado para generar energía de origen gravitacional conduce finalmente a la formación de un agujero negro y que, una vez formado, es la fuente de energía más eficiente posible. Por lo tanto, parece razonable suponer que el proceso que genera la energía de los cuasares y de los núcleos de muchas galaxias es la acreción de material a un agujero supermasivo ( $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$ , entre un millón y 10,000 millones de veces la masa del Sol), en el centro.

Por lo que se refiere al origen de los agujeros negros en el núcleo de las galaxias, existe una idea alternativa a la del colapso en el núcleo de la galaxia ya formada; esta idea es que dichos agujeros negros se formaron por inestabilidades del Universo en etapas muy tempranas, en etapas anteriores a la formación de las galaxias. En este esquema, las galaxias se formarían alrededor de los agujeros negros de origen primordial.

Independientemente de su origen, podemos partir del supuesto de que existe un agujero negro supermasivo en los núcleos de las galaxias activas (incluidos los cuasares). La siguiente consideración es el suministro de materia suficiente para generar energía por acreción, o, como se ha hecho costumbre decir, "el alimento del monstruo".

Esta materia puede provenir de varias fuentes (no excluyentes entre sí), principalmente:

- a) Gas de la parte de afuera de la galaxia, o extragaláctico que llega al núcleo debido a un choque o interacción con otra galaxia.
- b) Gas del núcleo.
- c) Gas de estrellas de la galaxia que van aventando masa como un "viento estelar".
- d) Estrellas del núcleo que se desintegran, se rompen por intensas fuerzas de marea cerca del agujero negro y caen a él.

También en este caso, como en el de los sistemas binarios, (ver sección anterior), el material (cualquiera que sea su origen, estrellas enteras, rotas o gas), debe formar un disco de acreción alrededor del agujero negro antes de caer. Y también en este caso, en este disco es donde se genera la enorme cantidad de energía que observamos. El disco, no es necesariamente delgado (aplanado), sino que puede tener un grosor considerable, entonces se forma una especie de vértice o cañón en la parte central (borde interior del disco) que canaliza el disparo (en la dirección perpendicular al plano del disco) de chorros de partículas muy energéticas que logran escapar de la caída al agujero negro y que dan lugar a los chorros de plasma de que hemos hablado al principio de este inciso.

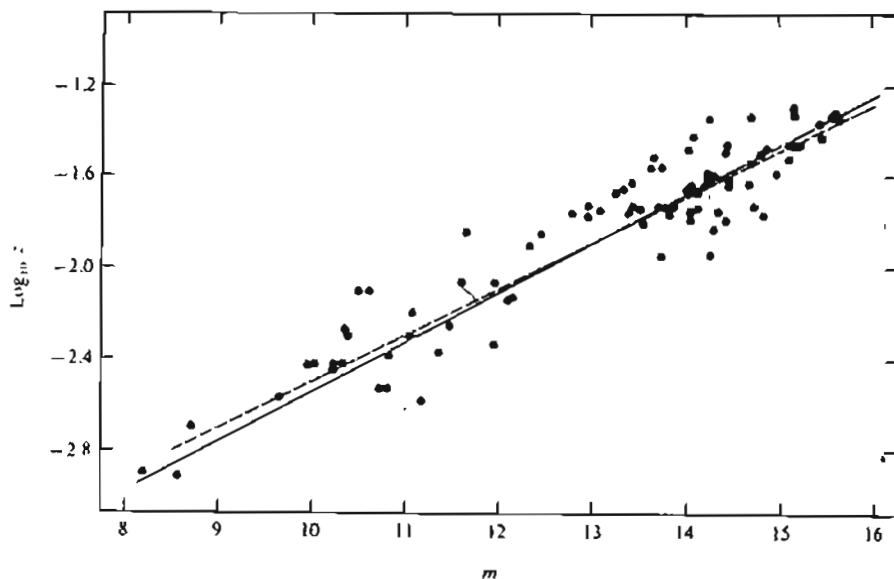
Una de las preguntas más interesantes que se plantean actualmente en astrofísica es la de si existe una relación evolutiva entre los cuasares (que por estar tan lejos también representan objetos que datan de épocas muy remotas en el tiempo) las radiogalaxias, otros tipos de galaxias con actividad en el núcleo (como las de Seyfert) y las galaxias "normales" (como la nuestra). ¿Todas las galaxias tuvieron alguna vez actividad en el núcleo? ¿Existe un enorme agujero negro en el centro de todas las galaxias (sólo que en alguna ya no hay acreción y por lo tanto la actividad disminuye o desaparece)? Esta es una cuestión a investigar en el futuro próximo.

#### Más lecturas sobre el tema

1. "Los Agujeros Negros, los Cuasares y el Universo", H. L. Shipman, editorial "Alhambra".
2. "Agujeros negros", Naturaleza Vol. 11 No. 6, 1980, S. Hacyan.
3. "Gravitación y muerte de estrellas", Ciencia y Desarrollo, Vol. enero-febrero 1984, D. Dultzim-Hacyan.
4. "Black Holes" Scientific American, diciembre 1974, K. Thorne.

# Después de la Gran Explosión

RODRIGO HUERTA



Gráfica del corrimiento hacia el rojo contra la magnitud absoluta de galaxias del tipo ScI a distancias mayores de 70 Mpc. La línea punteada es la predicción teórica y la continua es el mejor ajuste a los datos. La magnitud  $d, m$ , es proporcional a la distancia a que se encuentran las galaxias. El corrimiento hacia el rojo,  $z$ , es proporcional a la velocidad con que se alejan de nosotros. De la gráfica podemos observar que a mayor distancia mayor es la velocidad con que residen las galaxias.

## 1. Introducción

El estudio del mundo que nos rodea nos lleva inmediatamente a formular un modelo del origen del universo. Las observaciones astronómicas realizadas durante el transcurso de este siglo han llevado a la gente que estudia los diferentes modelos cosmológicos, a pensar en que hubo alguna vez en el pasado una gran explosión. Por otro lado, el estudio de la estructura de la materia nos ha llevado a reconocer en el micromundo una multitud de partículas con diferentes propiedades. Sin embargo, sólo existen cuatro tipos distintos de interacción entre ellas. Dos de ellas, de largo alcance, tenemos oportunidad de reconocer en nuestra vida diaria: la gravitacional y la electromagnética. Las otras dos son de corto alcance, es decir, sólo se manifiestan a escala subatómica: la débil y la fuerte. En este artículo se intenta abordar la relación que existe entre estos dos campos del conocimiento humano: la Cosmología y la Física de Partículas Elementales.

## 2. El Universo se está expandiendo

Los primeros datos tomados por Slipher en 1912 indicaban que las galaxias observadas se alejaban de nosotros, es decir, de nuestra galaxia, la Vía Láctea.

En 1929 Hubble publicó un trabajo en donde encontraba una relación para las velocidades de las galaxias y su distancia, esta es,

$$v = H\ell \quad (1)$$

donde  $H$ , la constante de Hubble, la estimaba del orden de  $500 \text{ Km Seg}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . El valor moderno de la constante de Hubble es diez veces menor que éste. El hecho de que  $H$  sea positivo indica que el universo se está expandiendo. La ley de Hubble también nos indica que entre más alejada esté una galaxia de nosotros más grande va a ser la velocidad con que se aleje.

Unos años antes, en 1922, Friedmann había elaborado los modelos cosmológicos que se ajustaban a los datos obtenidos por Hubble. Años después (1927) Lemaitre, encontraba las mismas ecuaciones, en coordenadas esféricas, éstas son

$$ds^2 = dt^2 - \frac{R(t)^2 dr^2}{1 - kr^2} - R(t)^2 r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \quad (2)$$

donde  $k$  es una constante y  $R(t)$  es el parámetro de expansión del universo. La otra ecuación es la conservación de la energía,

$$\frac{d\rho}{dt} + 3(\rho + p) \frac{\dot{R}}{R} = 0 \quad (3)$$

donde  $\rho$  es la densidad de masa, (incluye la masa equivalente de cualquier forma de energía, como la electromagnética, por ejemplo), y  $3p \frac{\dot{R}}{R}$  representa el tra-

[1] Mpc es la unidad de distancia astronómica. Equivale a un millón de parsecs. Un parsec es igual a 3.26 años luz ó  $3.086 \times 10^{18} \text{ cm}$ . Entonces  $1 \text{ Mpc} = 3.086 \times 10^{24} \text{ cm}$ .

bajo hecho por unidad de volumen en contra de la presión  $P$  del fluido.

En 1935 Robertson y Walker independientemente demostraron que cualquier modelo del universo que fuera homogéneo (cualquier punto es equivalente a otro) e isotrópico (cualquier dirección es equivalente a otra) basado en la geometría Riemanniana tiene como elemento de línea a la ecuación (2).

Existe una conexión directa entre la ley de Hubble y la métrica de Robertson y Walker. Si consideramos que dos puntos (eventos) están separados por las condiciones  $dr > 0$  y  $dt = d\theta = d\phi = 0$  entonces la distancia propia entre los dos puntos es  $d\ell = Rdr\sqrt{1 - kr^2} - \frac{1}{2}$  que se obtienen de la ecuación (2). Si la distancia  $r$  entre estos dos puntos en un sistema acompañante <sup>2</sup> se escoge arbitrariamente pequeña en cierto sistema de unidades entonces.

$$\ell(t) \sim R(t)r \quad (4)$$

La velocidad de separación entre estos dos puntos será ( $r$  es fija en el sistema acompañante)

$$v = \frac{d\ell}{dt} = \frac{dR}{dt} r = \frac{dR}{dt} \frac{1}{R} \ell = H\ell \quad (5)$$

entonces

$$H = \frac{\dot{R}}{R} \quad (6)$$

La expansión del universo se puede visualizar como la expansión de un globo que tiene dibujadas las galaxias en su superficie.

A pesar de la evidencia astronómica basada en la observancia de la recesión de las galaxias, no fue sino hasta 1965, cuando Penzias y Wilson descubrieron la radiación de fondo a  $3^\circ\text{K}$ , que la gente empezó a aceptar la idea de que el universo estaba en expansión debido a una explosión muy grande. La evidencia vino después, que acabó de confirmar esta hipótesis.

### 3. Física de altas energías y el origen del Universo

De acuerdo con el estado actual del conocimiento de nuestro universo, hubo un tiempo en que éste estuvo a una temperatura muy grande, infinita en principio para  $t = 0$ . Dado que la temperatura actual es del orden de cero grados Kelvin es obvio que el universo se fue

enfriando después del gran estallido. La ley de enfriamiento se puede obtener de los modelos de Friedmann. Estos incluyen las ecuaciones (2) y (3) junto con la ecuación de Einstein y la ecuación de estado del fluido. De la ecuación (2) se puede obtener la forma de la ecuación de Einstein para la métrica de Robertson y Walker, ésta es,

$$\ddot{R} = \frac{8\pi}{3} \rho R^2 \quad (7)$$

donde se ha puesto  $\Lambda = 0$  (cero constante cosmológica) y  $G = 1$  (unidades gravitacionales).

La ecuación de estado de un gas relativista es,

$$p = \frac{1}{3} \rho \quad (8)$$

Sustituyendo la ec. (8) en la ec. (3) tenemos,

$$\dot{\rho} + 4\rho \frac{\dot{R}}{R} = 0 \quad (9)$$

De las ecs. (7) y (9), obtenemos,

$$\dot{\rho} = -4 \left( \frac{8\pi}{3} \rho \right)^{1/2} \rho^{3/2} \quad (10)$$

que integrando se tiene

$$t = \left( \frac{3}{32\pi\rho} \right)^{1/2} + t_0 \quad (11)$$

despejando para  $\rho$  tenemos

$$\rho = \frac{3}{32\pi} \frac{1}{(t - t_0)^2} \sim \frac{1}{t^2} \quad (12)$$

Lo que nos indica la ecuación (12) es que la densidad de materia en el universo ha ido disminuyendo con el tiempo.

Podemos ajustar nuestra escala de tiempo y poner  $t_0 = 0$  en la ec. (12).

Si consideramos un gas de partículas relativistas entonces la densidad de energía en términos de la temperatura, viene dada como

$$\rho = \frac{\pi^2 N}{30} T^4 \quad (13)$$

donde  $N$  es el número de grados de libertad para dicho gas.

De las ecuaciones (12) y (13) obtenemos

$$T = \left( \frac{45}{16\pi^3 N} \right)^{1/4} t^{-1/2} \quad (14)$$

La temperatura ha ido bajando con el tiempo de acuerdo a la ecuación (14).

La temperatura del gas relativista es

proporcional a la energía cinética de las partículas  $E = p \sim T$ . Debido a que la expansión del universo tuvo una singularidad en  $t = 0$ , la energía se vuelve infinita en este instante. Conforme el universo empieza a expandirse,  $t > 0$ , el universo empieza a enfriarse y la energía de las partículas a bajar. Sin embargo, la energía alcanzada por el gas de partículas es mucho mayor que cualquier energía alcanzada en laboratorios terrestres. Este hecho hace que el origen del universo sea considerado como el acelerador de partículas más grande jamás construido. He aquí la conexión entre el campo de las partículas elementales y la cosmología.

### 4. Epocas del Universo

Hemos visto que de acuerdo al modelo estándar cosmológico el universo estuvo a una temperatura muy alta en sus principios y poco a poco se fue enfriando. Podemos recorrer mentalmente la historia del universo en sentido inverso a partir de este momento. Si aumentáramos la temperatura de la materia que nos rodea, ésta empezaría a pasar por los distintos estados que conocemos: sólido, líquido, gaseoso y finalmente los átomos se desprenderían de sus electrones (cuando la temperatura superara la energía de ionización) formando el estado de plasma. Aumentemos aún más la temperatura. Empezarían a aparecer en nuestro plasma partículas pesadas que anteriormente no había, debido a que sus masas eran lo suficientemente grandes como para ser producidas. También descubriríamos que las interacciones con que habíamos empezado (principalmente electromagnéticas) no son todas las que actúan en el plasma. Esto se debe a que existen interacciones de corto alcance (es decir, que actúan a distancias muy pequeñas, la débil y la fuerte son ejemplos de estas interacciones) que sólo muestran sus efectos a distancias muy pequeñas o lo que es lo mismo a energías muy grandes ( $E \sim \frac{1}{\ell}$ ). Por lo tanto

nuestro sistema se iría transformando de acuerdo al grado de temperatura en el mismo. Esto conduciría a tener distintas épocas de acuerdo con el tipo de interacción o interacciones reinantes y las partículas presentes en el plasma. Haciendo el recorrido normal, es decir, empezando en  $t = 0$ , observaríamos dos causas por las cuales las partículas presentes en un tiempo dado dejaron de existir en equilibrio con el plasma. La primera y la más natural, sería debido a que la temperatura del plasma fuera menor que la masa de la partícula. En este caso si las partículas son estables entonces

[2] Un sistema acompañante es aquel en el cual las galaxias están en reposo unas con respecto a las otras.

TABLA DEL ORIGEN DEL UNIVERSO\*

| Tiempo             | Temperatura*  | Suceso                                                                     | Observable                                         |
|--------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| ?                  | ?             | Dominio de la gravedad cuántica                                            | ?                                                  |
| $10^{-43}$ seg     | $10^{19}$ Gev | Tiempo de Planck. Desacoplamiento de los gravitones                        | Homogeneidad e isotropía                           |
| $10^{-35}$ seg     | $10^{15}$ Gev | Desacoplamiento de la interacción de gran unificación                      | Proporción de materia-radiación ( $n_B/n_\gamma$ ) |
| $10^{-6}$ seg      | 200 Mev       | Transición de quarks a hadrones. Confinamiento de quarks                   | Hadrones (p, n, $\pi$ , k, ...)                    |
| 1 seg              | 1 Mev         | Desacoplamiento de las interacciones débiles y por tanto de los neutrinos. | Proporción de neutrones a protones (n/p)           |
| 3 min.             | $10^9$ °K     | Nucleosíntesis                                                             | H, D, He <sup>4</sup> , Li <sup>7</sup> , etc.     |
| $10^5$ años        | $10^5$ °K     | Desacoplamiento de los fotones                                             | Radiación de fondo de 3°K                          |
| $10^7 - 10^8$ años |               | Formación de estrellas y galaxias. Síntesis de elementos pesados.          |                                                    |

\* 1 Gev =  $10^3$  Mev =  $10^{13}$  °K

+ Tabla sacada de D.N. Schramm, Enrico Fermi Inst. Preprint 81-03

ces su número sería igual al número de partículas existentes en el momento en que se fueron fuera de equilibrio, o como se suele decir, en el momento en que se desacoplaron.

La segunda causa y más general es debido a que la interacción de las partículas que se desacoplan se vuelve muy pequeña, es decir, las interacciones de corto alcance actúan en un rango de distancias que es menor al recorrido medio libre de las partículas. Visto de otra manera, podríamos evaluar la rapidez con que interactúan entre sí las partículas y compararla con la rapidez con que el universo se está expandiendo. Cuando la rapidez con que interactúan las partículas se vuelve menor que la rapidez de expansión, entonces se dice que las partículas se desacoplan del plasma. Entonces la condición de desacoplamiento sería

$$\Gamma_{\text{int}} \leq \Gamma_{\text{exp.}} \quad (15)$$

La rapidez de expansión del universo

vendría dada por  $\frac{\dot{R}}{R}$ . Entonces de la ecuación (7), tendríamos

$$\Gamma_{\text{exp}} = \frac{\dot{R}}{R} = \left( \frac{8\pi}{3} \rho G \right)^{1/2} \quad (16)$$

donde hemos puesto G distinto de uno.

La rapidez de interacción entre las partículas es proporcional a la sección eficaz de dispersión,

$$\Gamma_{\text{int}} = n \sigma v \quad (17)$$

donde n es la densidad de partículas y v su velocidad.

Calculemos como ejemplo la temperatura a la cual los neutrinos se desacoplan. La sección eficaz de los neutrinos es proporcional a  $G_F^2 T^2$ ,  $G_F$  es la constante de Fermi para las interacciones débiles y T representa la energía. Debido a que los neutrinos tienen masa cero o casi cero, entonces  $v = c$  y por último la densidad de neutrinos es proporcional a

$T^3$ . Por lo tanto para los neutrinos, con  $\rho = \pi^2/30 T^4$ , la condición (15) es

$$T^3 \cdot G_F T^2 c \leq \left( \frac{8\pi}{3} T^4 G \right)^{1/2} \quad (18)$$

Resolviendo para T encontramos que la temperatura a la cual los neutrinos se desacoplan del plasma es del orden de  $10^{10}$ °K.

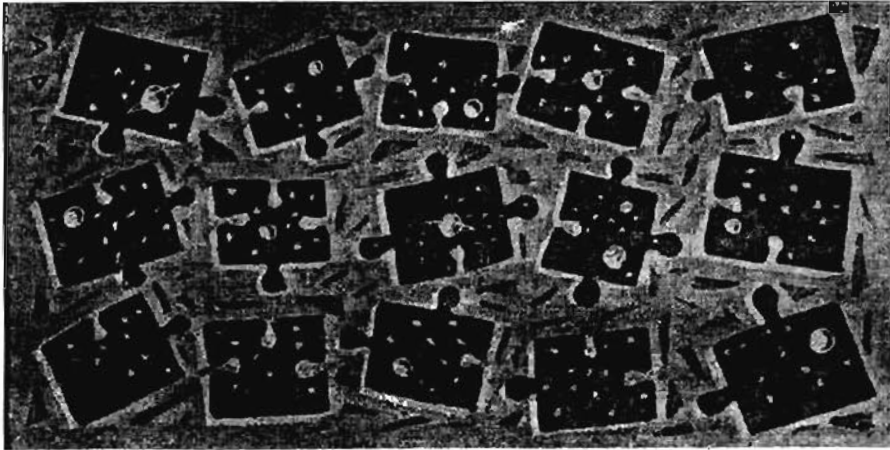
Vemos pues que de acuerdo con el tipo de interacción que predomine tendremos diferentes épocas en el universo dependiendo de cuáles son las partículas que juegan un papel más importante en el plasma primordial.

#### Bibliografía

- Physical Cosmology por P.J.E. Peebles Princeton University Press, 1971.
- An Introduction to General Relativity por S. K. Bose, John Wiley, 1980.

# ¿Como se formó el Mundo?\*

EDWARD P. TRYON



El vacío más perfecto permitido por la teoría cuántica no es completamente vacío e inmutable. Nuestro Universo puede haber comenzado como una fluctuación del vacío la cual entonces se "infló" para hacer al Universo del tamaño que lo vemos hoy.

El título de este artículo fue la forma en que mi hija preguntó la cuestión más fundamental de la naturaleza: ¿de dónde proviene todo? Hoy, la respuesta científica se expresa usualmente en términos de la cosmología de la gran explosión. Las preguntas se convierten en: ¿Cuál fue el origen de la materia primitiva y qué causó la erupción de la materia en la gran explosión?

En 1973, propuse que nuestro Universo había sido creado espontáneamente de la nada (*ex nihilo*)<sup>1</sup>, como resultado de principios establecidos de la física. Esta propuesta le pareció a la gente absurda, encantadora, o ambas cosas.

La novedad de una teoría científica de creación *ex nihilo* es evidente, ya que la ciencia nos ha enseñado que uno no puede hacer algo a partir de nada. Este enunciado coloquial de principio científico, sin embargo, merece escrutinio ya que la ciencia es notoriamente precisa, y las nociones de "algo" y "nada" pueden guardar sorpresas.

La ciencia ha identificado gradualmente varios aspectos de los sistemas

físicos que pueden ser cuantificados en formas simples y los cuales son "conservados", esto es, mantienen el mismo valor neto durante cualquier proceso físico. Ejemplos familiares son la energía, el momento lineal y el angular y la carga eléctrica. Otros ejemplos más abstrusos se encuentran en el campo de la física de partículas elementales, en donde un experimento típico involucra el acelerar un haz de protones o de electrones a una velocidad cercana a la de la luz, hacer chocar el haz contra un blanco compuesto de casi cualquier cosa y observar que pasa. Uno de los resultados más interesantes de tales colisiones es la creación de partículas que no estaban antes: algo de la energía cinética del haz incidente sufre una conversión en la masa de las partículas creadas, de acuerdo con la relación de Einstein  $E = mc^2$ . La masa y la energía no se conservan separadamente, aunque la masa-energía total sí. En todas las colisiones observadas, tales eventos de creación han mostrado regularidades que pueden codificarse como leyes de conservación. Las cantidades conservadas incluyen una entidad llamada "número bariónico", el cual tiene un valor  $+1$  para protones y neutrones y  $-1$  para antiprotones y antineutrones. La conservación del número bariónico significa que, cuando se crean partículas, se crea materia y antimateria en igual cantidad.

Para basar la factibilidad de crear un universo como el nuestro de nada, uno debe determinar el valor neto que tiene nuestro Universo de cada una de las cantidades conservadas conocidas. Para ser breve, me restringiré la atención aquí a las cantidades antes enumeradas, las cuales ilustran los rasgos esenciales. Las mediciones precisas de las propiedades cósmicas están más allá de nuestros medios, pero es eminentemente consistente con las observaciones el decir que nuestro Universo tiene valores netos de la carga eléctrica, del momento lineal y del momento angular iguales a cero. El número bariónico es más problemático: si se conservara, como se creía generalmente en 1973, entonces un universo creado de la nada contendrá cantidades iguales

\* Tomado de *News Scientist*.

<sup>1</sup> Del latín nihil, nada (N. de T.).

de materia y antimateria. Por lo tanto la conjetura original de creación *ex nihilo* predecía que nuestro Universo contiene igual número de galaxias de materia y de antimateria. No había evidencia empírica sobre galaxias de antimateria en 1973, pero las investigaciones no eran aún definitivas. La posibilidad permanecía abierta. Llegamos finalmente a la conservación de la energía, la cual parecería haber evitado la creación de nuestro Universo de la nada. Hemos aprendido de Einstein que la materia es una forma de energía y nuestro Universo contiene una cantidad enorme de materia. Existe, sin embargo otra forma de energía de importancia central en cosmología, a saber la energía potencial gravitacional.

Dado que la gravedad es una fuerza universalmente atractiva, la energía potencial asociada con ella se acostumbra considerarla de signo negativo. ¿Podría la energía gravitacional negativa de todo el Universo cancelar la masa-energía positiva de las galaxias, dando una energía neta cero para el Universo como un todo? Para reforzar esta idea, debemos considerar la estructura a gran escala del Universo en que vivimos.

Como es costumbre, suponemos que el Universo es isótropo (igual en todas direcciones) y homogéneo (igual en todas partes), en cuyo caso no tiene centro ni bordes. Las galaxias distantes se alejan unas de otras. Vista desde cualquier galaxia típica, incluyendo la nuestra, la velocidad de recesión de otra galaxia típica está relacionada con la distancia  $d$  por  $v = Hd$ , donde  $H$  es la constante de Hubble. El tiempo requerido para que una galaxia haya alcanzado su distancia actual a nosotros es  $T = d/v$ , suponiendo que su velocidad ha sido siempre la misma. (Esta es una aproximación, pero servirá para continuar). La relación de Hubble entre  $d$  y  $v$  da entonces el "tiempo de Hubble"  $T = 1/H = 15 \times 10^9$  años, una estimación de la edad del Universo.

En el marco de la relatividad general —la mejor teoría del Universo que tenemos— hay tres posibilidades.

El Universo puede ser "cerrado" y finito. En términos de la ecuación de Einstein, el espacio se curva sobre sí mismo, como la curvatura que "cierra" la superficie de una esfera. En términos cotidianos, en un Universo cerrado, la atracción gravitacional entre todas las galaxias es suficientemente fuerte para invertir la expansión inicial. La "gran explosión" culmina en un "gran crujido". El Universo puede ser "abierto" e infinito (el espacio se curva, pero no se cierra sobre sí mismo). En un Universo abierto, la fuerza de gravedad es demasiado débil para detener la expansión inicial.

El Universo puede ser "plano" e infinito (no hay curvatura del espacio, de ahí el nombre "plano"). Un Universo plano se expande por siempre, pero menos rápidamente que en el caso abierto.

Los tres tipos de universo difieren en el efecto final de la gravedad sobre la expansión inicial. Ya que la masa es fundamentalmente la fuente de la gravedad, el destino de nuestro Universo está gobernado por la relación entre la densidad promedio de materia y una "densidad crítica",  $\rho_c$ . La densidad crítica depende de la rapidez actual de expansión, la cual está caracterizada por la constante de Hubble y de la constante gravitacional de Newton  $G$  (uno puede mostrar que  $\rho_c = 3H^2/8\pi G$ ). Si  $\rho$  es mayor que  $\rho_c$ , el universo es cerrado; si  $\rho$  es menor que  $\rho_c$ , el universo es abierto; y si  $\rho = \rho_c$  el universo es plano.

El valor numérico de  $\rho_c$  es alrededor de  $8 \times 10^{-30} \text{ gr/cm}^3$ . La densidad real no se conoce bien, pero la masa detectada hasta ahora comprende un 10 por ciento de la densidad crítica, y puede quedar más por hallarse. Es una de las características más notables de nuestro Universo el que su densidad sea tan cercana a la densidad crítica.

Así, ¿cuánta energía gravitacional contiene el Universo? En la teoría Newtoniana, la energía gravitacional  $E_g$  de dos masas  $m$  y  $M$  separadas por una distancia  $r$  está dada por  $E_g = -GmM/r$ . Si  $m$  denota la masa de cualquier objeto familiar, por ejemplo la tierra, necesitamos elegir  $M$  y  $r$  para referirlos al resto del Universo en algún sentido apropiado.

El "radio de Hubble"  $R$  del Universo es la distancia que la luz podría haber viajado a una velocidad  $c$  durante el tiempo de Hubble, desde el inicio del Universo:  $R = cT \cong 15 \times 10^9$  años luz. La fuerza de gravedad se propaga a la velocidad de la luz, por lo que solamente las galaxias dentro de una esfera de radio de Hubble han tenido tiempo para interactuar con la tierra. Si tomamos  $M$  como la masa dentro de la esfera, suponiendo que el espacio contiene la densidad de materia crítica, y aproximando la distancia promedio a la materia en esa esfera por la mitad del radio de Hubble, entonces la fórmula Newtoniana da  $E_g = -mc^2$ . Así emerge un hecho notable: si el espacio contiene la densidad de materia crítica, entonces una estimación simple e ingenua indica que la energía gravitacional cósmica es suficiente para cancelar la masa-energía  $mc^2$  de la Tierra y, por analogía, de cualquier otro objeto.

El análisis precedente no es riguroso, ni puede hacerse que lo sea: la energía neta de un universo resiste una definición precisa. Tenemos sin embargo una fuer-

te indicación de que un universo cerrado, al menos, podría ser creado de la nada. Solamente los modelos de Universo cerrado contienen una cantidad finita de materia, y los procesos físicos tienden a resultar en sistemas finitos. Por tanto mi propuesta de creación *ex nihilo* estaba acompañada de una predicción de que nuestro Universo es finito y por consiguiente "cerrado".

Si se admite que nuestro Universo tiene valores netos iguales a cero para todas las cantidades conservadas, la cuestión persiste: ¿qué podría haber causado la creación del Universo? Una respuesta plausible para esta pregunta de la "primera causa" es provista por la teoría cuántica del campo, la cual describe (con gran éxito) la creación, aniquilación e interacciones mutuas de las partículas elementales. Puesto que es una teoría cuántica, existen incertidumbres intrínsecas en los fenómenos que describe. Entre otras cosas, el número de partículas presente en cualquier instante y/o lugar es incierto, estando sujeto a "fluctuaciones cuánticas" espontáneas. El Vacío más perfecto permitido por la teoría no es completamente vacío e inmutable, sino más bien una etapa para la creación espontánea de pares partícula/antipartícula.

En circunstancias normales, tales pares desaparecen después de un tiempo sumamente breve: su persistencia violaría la conservación de la energía (la cual se cumple en tiempos macroscópicos en la teoría cuántica, pero puede ser violada por duraciones microscópicas debido a una relación de incertidumbre tiempo-energía). Pero si hubiera una fluctuación cuántica espontánea dando un sistema con energía neta cero, ese sistema podría persistir para siempre. En principio, no hay límite a qué tan grande podría ser tal fluctuación. Así yo conjeturé que nuestro Universo tenía su origen físico como una fluctuación cuántica de algún verdadero vacío preexistente. Así se encontraban las cosas cuando mi propuesta de creación *ex nihilo* fue publicada en *Nature* en Diciembre de 1973.

### Dificultades y su solución

Inmediatamente, la conjetura se encontró con dificultades. Se montaron búsquedas de galaxias de antimateria mediante instrumentos llevados por cohetes por encima de la atmósfera terrestre, desde donde deberían ser fáciles de detectar: pero ninguna se encontró. Emergió un consenso de que nuestro Universo es burdamente asimétrico entre materia y antimateria, en aparente contradicción con la creación *ex nihilo*. También

nuevas estimaciones de la densidad de la materia, junto con reinterpretaciones de los datos sobre la rapidez con que se reduce la expansión cósmica, llevaron a la difundida (aunque corta de consenso) creencia que nuestro Universo es abierto e infinito. Esto parecía conformar otra refutación a la propuesta.

Había también dificultades teóricas.

¿Porque es nuestro Universo tan grande y longevo? Uno esperaría que las fluctuaciones cuánticas produjeran muchos más universos pequeños que grandes, así que ¿qué explicación hay para el "tamaño innecesariamente grande" del nuestro?

¿Porqué es el Universo isótropo y homogéneo? La conjetura de la creación *ex nihilo* provee una explicación parcial ya que si la creación fuera un resultado de una ley física, la (supuesta) universalidad de la ley física debería resultar en fuertes similitudes entre todas las regiones del cosmos. Esta explicación es insuficiente, sin embargo: la conjetura parece permitir universos con rapidez de expansión arbitrarias, y no es claro porqué un universo no podría estar expandiéndose más rápidamente en algunas regiones que en otras, violando la isotropía y la homogeneidad.

El modelo de la "gran explosión caliente" ha estado con nosotros tanto tiempo que damos por supuesto la existencia de temperaturas muy altas en el Universo temprano. Sin embargo, las soluciones cósmicas de la relatividad general permiten la expansión sin un movimiento local azaroso; un universo en expansión puede tener temperatura cero. Por lo tanto, ¿por qué fue caliente el Universo temprano?

Finalmente, ¿cómo llegó el Universo temprano a estar en un estado de rápida expansión? La expansión temprana no fue un resultado de la alta temperatura, ya que uno puede mostrar que un universo nacido caliente pero inicialmente estacionario comenzaría inmediatamente a contraerse bajo la fuerza de la gravedad.

Hasta hace poco, estas preguntas no respondidas parecían dejar la creación *ex nihilo* sin una base segura. Durante los pasados cinco años, sin embargo, han emergido resoluciones plausibles de todas estas dificultades, comenzando con la ausencia de galaxias de antimateria.

Inspirados por el éxito en la unificación de la interacción electromagnética y la débil en una sola teoría "electrodébil", un número de teorías han considerado "teorías de la gran unificación" (o "TGU's") las cuales combi-



Edwin Hubble midió la velocidad a la cual se expande el Universo.

nan la interacción electrodébil y la fuerte (nuclear). Muchas de estas teorías han sido propuestas a partir de la primera en 1974, y actualmente se gasta mucho esfuerzo para ver cual (si alguna) de ellas es concreta. Un rasgo notable de tales TGU's es que el número bariónico no se conserva estrictamente: la aparente simetría entre materia y antimateria se rompe dramáticamente a energías muy altas o, equivalentemente, a temperaturas muy altas.

Una consecuencia interesante de las TGU's es que la preponderancia observada de la materia sobre la antimateria podría haber surgido a partir de condiciones inicialmente simétricas a tiempos muy tempranos ( $10^{-35}$  segundos después de la gran explosión), cuando la temperatura era muy alta.

El camino está abierto para que los universos comiencen simétricos pero desarrollen muy rápidamente asimetrías materia/antimateria. Respecto a las posibilidades de que nuestro Universo sea abierto, la creencia en un universo abierto se ha desgastado. Existe una consideración renovada acerca de la dificultad de determinar si nuestro Universo es abierto, cerrado o plano.

Las dificultades restantes han hallado soluciones plausibles en los pasados tres años. En 1981, Alan Guth publicó una conjetura fascinante basada en una descripción de los primeros  $10^{-35}$  segundos en términos de TGU's. La esencia del "modelo inflacionario" de Guth es que el Universo sufrió una expansión extravagante durante ese breve periodo, debido a una extraña ecuación de estado para la materia en ese temprano periodo.

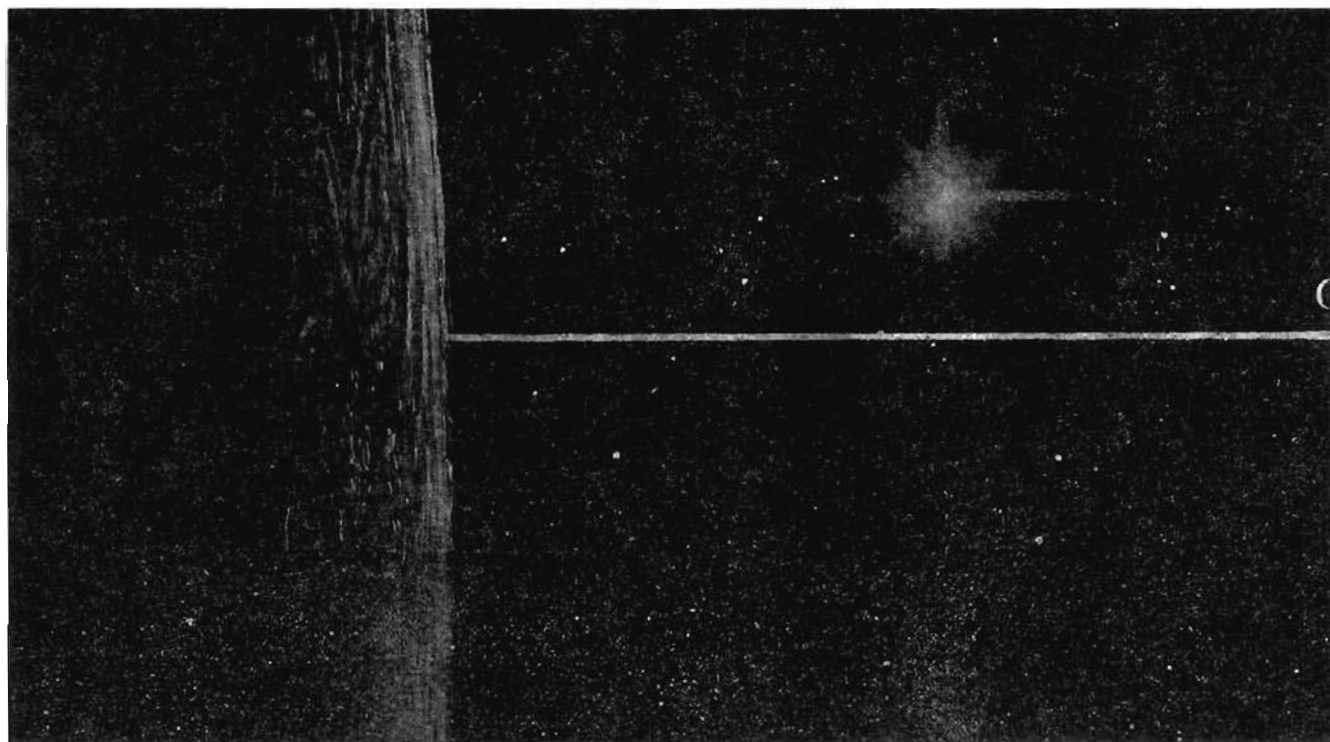
La fuerza gravitacional entre las galaxias está reduciendo la rapidez actual de expansión. Uno puede preguntar: ¿existe algún fenómeno natural que

aceleraría la rapidez de expansión, comportándose, en efecto, como una fuerza cósmica de repulsión o "antigravedad"? Dentro del contexto de la relatividad general, la respuesta es sí, puesto que la materia puede exhibir la propiedad peculiar de una gran presión negativa.

En la relatividad general, la fuente neta de gravedad en un medio isótropo y homogéneo es  $\rho + 3P/c^2$ , donde  $\rho$  es la densidad de masa energía y  $P$  es la presión ejercida por el medio. En circunstancias familiares, la presión es positiva y su contribución a la gravedad es insignificante.

Para entender qué significa una presión negativa, notamos que la materia que ejerce una presión positiva tiene una tendencia innata a expandirse. Recíprocamente, la materia que ejerza una presión negativa tendría una tendencia innata a contraerse (por ejemplo, el hule que abarca una pelota sólida cuya superficie ha sido estirada hacia afuera en todas direcciones). Si la presión fuera negativa y suficientemente grande, entonces  $\rho + 3P/c^2$  sería negativa, y entonces la gravedad se comportaría en una forma perversa: ejercería una fuerza repulsiva.

Todas las TGU's tienen una importante entidad llamada campo de Higgs (en honor de Peter Higgs de la Universidad de Edimburgo). Los campos, por naturaleza, tienen algún valor en todos los puntos del espacio. En la mayoría de las teorías, un campo cuyo valor es cero en alguna región no tiene consecuencias ahí: un campo nulo usualmente tiene valores nulos para todas



las cantidades físicas. Un campo de Higgs, sin embargo, tiene la notable propiedad que posee una cantidad definida, positiva de masa-energía  $\rho_H$  en cada unidad de volumen que ocupa. Por lo tanto uno tendría que hacer trabajo para incrementar el volumen del espacio dentro del cual el campo de Higgs es cero, ya que la energía de un campo de Higgs nulo es proporcional al volumen que ocupa. Recíprocamente, cualquier volumen tal de espacio tendría una tendencia innata a la contracción, ya que se liberaría energía en el proceso.

Por lo tanto un campo de Higgs nulo ejerce una presión negativa  $P_H$ , y uno puede mostrar que  $P_H = -\rho_H c^2$ .

En el modelo inflacionario, uno presume que el campo de Higgs ha sido cero durante un periodo muy temprano del tiempo cósmico, y se supone además que el campo nulo de Higgs ha dominado la masa-energía y la presión cósmicas durante parte de (o todo) ese periodo. Puesto que  $P_H = -\rho_H c^2$ , la fuente de gravedad cósmica era aproximadamente  $\rho_H + 3P_H/c^2 = -2\rho_H$ , una cantidad negativa cuyo efecto gravitacional fue la repulsión. El Universo respondió expandiéndose a una rapidez acelerada, y uno puede mostrar que su tamaño creció exponencialmente en el tiempo. El factor por el cual se expandió el Universo solamente puede ser estimado, pero parece razonable un factor de  $10^{29}$  o más durante este breve periodo ( $10^{-35}$  segundos) de crecimiento exponencial.

Un campo nulo de Higgs es inestable intrínsecamente, temiendo una tendencia innata a evolucionar hacia el valor que tiene la mínima energía (cero). Cambió a este valor cuando el Universo tenía alrededor de  $10^{-35}$  segundos, y su densidad de masa-energía fue convertida en la masa-energía de quarks (de los cuales están hechos los protones y los neutrones), electrones, etc., y sus correspondientes antipartículas. Esta conversión de energía de una forma a otra ocurrió en una forma caótica, así que se generó calor. La temperatura cósmica se incrementó dramáticamente. En la alta temperatura resultante, la naturaleza asimétrica de las TGU's resultó en que la materia llegó a ser preponderante sobre la antimateria. Subsecuentemente el Universo evolucionó de acuerdo con el modelo estándar de la gran explosión.

Si ocurrió la inflación cósmica, las preguntas planteadas anteriormente como desafíos a la creación *ex nihilo* encuentran fácil respuesta. El "tamaño innecesariamente grande" de nuestro Universo es un resultado de esa temprana inflación. Las fluctuaciones cuánticas originales crearon solamente un "universo microscópico" el cual, sin inflación, nunca hubiera alcanzado proporciones macroscópicas (mucho menos cósmicas). La inflación dio lugar a la rápida expansión, y convirtió el microcosmos inicial en un cosmos.

La isotropía y la homogeneidad son explicadas notando que el universo observable fue enormemente más peque-

ño en un tiempo temprano (anterior a la inflación) que lo que se había supuesto corrientemente. Las galaxias más distantes que vemos ahora a través de los telescopios más grandes estuvieron originalmente tan cercanas que hubo tiempo suficiente para alcanzar un equilibrio dinámico.

En el escenario original de Guth's el Universo comenzó con una gran explosión caliente (por razones no especificadas por él), y el campo de Higgs adquirió un valor nulo como resultado de estar en equilibrio térmico con la materia caliente y la radiación. Uno puede imaginar, sin embargo, que el microcosmos inicial nació con una temperatura y una velocidad de expansión modestas. En ausencia de inflación, habría colapsado rápidamente. Las fluctuaciones cuánticas habrían producido un microcosmos con un campo nulo de Higgs. Sin embargo, la inflación produjo entonces la expansión, y la conversión de la energía del campo de Higgs en materia caliente y radiación en un tiempo de  $10^{-35}$  segundos inició la "fase de la gran explosión caliente".

Así, la propuesta de creación *ex nihilo*, originalmente motivada por una simple estimación Newtoniana de la energía gravitacional y por los principios de la teoría cuántica del campo, permanece especulativa, pero aparece viable en detalle más bien notable.

# Notas sobre el Concepto de Espacio Absoluto: Newton y Einstein

ELIA NATHAN BRAVO

## PHILOSOPHIÆ NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA.

AUCTORE  
ISAACO NEWTONO, E. R. A. S.

Editio tertia aucta & emendata.

LONDINI:  
Apud GULIELMUM & JOHANNEM STAMMERS, Regii Societatis typographos.  
MDCCLXXVI.

In the original, the words and punctuation marks  
PHILOSOPHIÆ NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA were printed in red

Uno de los conceptos newtonianos más problemáticos es el de espacio (y tiempo) absoluto. En torno a él se han sostenido posiciones muy diversas y aún contradictorias. Así, frecuentemente se ha sostenido que el concepto de espacio absoluto no juega ningún papel dentro de la física matemática de Newton, y que su única función es metafísico-teológica, consistente en el intento de explicar cómo puede actuar Dios sobre los objetos materiales (18 pp. 201-3). Cabe destacar que esta posición descansa sobre el supuesto de que la filosofía y la ciencia, aún en la época de Newton, son empresas autónomas, que no influyen la una en la otra. Este supuesto es bastante explícito en la siguiente afirmación de Smart: "Newton sostuvo teorías absolu-

tas del espacio y el tiempo concepciones metafísicas que son estrictamente irrelevantes para su teoría dinámica. Lo que importa en la teoría dinámica no es la noción de espacio absoluto sino la de sistema inercial". Y como Mach y otros han mostrado, la noción de sistema inercial se puede analizar desde el punto de vista de una teoría relacional del espacio (17 p. 507). O sea, la noción operativa en la física newtoniana es la de sistema inercial, y ésta se puede interpretar filosóficamente apelando o bien a una teoría absolutista, o bien, a una teoría relacional del espacio, interpretación que no implica, en modo alguno, una alteración en la teoría física misma. Por otra parte, algunos autores han sostenido la posición contradictoria a la anterior, aunque mantienen el supuesto de la autonomía entre filosofía y ciencia. Así, Grünbaum sostiene que "aunque Newton (así como también sus amigos Clarke y Locke) estuvieron expuestos a las enseñanzas metafísicas de More, fue la fuerza de consideraciones puramente físicas lo que persuadió a Newton: él funda convincentemente su caso en la posibilidad de distinguir el movimiento absoluto del relativo mediante las 'propiedades, causas, y efectos' del primero" (7 p. 533). O sea, lo que este autor sostiene es que las razones de Newton para sostener que el espacio es absoluto son físicas y no metafísicas o teológicas, y por ende, la noción de espacio absoluto es puramente física. Finalmente, en esta discusión también nos encontramos en un término medio, el cual está representado por la posición de Koyré: "El descubrimiento newtoniano del carácter absoluto de la rotación —a diferencia de la traslación rectilínea— constituye una confirmación decisiva de su concepción de espacio; la hace accesible a nuestro conocimiento empírico, y sin quitarle su función y status metafísico, le asegura un rol y un lugar como un concepto fundamental de la ciencia". (10 p. 168). Así, una tercera posición consiste en considerar que el concepto newtoniano de espacio absolu-

to tiene a la vez una función metafísico-teológica y una función científica. A esta posición nos suscribimos, y uno de nuestros objetivos en este trabajo será el de mostrar la corrección de ella.

Considero que las razones primordiales por las cuales el concepto de espacio absoluto newtoniano ha admitido tan diversas interpretaciones son las siguientes tres:

1) No es claro, en modo alguno, cual es la función científica que desempeña el concepto de espacio absoluto. Esto se debe en parte a que hoy día no contamos con un catálogo lo suficientemente variado y preciso de las diversas funciones que pueden tener los conceptos científicos, y en parte porque el concepto de espacio absoluto cumple a la vez varias de estas funciones (p. ej. ya en las citas anteriores se ha relacionado a este concepto con el de movimiento absoluto de rotación y el de sistema inercial), y a veces, de manera implícita.

2) Como concepto filosófico tampoco es un concepto claro dado que hay diversas maneras de concebir a la filosofía. (a) A veces, la filosofía parece tan sólo ofrecer una interpretación de afirmaciones científicas y tal que no es estrictamente relevante a el contenido de la teoría en cuestión; así, la interpretación metafísico-teológica de Newton del espacio absoluto como atributo de Dios no es relevante a su mecánica en tanto que se puede dejar de lado esta interpretación filosófica sin que se altere el contenido (ie. las leyes) de su mecánica (como de hecho sucedió históricamente). (b) Otras veces, las tesis filosóficas son tales que dan lugar a (en el sentido de ser la motivación de y de avalar intelectualmente a) programas de investigación científica; por ejemplo, las tesis filosóficas relativas opuestas al espacio absoluto newtoniano, de Leibniz y Mach-Einstein están propuestas también como tesis susceptibles a la discusión empírica en tanto que alteran el contenido de la mecánica newtoniana, dando lugar a nuevos programas de investigación física. Finalmente, (c) a veces, si bien la filosofía interviene como interpretación de afirmaciones científicas, no relevante al contenido de la teoría (ie. que no altera las leyes de la teoría), no por ello deja de pertenecer a la teoría; dado que la función de dicha interpretación es la de aclarar o precisar conceptualmente el sentido de una afirmación científica. Así, la interpretación newtoniana de la rotación como un movimiento absoluto, o sea, como un movimiento que ocurre respecto del espacio vacío, es una interpretación filosófica que tiene por objeto aclarar o explicar conceptualmente en qué radica la diferencia entre la rotación

(o más generalmente, la aceleración), y el movimiento uniforme.

Destaquemos que las problemáticas (1) y (2) se deben al hecho de que el concepto de espacio absoluto es un concepto "altamente teórico" de la física, o sea, un concepto que no forma parte de ninguna ley de la teoría, pero que, sin embargo, contribuye a "darle sentido" o "especificar" a la teoría, y por lo cual su función científica no es muy clara, y también por la cual se relaciona fácilmente con tesis filosóficas, o sea, con cuestiones altamente racionales o conceptuales.

3) El término "absoluto", al igual que los términos relacionados con el de "relacional" y "relativo" tienen varios sentidos, que no siempre se han especificado, generando con ello confusión.

Lo que haré en este trabajo será tratar la problemática (1), o sea, trataré de aclarar cuales son las funciones científicas del concepto newtoniano de espacio absoluto dado que hoy día es la problemática menos aclarada; en cambio, la función metafísico-teológica ha sido mejor estudiada.<sup>1</sup> Para ello tomaré en cuenta tanto afirmaciones de Newton como a la teoría einsteniana de la relatividad (la cual nos permitirá sacar a luz ciertas funciones del concepto de espacio absoluto implícitas en la mecánica newtoniana). Igualmente, para aclarar dichas funciones será necesario especificar algunos de los distintos sentidos de "absoluto". Finalmente, destacaré qué de filosófico-científico tiene el concepto newtoniano de espacio absoluto en los lugares en que resulte relevante, sin tratarlo como un tema separado.

# I

Antes de estudiar las razones de Newton para postular un espacio absoluto, demos una breve caracterización de los principales conceptos de la discusión.

La tesis fundamental de una teoría *absolutista* del espacio (como la de Newton) es que el espacio es una entidad o substancia que existe por sí misma, independientemente de la existencia y propiedades de los objetos materiales. Aunque esta tesis es ontológica, se la puede especificar de la siguiente manera, y que la hace susceptible de ser discutida apelando a datos científicos: el decir que el espacio es una entidad es decir que el espacio tiene un conjunto de propiedades o una estructura propia, que es independiente de la existencia y propiedades de los objetos materiales (<sup>1</sup> Cv, nota a 36-48, p. 120; <sup>16</sup> p. 161). Entre las propiedades que se ha sostenido que tiene el espacio están, por ejemplo, propiedades electromagnéticas (como la de

que el espacio vacío es un mal conductor, su permeabilidad magnética es de  $4 \times 10^{-7}$  henrys por metro, etc.), propiedades dinámicas (como la de ser penetrable, ser incapaz de actuar, tener partes que no pueden ser separadas una de la otra por ningún tipo de fuerza, estar absolutamente fijo), propiedades geométricas (como la de ser infinito o finito continuo o no, la de ser curvo o plano, la de tener una métrica euclídea o no-euclídea, la de ser tri-dimensional, etc.) (<sup>87</sup> pp. 13-4). Finalmente, para una posición absolutista, si bien el espacio es independiente de los objetos materiales, guarda una relación con éstos: es la arena o contenidos en donde se encuentran localizados los cuerpos y en donde se mueven (ie. los cuerpos tienen una posición dada por ocupar un lugar particular en el espacio).

En oposición a la teoría absolutista, está la teoría *relacional* del espacio, para la cual el espacio no es más que el conjunto de relaciones espaciales que guardan entre sí los objetos materiales. En palabras de Leibniz:

Sostengo que el espacio es algo meramente relativo, como el tiempo; sostengo que es un orden de coexistencias, así como el tiempo es un orden de sucesiones. Pues el espacio denota, en términos de posibilidad, un orden de cosas que existen al mismo tiempo, consideradas como existiendo juntas; sin preguntarse acerca de su manera de existir. Y cuando muchas cosas son vistas juntas, uno percibe entre ellas ese orden de cosas. (<sup>1</sup> L. III., 4, p. 25-6).

Para una posición relacional, a diferencia de la absolutista, "cualesquiera enunciados que pretendan asignarle propiedad o propiedades al espacio se han de reconstruir como enunciados que asignan relaciones a pares o grupos de pedazos de materia". (<sup>8</sup> p. 5). Así, p. ej., el decir que el espacio existe es tan sólo decir que algo se encuentra a una cierta distancia de algo otro.

Destaquemos que el espacio del que se discute en la ciencia natural es el espacio físico, o sea, el espacio donde suceden los fenómenos naturales (<sup>9</sup> p. 128). El espacio físico no es el espacio perceptual (ie. visual, motor, factil), dado que éste es subjetivo. El espacio físico tampoco es el espacio que estudia la geometría dado que el espacio es abstracto o puramente conceptual y está definido de distintas maneras por los axiomas de las distintas geometrías. Dado que las teorías absolutistas y relacionales se debaten acerca del *status* ontológico del espacio real o existente, el debate

te es en torno al espacio físico, el cual es estudiado por la física.

Una de las razones fundamentales y obvias por las cuales la física requiere del concepto de espacio (y lugar) es porque el movimiento (que es el objeto de estudio de la física, o más precisamente, de la mecánica) ocurre en el espacio. Para precisar, con Descartes se explicitó el hecho de que para la física clásica por "movimiento" se entiende locomoción, o cambio de lugar. O sea, el movimiento no es un proceso interno a un cuerpo (como lo sería para Aristóteles), sino un cambio de relaciones espaciales. Por ello, el movimiento es siempre 'relativo': un cuerpo se mueve *en relación a*, o *con respecto a* un lugar, o a otros objetos que se consideran en reposo. Es crucial para nuestra discusión destacar que la afirmación de que el movimiento es 'relativo', no implica una teoría relacional del espacio, ni impide trazar una dis-

tinción, como lo hace Newton, entre movimiento absoluto y relativo (o más precisamente, relacional; empero, para conservar los términos clásicos, usaremos "relativo" sin comillas para referirnos al sentido newtoniano, que a continuación especificamos, y usaremos dicho término con comilla simple para referirnos al sentido especificado arriba, ie. "relativo" significa con respecto a). En efecto, un movimiento es absoluto cuando es con respecto a el espacio absoluto (ie. cuando el cuerpo cambia de lugar y por lugar se entiende un punto o posición en el espacio absoluto); y un movimiento es relativo cuando es con respecto a un marco de referencia *material*. Ahora bien, si todo movimiento fuese relativo (ie. un cambio de relaciones espaciales entre un cuerpo y un conjunto de cuerpos que se toman como marco de referencia material) entonces parecería que la teoría más adecuada del

espacio sería la relacional; en cambio, la creencia de que hay movimientos absolutos parecería implicar una teoría absolutista del espacio —"parecería" porque, como veremos, se pueden dar distintas definiciones de movimiento absoluto. En síntesis, y como primera aproximación, todo movimiento es 'relativo', pero podemos distinguir entre movimiento absoluto y relativo, y, correspondientemente, entre espacio absoluto y relativo.

Veamos ahora las razones explícitas que Newton dió para sostener la existencia del espacio absoluto. Como veremos, estas razones se fundan en los requerimientos conceptuales de una teoría del movimiento, ie. pertenecen al campo de los fundamentos conceptuales de la mecánica.

---

**El espacio relativo se caracteriza ontológicamente por ser un conjunto de relaciones espaciales determinadas por los objetos materiales**

---



En los *Principia* la noción de espacio absoluto aparece en el *Scholium* que sigue a las Definiciones y que antecede a los Axiomas o Leyes del Movimiento. Las tesis fundamentales que aparecen en el *Scholium* son las siguientes: 1) "El espacio absoluto (o verdadero o matemático) (cf. <sup>12</sup> Sch. I, p. 6), considerado en su propia naturaleza, sin relación a algo externo, permanece siempre similar e inmovible. El espacio relativo es alguna dimensión o medida movable del espacio absoluto; y que nuestros sentidos determinan por su posición respecto de los cuerpos". (<sup>12</sup> Sch. II, p. 6). O sea, por 'espacio absoluto' se entiende una entidad que tiene una existencia y un conjunto de propiedades (tales como la de permanecer similar e inmovible) propias, ie. que no dependen de la existencia y/o propiedades de otras entidades. En cambio el espacio relativo se caracteriza ontológicamente por ser un conjunto de relaciones espaciales determinadas por los objetos materiales; y dado que los objetos materiales pueden moverse (p.e. el conjunto de todos los cuerpos celestes podría moverse), el espacio determinado por ellos igualmente puede moverse. 2) El lugar es aquella parte del espacio que un cuerpo ocupa, y según sea el espacio, el lugar puede ser absoluto o relativo. (<sup>12</sup> Sch. III, p. 6). 3) El movimiento *absoluto* o *real* es la translación de un cuerpo de un lugar absoluto a otro, y el movimiento *relativo*, la translación de un lugar relativo a otro. (<sup>12</sup> Sch. IV, p. 7). Para comprender mejor este punto recuérdese que el movi-

miento relativo (a un marco de referencia *material*) de un cuerpo no se puede considerar como un movimiento *real* porque los mismos efectos se presentarían si consideramos que es el marco de referencia material el que se mueve relativamente a el cuerpo en cuestión. Por ejemplo desde un punto de vista cinemático, no podemos decir que la Tierra se mueve *realmente* porque los mismos efectos (como la sucesión del día y la noche) se producirían si supusiésemos que son los cielos los que se mueven y la Tierra está estacionaria. Nótese que en el movimiento relativo, si bien hay un cambio de relaciones espaciales y por ende un movimiento, no podemos decir que es uno de los cuerpos el que realmente se mueve porque igualmente podemos considerar (ya que los efectos son los mismos) que es el otro cuerpo el que se mueve. En cambio, el movimiento absoluto de un cuerpo es aquel que tenemos que considerarlo como real porque el considerar que el cuerpo está en reposo y que es otro (u otros) el que se mueve no produce los mismos efectos. Lo que Newton propone es que este movimiento absoluto, i.e. real, sólo se puede conceptuar como un movimiento que ocurre respecto del espacio absoluto (el cual está realmente en reposo porque es inamovible). Aunque abundaremos sobre esta idea en el punto 5, destacamos aquí que una de las razones de Newton para introducir los términos de movimiento y espacio absoluto era la de conceptuar cierto tipo de movimientos que se conciben como reales, en contraposición a los movimientos relativos. Así pues, uno de los sentidos primordiales de "absoluto" es real. 4) Una vez definidos los términos básicos, veamos qué razones da Newton para postular la existencia de un espacio absoluto (i.e. existente por sí mismo) que es similar e inamovible.

Newton no da ninguna razón explícita en favor de la existencia de el espacio absoluto similar (i.e. homogéneo), aunque nosotros podemos decir que la razón implícita es que el espacio absoluto tiene una estructura euclídea, y la geometría euclídea sólo versa sobre espacios homogéneos.

El argumento que da Newton en favor de la existencia de un espacio absoluto inamovible es el siguiente:

a) Como vimos, por movimientos se entiende cambio de lugares.

b) Los lugares o partes del espacio no pueden moverse ya que es absurdo pensar que un lugar puede cambiar de lugar, o sea, que un lugar se salga de su lugar (12, Sch. IV, p. 8) —en efecto, un lugar se define o individúa por la posición y orden que guarda respecto de otros

lugares, y consecuentemente no puede cambiar su posición sin dejar de ser ese lugar (13, p. 136); y (ii) si los lugares se moviesen, el movimiento no quedaría bien determinado cuantitativamente porque la distancia entre el lugar de origen y el lugar de llegada habría cambiado durante el transcurso del movimiento (o en otros términos, el movimiento relativo no puede considerarse real porque según se lo refiera a uno u otro marco de referencia material, marcos que a su vez pueden estar en movimiento relativo entre sí, la determinación cuantitativa de dicho movimiento relativo varía). Así, el espacio (o conjunto de lugares) debe ser inamovible.

c) El espacio relativo, o sea el espacio determinado por los objetos materiales, (ya sea en la versión leibniziana, según la cual el espacio no es más que el conjunto de relaciones espaciales entre los cuerpos, o en la versión cartesiana, para la cual el conjunto de todos los cuerpos se identifican con el espacio, i.e. los cuerpos no son más que partes del espacio), es un espacio móvil, precisamente porque los cuerpos son móviles. Por ende, el espacio que es inamovible tiene que ser el espacio absoluto, i.e. el espacio cuya existencia y propiedades es independiente de los cuerpos.

Es claro, y para Newton lo era ya que sostiene que "en las disquisiciones filosóficas, debemos abstraernos de nuestros sentidos, y considerar las cosas en sí mismas, distintas de lo que son tan sólo medidas sensibles de ellas" (12, Sch. IV, p. 8), que el argumento expuesto es puramente filosófico, ya que las razones que se aducen en favor de la postulación de un espacio absoluto inamovible son razones conceptuales basadas en el significado de "lugar", "cuerpo" y "movimiento". Ahora bien, esto genera un grave problema ya que, si bien hay fuertes razones filosóficas para postular un espacio absoluto, el hecho de que el espacio absoluto sea inobservable parece implicar que esta noción es bastante inútil para la física. En palabras de Newton, "Pero porque las partes del espacio (absoluto) no pueden ser vistas, o distinguidas la una de la otra por medio de nuestros sentidos, por tanto, en lugar de ellas usamos medidas sensibles de ellas. (. . .) Y así, en vez de lugares y movimientos absolutos, usamos los relativos; sin que esto presente inconveniente alguno para las cuestiones cotidianas" (12, Sch. IV, p. 8). Empero, frente a esta encrucijada Newton logra encontrar una solución admirable: aunque el espacio absoluto sea inobservable, hay datos científicos que requieren para su correcta interpretación de la noción de espacio absoluto, y por lo cual esta noción debe formar

parte del aparato conceptual de la física. El dato científico en cuestión es la existencia de movimientos absolutos.

3) Examinaremos ahora el argumento científico newtoniano en favor de la postulación del espacio absoluto. Newton afirma que "podemos distinguir el reposo y movimiento, absoluto y relativo, uno del otro por sus propiedades, causas y efectos". (12, Sch. IV, p. 8). Consideramos sólo el argumento de los efectos, por ser el más importante; este argumento consiste en establecer las siguientes dos afirmaciones: (i) existen movimientos que son absolutos y (ii) el movimiento absoluto debe entenderse como movimiento que ocurre con respecto al espacio absoluto (16, p. 202).

Examinemos la primera afirmación. Para probar que hay movimientos absolutos, Newton apela a dos experimentos, el de la cubeta con agua y el de las esferas rotantes, que son experimentos sobre movimientos de rotación, los cuales son un tipo de movimiento acelerado.

El experimento de la cubeta consiste en colgar una cubeta con agua de una cuerda que está torcida, de tal forma que en el momento de soltar la cubeta, la cuerda al desenrollarse, causa que la cubeta tenga un movimiento circular o rotatorio. Al principio del movimiento circular de la cubeta, la superficie del agua estará plana, como lo estaba antes de que la cubeta comenzara a moverse; pero posteriormente, el movimiento rotatorio de la cubeta se comunicará al agua, y este movimiento rotatorio del agua ocasiona que lentamente el agua comience a alejarse del centro y a ascender por los lados de la cubeta, formando una figura cóncava. "Este ascenso del agua muestra su tendencia (*endeavour*) a alejarse del eje de su movimiento; y el movimiento circular verdadero y absoluto del agua, que aquí es directamente contrario al (movimiento) relativo, llega a ser conocido, y puede ser medido por esta tendencia. (. . .) Y por tanto, esta tendencia no depende de ninguna traslación del agua con respecto a los cuerpos vecinos, no puede definirse el movimiento circular real por medio de dicha traslación. Sólo hay un movimiento circular verdadero de un cuerpo que gira, y que corresponde a un sólo poder de tender a alejarse de su eje de movimiento, como su efecto propio y adecuado; pero los movimientos relativos, en uno y el mismo cuerpo, son innumerables, de acuerdo con las varias relaciones que (el cuerpo) guarda con los cuerpos externos, y al igual que otras relaciones, carecen por completo de efectos reales" (12, Sch. IV, pp. 10-11).

Así, el experimento de la cubeta muestra que el movimiento circular del

agua es absoluto ya que:

1) Observamos que el agua tiende a alejarse del eje de su movimiento, tomando su superficie una forma cóncava, o sea, observamos que sobre el agua opera una fuerza centrífuga.

2) La fuerza centrífuga sólo puede entenderse como el efecto de un movimiento rotatorio real (ya que, por la segunda ley, el movimiento rotatorio está producido por una fuerza centrípeta, y por la tercera ley, la reacción a dicha fuerza centrípeta es la aparición de una fuerza centrífuga, y por la cual, la existencia de una fuerza centrífuga implica la existencia de un movimiento rotatorio que realmente está ocurriendo).

3) Además, este movimiento rotatorio real, que causa la fuerza centrífuga, debe entenderse como un movimiento absoluto, y no como relativo. En efecto, el movimiento del agua no puede ser relativo porque: (i) La fuerza centrífuga aparece cuando no hay ningún movimiento relativo entre el agua y la cubeta, o sea, la fuerza centrífuga aparece cuando el agua está girando al igual que la cubeta; en cambio, cuando sí hay un movimiento relativo entre el agua y la cubeta, porque la cubeta gira y el agua no, no opera la fuerza centrífuga, como puede notarse por el hecho de que la superficie del agua está plana. Y (ii) el movimiento relativo de un cuerpo varía según con cual objeto externo se lo relacione, mientras que el movimiento del agua se puede determinar de una manera única, y sin tener que relacionar el movimiento del agua con algún cuerpo externo, ya que a partir de la determinación cuantitativa de la fuerza centrífuga se puede inferir matemáticamente la medida del movimiento circular del agua. Así el movimiento del agua no es relativo, sino absoluto, o sea, un movimiento independiente de la existencia de otros cuerpos. El movimiento del agua también es absoluto en el sentido de real, como vimos en 2).

En síntesis, el argumento de Newton es que de la existencia de un efecto, las fuerzas centrífugas, debemos inferir la existencia de su causa que es un movimiento absoluto, o sea, un movimiento real y un movimiento que ocurre independientemente de otros cuerpos (cf. I, C. IV, 13, p. 48).

Haremos dos comentarios a la interpretación newtoniana de este experimento. En primer lugar, estrictamente hablando, lo que demuestra este experimento es tan sólo que el movimiento del agua es independiente de la existencia y/o acción causal de los cuerpos *circundantes* o *vecinos*, y no de todos los cuerpos en general. (Aunque por supuesto, para que esta objeción sea realmente

crucial habría que demostrar de qué cuerpos sí depende el movimiento del agua y/o la fuerza centrífuga). En segundo lugar, de acuerdo con la misma física clásica, el que tan sólo aparezca una fuerza centrífuga, y el que de la determinación cuantitativa de ésta se pueda inferir la cantidad del movimiento circular del agua, considerando a ésta como la única medida, o la medida verdadera, del movimiento, presupone que el experimento de la cubeta ocurre dentro de un marco de referencia inercial, o sea, el movimiento del agua no es, en sentido radical absoluto, independiente de cualquier marco de referencia con el cual relacionemos dicho movimiento, ya que la determinación cuantitativa de dicho movimiento variará si es que el marco de referencia fuese acelerado. Lo que este comentario aclara es que, en virtud de que la física clásica es sólo válida para marcos inerciales de referencia (cf. sección II), el término "movimiento absoluto" significa movimiento (determinado cuantitativamente) que es independiente de cualquier marco inercial de referencia (ie. el mismo para todo marco inercial), pero no movimiento que es independiente de cualquier marco de referencia material. Esta aclaración se refiere sólo al problema de la medida del movimiento, pero no al hecho de que ocurre un movimiento. En efecto, en cualquier marco de referencia en que se sitúe el experimento de la cubeta, la aparición de alguna fuerza centrífuga será ocasionada por el movimiento del agua. Es por ello que "movimiento (en sentido de traslación, y no como la medida de ésta) absoluto" significa indiferentemente, movimiento independiente de otros cuerpos o marcos de referencia o movimiento real.

El experimento imaginario de las esferas rotantes consiste en pensar en dos esferas conectadas por medio de una cuerda y que rotan en el vacío en torno a su centro común de gravedad; esta rotación produce una fuerza centrífuga que hace que el cordón se tense, de tal forma que a partir de la tensión de la cuerda, podemos descubrir la fuerza centrífuga, y a partir de ésta computar la cantidad de movimiento circular. "Y así podríamos encontrar tanto la cantidad como la determinación de este movimiento circular, aún en un inmenso vacío, donde no hubiese nada externo o sensible con respecto al cual las esferas se pudiesen comparar". (12, Sch. IV, p. 12).

De nuevo, este experimento prueba que el movimiento rotativo es un movimiento absoluto, ie. un movimiento independiente de otros cuerpos y real, porque la presencia de la fuerza centrí-

fuga sólo se puede explicar como causada por un movimiento rotatorio real, el cual, además, por ser determinable cuantitativamente a partir de la determinación de la fuerza centrífuga, se ha de considerar como un movimiento independiente de la existencia y/o acción causal de cualesquiera otros cuerpos —recuérdese, además, que porque este experimento sucede en el vacío, no puede interpretarse el movimiento de las esferas como relativo.

La argumentación de Newton aquí parece ser un tanto circular, ya que lo que quiere probar es que el movimiento rotatorio es un movimiento independiente de cualesquiera otros cuerpos, pero en el experimento de las esferas, por ser un experimento ideal, se *asume* que en el *vacío*, ie. sin que exista ningún otro cuerpo, las esferas girarán y se presentará una fuerza centrípeta. Así, si bien con este experimento Newton aparentemente logró establecer que el movimiento rotatorio o circular es absoluto en el sentido de ser independiente de la existencia y/o acción causal de cualesquiera otros cuerpos, y no sólo de los cuerpos vecinos (como en el primer experimento), esto lo hace a costa de un argumento circular. Por otra parte, a este experimento también se aplica el segundo comentario, sobre el significado de absoluto, que hicimos al experimento de la cubeta.

---

**Newton aparentemente logró establecer que el movimiento rotatorio o circular es absoluto en el sentido de ser independiente de la existencia y/o acción causal de cualesquiera otros cuerpos. . .**

---

Una vez establecido que el movimiento circular es un movimiento absoluto real e independiente de otros cuerpos, el segundo paso en la argumentación newtoniana consiste en mostrar que el movimiento absoluto es un movimiento que se da con respecto al espacio vacío. La razón implícita en Newton para hacer esta última afirmación es que, si bien el movimiento absoluto es un movimiento que ocurre independientemente de la existencia de otros cuerpos, sin embargo, el movimiento tiene que darse con respecto a algo, o en relación con algo (recuérdese que Newton comparte con sus coetáneos la convicción filosófica o conceptual, de que todo movimiento, por consistir en un cambio de relaciones espaciales, es 'relativo' (cf. p. 5), y dado que este algo no pueden ser los otros objetos materiales, entonces tiene que ser el espacio, un espacio entendido como



puede darse el caso de un movimiento "absoluto" porque está causado por una fuerza interna, pero, dada la concepción de Leibniz, no sin movimiento, porque no ocurre en relación con otros cuerpos —tal sería el caso si todo el universo estuviese rotando.

Berkeley tomó la misma línea argumentativa de Leibniz, pero en vez de sostener que el movimiento "absoluto" o real está causado por una fuerza interna, sostuvo que estaba causado por una fuerza externa. A Berkeley se le puede objetar que (a) dicha fuerza externa no siempre es directamente observable, y por ende, no puede ser utilizada para determinar la existencia de un movimiento "absoluto", y (b) hay movimientos absolutos (en el sentido de que hay fuerzas centrífugas presentes) pero que no son causados por una fuerza externa —p.j., un disco que gira presenta fuerzas centrífugas, pero su movimiento circular puede deberse a que se conserva el momento angular y no a la aplicación de una fuerza que conserva dicho movimiento. (16, p. 193).

Planck y Einstein en Berlín, junio 28 de 1929.  
Max Planck (1858-1947), Albert Einstein (1879-1955).

entidad independiente de los objetos materiales, o sea, el espacio absoluto. Así, la afirmación de que el movimiento absoluto es un movimiento que ocurre en (o respecto de) el espacio absoluto se funda en la tesis filosófica de que todo movimiento es 'relativo' (8, p. 24).

Las principales críticas que históricamente se han hecho a este argumento newtoniano son las de Leibniz, Berkeley y Mach.

Leibniz atacó la primer tesis del argumento newtoniano sosteniendo que si bien hay una distinción entre movimiento relativo y absoluto, éste último no se ha de interpretar como absoluto en el sentido newtoniano, i.e. como independiente de otros cuerpos, ni como un movimiento que ocurre en relación con el espacio vacío: "hay una diferencia entre el movimiento absoluto verdadero de un cuerpo y el mero cambio relativo de su situación con respecto a otro cuerpo. Pues cuando la causa inme-

diata del cambio (que para Leibniz es la *vis viva*, fuerza motriz o energía cinética) se encuentra en el cuerpo, ese cuerpo está verdaderamente en movimiento". (1, L. V. 53, p. 74). O sea, para Leibniz si bien todos los movimientos son relativos, son con respecto a otros cuerpos, de algunos de estos movimientos se puede decir que son "absolutos", reales o que verdaderamente ocurren (sin que se pueda considerar que es más bien el otro cuerpo el que se mueve mientras que el cuerpo en cuestión permanece inmóvil) en tanto que están producidos por una causa o fuerza interna. A esta idea de Leibniz se le puede objetar lo siguiente: (a) dicha fuerza interna no es directamente observable, y por tanto, no puede utilizarse para establecer que hay un movimiento "absoluto" o real; (b) Leibniz no da ningún argumento, como debería, para establecer que hay una relación causal entre la fuerza interna y la fuerza centrífuga; (c)

Mach también intentó desarrollar una teoría relacional del espacio y del movimiento. La idea de Mach es que sostener, como Newton, que las fuerzas centrífugas son causadas por un movimiento que ocurre en relación al espacio absoluto significa sostener que es el espacio absoluto el que causa el que dichas fuerzas se presenten —en verdad, varios autores han entendido así la tesis de Newton (2, pp. 107-8; 4, p. 56; 14, Einstein, "Notas Autobiográficas", p. 101; 16, p. 200). Considero que Newton no pudo haber sostenido que el espacio absoluto causa dichas fuerzas ya que para él el espacio absoluto es pasivo, o sea, que no actúa sobre los objetos materiales (13, p. 145). Trataremos de aclarar por qué Mach y otros han dado una interpretación tan extraña de Newton.

Un posible argumento por el cual Mach pudo haber sostenido que para la física clásica es el espacio absoluto el que causa la aparición de las fuerzas centrífugas es el siguiente: no basta decir que es el movimiento acelerado el que causa las fuerzas centrífugas, o en general, las fuerzas inerciales,<sup>2</sup> porque de lo que se trata, precisamente, es explicar por qué para la física clásica el movimiento acelerado va necesariamente aso-

ciado con fuerzas inerciales (de tal forma que en muchos casos la única manera de determinar que hay un movimiento acelerado es constatar la presencia de fuerzas inerciales) mientras que el movimiento inercial no genera fuerzas inerciales. La posible explicación, consistente en decir que las fuerzas inerciales son la reacción (tercera ley) a la aplicación de una fuerza que produce la aceleración (segunda ley), no es correcta, ya que hay casos en que se presentan fuerzas inerciales pues el movimiento acelerado se mantiene no por la acción de una fuerza sino por la conservación del momento angular —tal es el caso del movimiento rotatorio de la Tierra. Otra posible explicación sería el decir que las fuerzas inerciales son la manifestación de la inercia o resistencia al cambio de estado, i.e. resistencia a la aceleración (3, p. 76); esto es tan sólo una pseudo explicación, porque lo que se pregunta, precisamente, es por qué para la física clásica los cuerpos presentan resistencia al cambio de estado o aceleración pero no al movimiento uniforme rectilíneo. Por lo cual queda la alternativa de que es el espacio absoluto, con respecto al cual ocurre el movimiento acelerado, el que causa la presencia de las fuerzas inerciales.

Mach considera que apelar a entidades no-observables como el espacio absoluto para explicar los fenómenos no es un procedimiento científico legítimo —recuérdese que Mach es empirista. Por otra parte, nos dice Einstein, "Mach conjetura que en una teoría verdaderamente racional la inercia (i.e. las fuerzas inerciales) tendría que depender de la interacción de las masas, como ocurría precisamente con las demás fuerzas de Newton" (14, Einstein, "Notas Autobiográficas", p. 101). O sea, Mach, con el fin de sostener una teoría racional del espacio y el movimiento (por ser un empirista), y con el fin de sistematizar la teoría newtoniana, sostiene que las fuerzas inerciales se han de explicar de la misma manera que se explican otras fuerzas (como p.e. la gravedad) en la teoría newtoniana, o sea, como el resultado de la interacción entre masas. Las masas relevantes para la explicación de las fuerzas inerciales son la masa o cuerpo que se mueve aceleradamente y las estrellas fijas (Mach selecciona las estrellas fijas porque éstas constituyen un marco de referencia inercial, y porque, dado que su idea era que es el conjunto total de la masa existente en el universo lo que genera las fuerzas inerciales (3, p. 85), y dado que en las estrellas fijas se da la mayor aglomeración de masas del universo (4, p. 110), las estrellas fijas pueden servir para ser aquello con respecto a lo cual ocurre todo movimiento

acelerado). Así, lo que hace Mach es sustituir el espacio absoluto newtoniano por un sistema inercial privilegiado que es el de las estrellas fijas, y sostiene que las fuerzas inerciales se explican como el resultado de la interacción causal entre las estrellas fijas y el cuerpo que se mueve aceleradamente, y por lo cual el movimiento acelerado, que es tan relativo como el inercial (i.e. no es absoluto en sentido newtoniano), se ha de entender como un movimiento que ocurre con respecto a las estrellas fijas (2, p. 110-1).

Dada esta concepción, Mach interpreta el experimento de la cubeta como un experimento que tan sólo muestra que los objetos vecinos al agua no afectan la fuerza centrífuga, pero éste no demuestra que las estrellas fijas no causen la fuerza centrífuga. El experimento ideal de las esferas rotantes lo considera inválido porque presupone exactamente lo que tiene que demostrarse, o sea, presupone que en el vacío se presentarán fuerzas centrífugas.

El problema principal con la concepción de Mach es que aunque está propuesta como una teoría alternativa de la Newtoniana, de hecho, no es una teoría, sino tan sólo la idea general o la clave para desarrollar una teoría alternativa (5, p. 299). En efecto, Mach nunca determinó cuantitativamente cómo la interacción entre masas genera la fuerza centrífuga y las otras fuerzas inerciales. (16, p. 201).

Para terminar, cabe destacar que la noción de espacio absoluto, tal y como la introduce Newton en el *Scholium*, no es una noción que tenga por función explicar causalmente nada (en contra de la interpretación machiana), ya que, entre otras razones, el espacio absoluto es pasivo para Newton. La función que cumple en el *Scholium* es puramente conceptual, ya que consiste en aclarar cual es el marco de referencia del movimiento acelerado, o sea, del movimiento absoluto, aclaración que resulta necesaria porque se concibe de movimiento como 'relativo'. O sea, lo que hace Newton es interpretar el dato científico de la existencia de movimientos acelerados (que a diferencia de los inerciales, causan fuerzas inerciales) utilizando los términos altamente teóricos y quasifilosóficos de "relativo", "movimiento absoluto" y "espacio absoluto".

Qué tan cruciales para, o no eliminables de, la teoría newtoniana son éstos términos altamente teóricos depende de cómo se conciba lo que es una teoría científica. Si se la concibe estáticamente, como un mero conjunto de leyes que sirven para describir y predecir hechos, pues ciertamente son eliminables estos conceptos ya que su función es solamente

te la de interpretar o aclarar conceptualmente a dichas leyes. Empero, si una teoría científica se la concibe como algo que es usado y algo que se genera y desarrolla históricamente, entonces no son eliminables dichos conceptos altamente teóricos. En efecto, dichos conceptos pertenecen a los fundamentos conceptuales de la mecánica, o sea, la función de dichos conceptos es aclarar y precisar qué es lo que la teoría afirma —así, el considerar al movimiento como algo 'relativo' nos hace ver que el movimiento del que trata la física clásica está entendido como un mero cambio de relaciones espaciales, y, por tanto, se puede dar un tratamiento matematizado exhaustivo del movimiento; el decir que algunos movimientos son absolutos precisa que los efectos de la aceleración son independientes de los objetos que rodean al cuerpo que se mueve, e independientes del marco de referencia (inercial); y el introducir el concepto de espacio absoluto aclara con respecto a qué ocurre el movimiento acelerado.

## II

Hemos visto que en el *Scholium* a las Definiciones, Newton, introduce el concepto de espacio absoluto con el fin de especificar con respecto a qué ocurre el movimiento acelerado. Sin embargo, el concepto de espacio absoluto cumple otra función, un tanto implícita, y que es la de especificar el marco de referencia con respecto al cual resultan verdaderas las leyes de la mecánica. En efecto, el hecho de que el *Scholium* esté inmediatamente antes de la enunciación de las leyes del movimiento, parece indicar que Newton le confería esta función al concepto de espacio absoluto.

Las leyes de la mecánica no son verdaderas referidas a cualquier marco de referencia. Por ejemplo, la ley de inercia establece que un cuerpo sobre el cual no actúa ninguna fuerza externa permanece en su estado de reposo o de movimiento uniforme rectilíneo. Pero el que un movimiento sea o no rectilíneo depende del marco o sistema de referencia desde el cual se lo observa —de tal forma que el movimiento de un cuerpo en la Tierra, que observado desde la Tierra nos parece rectilíneo, observado desde el Sol no será rectilíneo, ya que la Tierra se está moviendo circularmente. O bien, considérese la segunda ley ( $F = ma$ ). De acuerdo con ella, un cuerpo que cae a la Tierra, debería caer verticalmente, pero esto no sucede de hecho porque la Tierra es un sistema de referencia que está en rotación: las fuerzas de Coriolis, producidas por la rotación, hacen que el cuerpo se desvíe lateralmente un poquí-

to de su trayectoria vertical.

Las leyes de la mecánica newtoniana son verdaderas referidas a un sistema que está realmente en reposo, ya que respecto de él, la trayectoria observada es la trayectoria real (dado que no está influida por el movimiento del sistema desde el cual se la observa), y ya que en dicho sistema, por no moverse aceleradamente, no actúan fuerzas inerciales. Claramente, dicho sistema realmente en reposo es el espacio absoluto, y no puede ser un sistema material determinado porque siempre es posible descubrir que sí estaba en movimiento.

Sin embargo, para efectos prácticos (ie. para explicar la física newtoniana a los fenómenos naturales), no se puede considerar al espacio absoluto como el marco de referencia, ya que éste es inobservable. Lo que de hecho se hace es usar como marcos o sistemas de referencia a los llamados sistemas inerciales o galileanos.

Un marco inercial o galileano es un sistema de coordenadas material que está en reposo o en movimiento uniforme rectilíneo. También se lo puede definir como un marco dentro del cual cualquier cuerpo, sobre el cual no actúa ninguna fuerza externa neta se mantiene en un estado de reposo o de movimiento uniforme rectilíneo. Finalmente, otra definición equivalente es la de que es un marco en el cual no se presentan fuerzas inerciales. Ahora bien, hay un número indefinido de sistemas inerciales: dado un sistema inercial, cualquier sistema (o conjunto de cuerpos) que se mueva uniforme y rectilíneamente o esté en reposo relativo al sistema dado, será también un sistema inercial. La razón de esto está dada por el principio dinámico de relatividad, que establece que mediante experimentos mecánicos llevados a cabo dentro de un sistema no es posible determinar si dicho sistema se mueve uniforme y rectilíneamente o está en reposo, o sea, que todos los fenómenos mecánicos ocurren de la misma manera, ya sea que estén en un sistema que se mueve o que esté en reposo. Este principio de la relatividad, a su vez, es consecuencia de la ley de inercia, que afirma la equivalencia del movimiento uniforme rectilíneo y el reposo.

No todo sistema es inercial, ya que hay sistemas acelerados. Un sistema acelerado se caracteriza por el hecho de que en él operan fuerzas inerciales —así, p.j., si se coloca un cuerpo sobre un disco que gira, el cuerpo, (si es que sobre él no actúan ninguna fuerza externa neta), no permanecerá en reposo, sino que saldrá disparado en sentido contrario al eje de rotación (por la acción de la fuerza centrífuga), y de lo cual se infiere que el

disco es un sistema acelerado.

Las leyes de la mecánica clásica sólo son verdaderas si se las aplica a sistemas inerciales; para explicar los fenómenos mecánicos que ocurren en un sistema acelerado es necesario utilizar no sólo estas leyes sino también añadir la existencia de fuerzas inerciales —así, el leve desplazamiento lateral de la caída libre en la Tierra se explica por las fuerzas de Coriolis. Otra manera típica de enunciar esta idea es decir que las leyes mecánicas adquieren su forma más simple, o sea, la forma en que fueron enunciadas por Newton, cuando se las refiere a sistemas inerciales, y en cambio cuando se las refiere a sistemas acelerados son más complejas porque toman en cuenta la existencia de fuerzas inerciales (3, p. 77; 4, p. 107; 16, p. 210). Una tercera manera, más técnica de enunciar esta idea es decir que las leyes de la mecánica son invariantes con respecto a las transformaciones de Galileo (3, p. 74). Las transformaciones de Galileo son ecuaciones que nos permiten calcular la posición y velocidad de un cuerpo en un sistema inercial  $S'$  a partir de la posición y velocidad que dicho cuerpo tiene con respecto a otro sistema inercial  $S$ , tal que  $S'$  se mueve uniforme y rectilíneamente con respecto a  $S$ . El decir que las leyes de la mecánica son invariantes (o que son verdaderas) quiere decir que a partir de ellas se obtiene el mismo resultado cuantitativo ya sea que el movimiento así determinado cuantitativamente se lo refiera a uno u a otro sistema inercial.

---

Para la mecánica clásica el marco de referencia *observable* son los sistemas inerciales, los cuales son distintos a los sistemas acelerados. . .

---

El hecho de que las leyes de la mecánica newtoniana sean invariantes (o sean verdaderas) con respecto a cualquier sistema inercial se debe a que la aceleración es invariante (37, p. 75), y a que las leyes de la mecánica newtoniana versan sobre la aceleración. En efecto, con respecto a distintos sistemas inerciales en movimiento uniforme y rectilíneo unos respecto de los otros, la posición y velocidad de un cuerpo varía (así, la velocidad a la que camina un hombre sobre un barco que se mueve en el mar es distinta ya sea que el movimiento del hombre se lo refiera al barco o al mar); sin embargo, a pesar de que la velocidad varíe con respecto a los distintos marcos inerciales, esto no sucede con la aceleración ya que lo que ésta representa es la cantidad en que varía la velocidad en el tiempo (de tal forma que la variación en la velo-

cidad, ie. la aceleración, es la misma si respecto de  $S$ , la velocidad instantánea de un cuerpo en  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$  es 10 km/hr, 30 km/hr, a la velocidad que tendría dicho cuerpo referido otro marco inercial  $S'$  en  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$  y que sería 15 km/hr, 25 km/hr, 35 km/hr si es lo que  $S'$  se mueve relativamente a  $S$  a 5 km/hr). O sea, la velocidad es relativa a un marco inercial, ya que varía según el marco al que se la refiera, mientras que la aceleración es invariante o no relativa o absoluta (ie. la misma independientemente de a qué marco inercial en particular se la refiera).

En síntesis, hemos visto que para la mecánica clásica el marco de referencia *observable* son los sistemas inerciales, los cuales son distintos a los sistemas acelerados ya que en ellos no se presentan fuerzas inerciales, y que es respecto a ellos que las leyes de la mecánica resultan verdaderas.

Apelando al concepto de sistema inercial, Max Born ha sostenido que las ecuaciones newtonianas del movimiento contradicen su tesis del espacio absoluto en cierta manera, ya que "existen ciertos sistemas equivalentes de referencia en movimiento relativo, cada uno de los cuales puede considerarse con la misma justificación como absolutamente en reposo. El espacio de Newton es por ende absoluto sólo en un sentido restringido". (3, p. 3). La idea de Born es que el principio de relatividad implica que si los sistemas inerciales  $S$  y  $S'$  están en movimiento relativo uno respecto del otro, entonces se puede considerar que  $S$  se mueve en relación a  $S'$ , que está en reposo, o bien igualmente se puede considerar que  $S'$  es el que se mueve y que  $S$  está en reposo; y esto contradice a la tesis de que hay un sistema particular, el espacio absoluto, que está absolutamente en reposo, o sea, que no puede ser considerado como estando en movimiento relativo a otros sistemas (3, pp. 69-70). Este argumento de Born en contra del espacio absoluto sólo sería válido en caso de que pudiéramos considerar al espacio absoluto como un sistema inercial más, aunque privilegiado; pero claramente, dentro de la mecánica newtoniana esto no es posible ya que, por definición, el espacio absoluto es algo independiente del mundo material e inobservable, es algo que es uno, y que es la arena en que acontece todo fenómeno físico, y algo absolutamente inmovible, mientras que los sistemas inerciales, dada su definición, no cumplen con estas características. Ahora bien, lo que lleva a Born a considerar al espacio absoluto a la par que un sistema inercial es su adhesión a un principio empirista según el cual no debe haber en la física nociones que no sean verificables empí-

ricamente (3, pp. 3 y 69). Empero, lo que hace con ello Born es introducir una concepción epistemológica opuesta a la concepción newtoniana. En efecto, aún cuando Born y Newton son empiristas, entienden de manera muy distinta en qué consiste esta posición. Para Born, "Un concepto se refiere a una realidad física sólo cuando hay algo que podemos afirmar por medio de una medición y que corresponde a él en el mundo de los fenómenos". (3, pp. 69-70), de tal forma que, para que en principio pueda ser legítimo el concepto de espacio absoluto, éste tendría que ser correlacionado con algo fenoménico, i.e. algún sistema inercial (pero, como hemos visto, por el principio de relatividad, no hay ningún sistema inercial privilegiado). En cambio, para Newton, que hace filosofía natural, "en las disquisiciones filosóficas, debemos abstraernos de nuestros sentidos, y considerar las cosas en sí mismas, distintas a lo que son tan sólo medidas sensibles de ellas". (12, Sch, IV, p. 8, subrayado mío). O sea, para Newton, el empirismo solamente significa que se tenga algún tipo de evidencia empírica para una entidad que puede ser bastante distinta, aún ontológicamente, de aquello que es empíricamente observable; por ejemplo, la evidencia empírica de que las aceleraciones producen fuerzas inerciales es evidencia para la tesis filosófico-científica de que la aceleración es absoluta y, por ende, es un movimiento que ocurre con respecto al espacio vacío. Así pues, para que la crítica de Born sea válida, hay que aceptar el supuesto epistemológico en que se funda, y que es distinto al empirismo newtoniano.

Otros autores, menos categóricos que Born, han sugerido que la noción de espacio absoluto puede ser sustituida por la de sistema inercial (de forma tal que movimiento "absoluto" significa movimiento invariante con respecto a cualquier sistema inercial) (17, p. 507). Si bien es cierto que la noción de sistema inercial es más ventajosa que la de espacio absoluto en tanto que se refiere a algo empírico y observable, lo cierto es que hacer tal sustitución parecería imposibilitar la respuesta a la pregunta ¿qué es lo que determina que un marco sea inercial o acelerado? Si cuenta uno con el concepto de espacio absoluto, uno puede responder que la diferencia entre estos dos tipos de marcos es intrínseca a los marcos, i.e. no causada por influencias externas a los marcos, y se la puede explicar diciendo que ésta se debe a que los marcos inerciales están en reposo o se mueven uniforme y rectilíneamente con respecto al espacio absoluto mientras que los marcos acelerados se

mueven aceleradamente con respecto al espacio absoluto y es esto lo que ocasiona la aparición de fuerzas inerciales en dichos marcos (4, p. 109). Sin embargo, realmente no es indispensable la noción de espacio absoluto para responder a esta pregunta, ya que, utilizando las ideas de Mach, se puede sostener que la diferencia entre los marcos se debe a influencias externas, a saber, a la distribución en gran escala de la materia del universo, de tal forma que es el movimiento inercial o acelerado de los marcos con respecto a las estrellas fijas lo que determina que en ellos se presenten o no fuerzas inerciales (4, p. 110; 17, p. 508) —empero, recuérdese que el problema que presenta esta hipótesis de Mach es *a posteriori* y consiste en desarrollar una teoría que la avale.

A nivel conceptual resulta clara y elegante una presentación de la mecánica clásica en términos de espacio absoluto. En efecto se podría decir que las leyes de la mecánica son verdaderas respecto del espacio absoluto, pero como éste es inobservable, en la práctica se usan los sistemas inerciales (que teóricamente se definen como aquellos que se mueven uniforme y rectilíneamente o están en reposo con respecto al espacio absoluto). En cambio, si sólo se cuenta con la noción de sistema inercial, la presentación de la mecánica clásica resultaría un tanto circular ya que para definir el marco de referencia (a saber, los sistemas inerciales) para las leyes de la mecánica, hay que utilizar algunas de dichas leyes o principios (p.j. la ley de inercia y el principio de relatividad, o el principio de Mach, pero en tanto que esté comprobado empíricamente y por lo cual resultará parte de la teoría).

Para terminar, quisiera destacar que el enfocar la noción de espacio absoluto desde la perspectiva del problema del marco de referencia para las leyes de la mecánica no presenta un cambio fundamental con respecto al enfoque en términos del problema del marco de referencia del movimiento. En efecto, en ambos casos lo que está en juego es la distinción fundamental de la mecánica clásica entre movimiento inercial, o velocidad, y aceleración, distinción que Newton quiso conceptualizar en términos de espacio absoluto.

### III

El concepto de espacio absoluto cumple otra función, un tanto implícita, aunque fundamental, en la física clásica, y que es la de constituir la base teórica para las mediciones espaciales (9, p. 321), o sea, el concepto de espacio absoluto newtoniano cumple la función de especificar

la geometría métrica (i.e. la geometría que estudia las relaciones matemáticas entre distancias) que se ha de utilizar en la física. Dado que esta función resulta más clara o explícita si se compara la física newtoniana con la teoría de la relatividad, examinaremos esta última teoría también —lo cual requiere que hablemos no sólo del espacio sino también del tiempo.

La afirmación newtoniana de que el espacio y el tiempo son absolutos significa dos cosas:

1) El espacio es absoluto en el sentido de que es una entidad cuya *estructura* es independiente o no es afectada por la materia. La estructura matemática del espacio para Newton es la de ser homogéneo (i.e. similar en todas partes) e isotrópico (i.e. todas las direcciones son similares), la de su tridimensionalidad y tener una métrica euclídeana (i.e. el cálculo de distancias utiliza el teorema de Pitágoras, etc.). El tiempo es absoluto en el sentido de ser una entidad cuya estructura no está afectada por la materia; dicha estructura matemática es la de ser unidimensional, continuo y unidireccional.

2) El espacio es absoluto en el sentido de que un intervalo espacial determinado entre dos cuerpos es el mismo independientemente de cual sea el marco de referencia desde el cual se lo mida (5, p. 290) (ya que, lo que se estaría midiendo, supuestamente es un intervalo en el espacio absoluto en el sentido 1). El tiempo es absoluto en el sentido de que un intervalo espacial particular entre los fenómenos es el mismo independientemente de cual sea el marco desde el que se lo mide. O bien, el tiempo es absoluto en el sentido de que si dos eventos cualesquiera son simultáneos medidos desde un marco de referencia determinado, resultarán también simultáneos medidos desde cualquier otro marco de referencia (6, p. 30).

La teoría *especial* de la relatividad ha mostrado la falsedad del sentido 2 de espacio y tiempos absolutos (i.e. como intervalos independientes del marco de referencia), y parcialmente, la falsedad del sentido 1 (ya que para esta teoría no existen dos entidades, espacio y tiempo, sino sólo una, el espacio-tiempo). La teoría *general* de la relatividad, según algunos autores, ha puesto en duda el sentido 1 de absoluto, en tanto que muestra que la métrica del espacio-tiempo *depende* de la existencia y distribución de la materia; ciertamente, si esta crítica fuese válida, sería la objeción más fuerte posible a la existencia de un espacio-tiempo absoluto, ya que mostraría que no hay tal entidad independiente, i.e. con una estructura propia, porque la es-

estructura geométrica del universo es tan sólo el resultado causal de la existencia y distribución de la materia. Pasemos pues a examinar estas teorías.

Considero que una de las tesis implícitas más importantes en la mecánica newtoniana, y que la teoría especial de la relatividad saca a luz, es que los conceptos de espacio y tiempo absolutos en el sentido (2) —ie. como distancias y tiempos absolutos— tienen por función la de fundar o ser los presupuestos de las transformaciones galileanas y el teorema de la adición de velocidades. Las transformaciones galileanas son cruciales para la mecánica clásica porque, como vimos, las leyes de ésta son invariantes sólo bajo las transformaciones galileanas (que es una manera técnica y precisa de decir que las leyes de la mecánica clásica son verdaderas para cualquier sistema inercial). Examinemos pues las ideas pertinentes para este punto de la teoría especial de la relatividad (teoría que, a diferencia de la general, sólo es válida o verdadera para sistemas inerciales de referencia).

Einstein considera que la mecánica newtoniana ha de ser sustituida por la teoría especial de la relatividad si es que se ha de resolver la incompatibilidad entre los dos enunciados de la constancia de la velocidad de la luz, y de la relatividad.

La ley de la constancia de la luz afirma que en el vacío la luz viaja a 300,000 km/seg. Einstein considera a esta ley como una "ley general de la naturaleza" (6, p. 18) o como uno de los principios fundamentales de la relatividad especial (6, p. 48) porque es una ley que es consecuencia necesaria de la teoría electromagnética de Maxwell, Faraday y Lorentz (6, p. 19). Lo que esto quiere decir es que esta ley de la constancia de la velocidad de la luz no es tan sólo empírica (ie. comprobada experimentalmente) sino que tiene una justificación teórica; y por otra parte, que Einstein va a usar la teoría electromagnética como punto de partida para construir una física no fundada en la mecánica newtoniana (la cual es incompatible con la teoría electromagnética) (14, Einstein, "Notas Autobiográficas", p. 100).

El principio (restringido o especial) de la relatividad afirma que toda ley de la física (ie. mecánica y electrodinámica) es válida para cualquier sistema inercial.

Unidos estos dos enunciados, lo que se afirma es que, en referencia a cualquier sistema inercial, ya sea que se lo considere en reposo o en movimiento uniforme rectilíneo, la luz viajará en el vacío a la velocidad de 300,000 km/seg. Nos referimos a esta afirmación como el

principio de la constancia de la velocidad de la luz.

Einstein sostiene que los enunciados de la constancia de la luz y el de la relatividad son incompatibles porque de acuerdo con el teorema de la adición de velocidades de la mecánica clásica, cuando se quiere determinar la velocidad que un cuerpo tiene en un sistema inercial  $S'$ , a partir de la velocidad  $w$  que tiene en  $S$ , y tal que  $S'$  se mueve relativamente a  $S$  con velocidad  $v$ , hay que sumar  $w$  y  $v$ . Usando este teorema, al determinar la velocidad de la luz en  $S'$  a partir de la velocidad  $c$  (ie. 300,000 km/seg.) que tiene en  $S$ , y tal que  $S'$  se mueve relativamente a  $S$  con velocidad  $v$ , resultará que en  $S'$  la velocidad de la luz es igual a  $C + v$ , o sea, la velocidad de la luz será mayor o menor que  $c$ ; pero este resultado contradice el principio de la relatividad, según el cual la velocidad de la luz es  $c$  en cualquier sistema inercial (6, pp. 18-19). Para resolver esta contradicción, nos dice Einstein, se puede negar alguno de los dos enunciados —opción que no es deseable porque son principios muy firmes; o bien, se pueden revisar nuestras nociones tradicionales o newtonianas de espacio y tiempo— alternativa que él toma (6, p. 19).

Einstein da dos explicaciones de la relación que hay entre el principio de la constancia de la velocidad de la luz y las nociones de espacio y tiempo, una de las cuales es conceptual, y la otra es matemática (e incluye el teorema clásico de la adición de velocidades).

Examinaremos primero la relación conceptual. La tesis que establece Einstein es que el hecho de que si la velocidad de la luz es finita implica que las nociones de distancia, intervalo temporal y simultaneidad son relativas a un marco de referencia inercial, o dicho en otros términos, las nociones de distancia, intervalo temporal y simultaneidad absolutas o newtonianas implican que la velocidad de la luz es infinita (4, p. 161). Einstein saca a luz esta tesis mediante su famoso ejemplo imaginario del tren.

Para que el ejemplo del tren sirva para demostrar la relatividad de la distancia y el tiempo hay que notar que Einstein maneja una *definición operacional* de éstas, o sea, la distancia y el tiempo que son relativos están definidos en términos de las operaciones físicas que hay que llevar a cabo para determinar un intervalo espacial o un caso de simultaneidad de eventos (2, pp. 78 y 106; 6, p. 22) (la noción temporal fundamental es la de simultaneidad porque determinar el tiempo de un evento consiste en determinar que el evento fue simultáneo con cierta posición de las manecillas del reloj (14, Einstein, "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento",

p. 63), y la determinación de un intervalo temporal se hace determinando el tiempo que separa a los tiempos en que acontecieron los dos eventos entre los que se da el intervalo temporal) —así, Einstein, a diferencia de Newton, identifica espacio y tiempo, en el sentido de distancias y tiempos, con las medidas sensibles de éstos. La definición operacional de simultaneidad es que dos eventos *separados espacialmente* son simultáneos cuando las señales (luminosas, sonoras, etc.) que emiten llegan a la vez al punto medio de la distancia que los separa. Nótese que el problema de la simultaneidad no surge cuando los dos eventos están espacialmente cercanos, pues el observador, que es parte del mismo sistema inercial que los eventos, puede observar si ocurren o no a la vez, y saber así si son o no simultáneos (4, p. 170). La definición operacional de distancia es que el intervalo espacial entre 2 cuerpos o entre dos marcas en un mismo cuerpo se mide observando el espacio entre dos marcas de una vara de medir y que son coincidentes en el mismo momento con las anteriores.

El ejemplo del tren consiste en suponer que un tren muy largo se mueve con velocidad uniforme  $v$ , a lo largo de un terraplén en reposo, y que dos rayos caen en los lugares  $A$  y  $B$ , tales que el punto medio entre ellos es  $M$  con respecto al terraplén y  $M'$  con respecto al tren:

La pregunta es si los rayos que caen en  $A$  y  $B$  caen simultáneamente. Supongamos que un observador parado en  $M$  observa en el mismo momento las señales luminosas que emiten los rayos, y por tanto concluye que ocurren simultáneamente. En cambio, para un observador sentado en el punto  $M'$  del tren, y tal que  $M'$  coincide con  $M$  en el momento en que ocurren los rayos (según el juicio del observador en  $M$ ), el rayo  $B$  caerá antes que el rayo  $A$ , dado que la luz emitida por los rayos tarda tiempo en llegar al punto  $M'$ , por tener la luz una velocidad finita, y mientras está avanzando el rayo luminoso, el tren también está moviéndose, de tal forma que avanza hacia el rayo emitido en  $B$ , mientras que se aleja del rayo emitido en  $A$ , y por lo cual el observador en el tren verá primero la luz emitida desde  $B$  y después la que viene de  $A$ . (6, pp. 25-6; 2, p. 59). Nótese que si la luz viajara a velocidad infinita, en el momento en que acontecen los rayos, la luz que ellos emiten se distribuiría inmediatamente a todo lo largo del intervalo  $AB$ , de forma tal que el observador en  $M'$  los vería ocurrir simultáneamente, como lo hace el observador en  $M$ , pero como la luz

vía a velocidad finita, el movimiento del tren hace que un rayo luminoso llegue antes que el otro. Ahora bien, no se puede considerar que realmente los rayos ocurrieron simultáneamente porque así se lo observa desde el marco del terraplén, que es un marco en reposo, y que la no-simultaneidad con respecto al tren se debe a una distorsión introducida por el movimiento del tren, ya que el tren y el terraplén son por hipótesis sistemas inerciales y, por ende, por el principio de relatividad, igualmente se puede considerar que es el tren el que está en reposo y el terraplén el que se mueve.

### La relatividad de la simultaneidad implica la relatividad de las distancias

Lo que este ejemplo demuestra es que para distintos sistemas inerciales en movimiento relativo unos respecto de otros la simultaneidad varía, y por ende, que la simultaneidad es *relativa*, o sea, que siempre hay que referir a un marco de referencia determinado el juicio acerca de la simultaneidad o no entre dos eventos espacialmente separados. En palabras de Einstein, "Todo cuerpo-de-referencia (sistema de coordenadas) tiene su propio tiempo particular; a menos que se nos diga cual es el cuerpo-de-referencia al cual se refiere el enunciado sobre el tiempo, no hay ningún significado en un enunciado acerca del tiempo en que ocurre un evento". (6, p. 26). Esta tesis de la relatividad de la simultaneidad entre eventos espacialmente separados es la contraria a la tesis newtoniana del tiempo absoluto (según la cual dos eventos son simultáneos independientemente del marco inercial al cual se los refiera), y como hemos visto, se funda en (i) una definición operacional de simultaneidad y en (ii) el hecho de que la luz viaja a velocidad finita.

La relatividad de la simultaneidad implica la relatividad de las distancias. Se dice que dos puntos en un cuerpo están a una distancia de un metro cuando *simultáneamente* los dos puntos coinciden con los extremos de una regla de un metro. Pero si el cuerpo se encuentra en movimiento relativo al observador, la distancia que éste mida será distinta a la distancia que mida un observador en reposo con respecto al cuerpo, ya que lo que es simultáneo para el primer observador no lo es para el segundo, y viceversa. (3, p. 246; 4, p. 171; 15, p. 47). Por ende, las distancias son relativas a los marcos inerciales de referencia en los cuales se mide.

Hemos visto así que el carácter finito de la velocidad de la luz implica que las



Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716).

nociones de distancia y tiempo son relativas a un marco de referencia. Esto muestra que en la teoría newtoniana, las nociones de distancia y tiempo absolutos (ie. independientes de cualquier marco inercial) cumplían la función de implicar o requerir que al menos algunas velocidades fuesen infinitas, ya sea la velocidad de la luz o de cualquier otro fenómeno que pudiese funcionar como señal —y de hecho, la física newtoniana asumió que la velocidad de la luz y la de la gravedad o atracción son infinitas.

Vimos arriba que el motivo por el cual Einstein emprende un examen de las nociones de simultaneidad y distancia es para resolver la contradicción entre la ley de la velocidad constante de la luz y el principio de la relatividad. La solución *conceptual* a esta contradicción, ie. la posibilidad de afirmar que la velocidad de la luz es absoluta, o sea la misma para todo marco inercial, es la siguiente. Es posible pensar que la velocidad de la luz sea la misma para *cualquier* sistema (inercial) de referencia, ya sea que esté en reposo o en movimiento, si es que se miden de distinta manera las distancias y los tiempos (ie. el mismo intervalo espacial o temporal tiene distinta magnitud para cada sistema inercial distinto), y por lo cual puede resultar que la división entre la distancia y el tiempo den siempre el mismo resultado, *c*, para cualquier sistema inercial. O sea, para hacer absoluta la velocidad de la luz (ie.

la misma para todo marco inercial) hay que relativizar las distancias y los tiempos a cada marco inercial, con el fin de que la división de ellos dé siempre *c*. Hemos visto con el ejemplo einsteniano del tren que dado el supuesto de la velocidad finita de la luz, la distancia y el tiempo de hecho son relativos a cada marco inercial.

Si bien esta explicación conceptual de la posibilidad de absolutizar la velocidad de la luz, relativizando las distancias y los tiempos, es muy aclaradora, sin embargo, no nos ofrece el aparato matemático adecuado para lidiar cuantitativamente con las nuevas nociones de espacio y tiempo relativos. Veamos brevemente la solución matemática einsteiniana a la contradicción entre la ley de la constancia de la luz y el principio de relatividad, ie. la posibilidad matemática de absolutizar la velocidad de la luz.

Einstein sostiene que la contradicción desaparece si para la conversión de las coordenadas espaciales y temporales de un sistema inercial a otro se utilizan las transformaciones de Lorentz, en vez de las galileanas de la mecánica newtoniana. (Einstein, "Notas Autobiográficas", 14, p. 103); transformaciones que a su vez implican una ley de composición de velocidades distinta al teorema newtoniano o clásico de la adición de velocidades (3, p. 265) —recuérdese que era este teorema clásico el que generaba la contradicción en cuestión.

Las ecuaciones de Maxwell, que describen los fenómenos electromagnéticos, sólo son verdaderas para todo marco de referencia inercial si es que para calcular las coordenadas espaciales y temporales de un cuerpo en un sistema inercial *S* a partir de las coordenadas que tiene en *S'* se utilizan una serie de ecuaciones llamadas transformaciones de Lorentz. (15, p. 53). O en otros términos, las ecuaciones de Maxwell sólo resultan invariantes bajo las transformaciones de Lorentz (2, p. 79; 4, p. 136; Einstein, "Notas Autobiográficas", 14, p. 104). Dado que, como vimos arriba, la constancia de la velocidad de la luz es una consecuencia necesaria de las ecuaciones de Maxwell, es claro que las transformaciones de Lorentz, al garantizar la verdad de las ecuaciones de Maxwell en todo sistema inercial, garantizarán también que la velocidad de la luz sea la misma en todo sistema inercial. Así, son las transformaciones de Lorentz las que garantizan que la velocidad de la luz sea absoluta; o sea, Einstein resuelve matemáticamente la contradicción entre la ley de la constancia de la luz y el principio de relatividad sustituyendo las transformaciones galileanas (y el teorema clásico de la adición de velocidades)

por las transformaciones de Lorentz (y consecuentemente, otro teorema de composición de velocidades) (Einstein, "Notas Autobiográficas", 14, p. 103).

Vimos arriba que Einstein proponía hacer absoluta la velocidad de la luz sustituyendo las distancias y tiempos absolutos de la mecánica newtoniana por distancias y tiempos relativos. Esta relación conceptual se encuentra retomada matemáticamente en las transformaciones de Lorentz, ya que la aplicación de éstas da por resultado el que las medidas de distancia y tiempos se vean afectadas por el movimiento relativo de los marcos de referencia inerciales. En efecto, si aplicamos las transformaciones de Lorentz para calcular la distancia que tiene una vara en  $S'$  (sistema inercial en movimiento relativo a  $S$ ) resultará que esa distancia es menor que la que tiene dicha vara medida con respecto a  $S$ , o sea, las distancias se "contraen" medidas desde los sistemas en movimiento; pero como el movimiento entre  $S$  y  $S'$  es relativo, igualmente se puede considerar que  $S'$  está en reposo y  $S$  en movimiento relativo a  $S'$ , y en este caso la aplicación de las transformaciones de Lorentz da por resultado el que la vara tenga una menor distancia con respecto a  $S$  que con respecto a  $S'$  (3, pp. 247-8). Así, el uso de las transformaciones de Lorentz da por resultado el que las distancias sean relativas a los sistemas inerciales de referencia; y dichas transformaciones permiten calcular cuantitativamente la magnitud de la contracción de las distancias con respecto a marcos inerciales en movimiento. Igualmente, el uso de las transformaciones de Lorentz da por resultado el que los tiempos sean relativos a los marcos inerciales, ya que en referencia a los sistemas inerciales en movimiento los tiempos se dilatan (o sea, los relojes se atrasan) en magnitudes determinadas calculables a partir de dichas transformaciones.

Destaquemos aquí que si bien las transformaciones de Lorentz se obtienen a partir de las ecuaciones de la electrodinámica, lo que hace Einstein es sostener que las transformaciones de Lorentz han de aplicarse no sólo en la electrodinámica, sino también en la mecánica (4, p. 145; 9, p. 331), con lo cual (i) Einstein sustituye la mecánica newtoniana por una teoría de la relatividad fundada en la electrodinámica (Einstein, "Notas Autobiográficas", 14, p. 100; 6, p. 84), y (ii) las nociones de distancia y tiempo se tornan relativas no sólo en la teoría electrodinámica, sino en toda la física.

Estos desarrollos matemáticos de Einstein sacan a luz el que las transformaciones galileanas y el teorema clásico de la adición de velocidades de la mecá-

nica newtoniana están fundados en distancias y tiempos absolutos (ie. en intervalos espaciales y temporales que tienen la misma magnitud con respecto a cualquier sistema inercial) (6, p. 30; 4, p. 161). En efecto, las transformaciones galileanas son las siguientes:

Sea  $S'$  un sistema o conjunto de coordenadas inercial en movimiento uniforme y rectilíneo relativo a  $S$  con velocidad  $v$ , y en el sentido del eje  $x$ , entonces las coordenadas en un punto  $p$  con respecto a  $S'$  se calculan a partir de las coordenadas de  $P$  en  $S$  de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$x' = x - vt, y' = y, z' = z, t' = t \quad (3, p. 71)$$

Lo que la fórmula  $x' = x - vt$  nos dice es que se calculará la posición de  $P$  para  $S'$  sustrayendo a la posición que  $P$  tiene en  $S$  la distancia que ha recorrido el sistema  $S'$  durante cierto tiempo y dada cierta velocidad. Obviamente, esta adición de distancias sólo es posible si se presupone que las distancias son absolutas, o sea, que los intervalos espaciales conservan la misma magnitud ya sea que se los refiera a  $S$  o a  $S'$ . Igualmente, para las transformaciones galileanas los tiempos son absolutos en tanto que el movimiento no los afecta, como puede apreciarse por el hecho de que  $t' = t$ . En cambio, en las transformaciones de Lorentz, en donde no se presupone que las distancias y los tiempos son absolutos, se incluye la velocidad de la luz<sup>3</sup>,  $c$ , ya que, como hemos visto, es ésta la que relativiza las distancias y tiempos a los marcos:

$$x' = \frac{x - vt}{1 - \frac{v^2}{c^2}}, y' = y, z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (3, p. 236)$$

(Cabe notar que para velocidades bajas en relación a  $c$ , las transformaciones de Lorentz dan los mismos resultados que las galileanas. (4, p. 136).

El teorema clásico de la adición de velocidades también presupone las nociones de distancias y tiempos absolutos ya que si lo que dice este teorema es que  $u = w + v$  (donde  $u$  es la velocidad de un cuerpo respecto de  $S'$ ;  $v$ , la velocidad relativa de  $S'$  y  $w$  la velocidad de ese cuerpo respecto de  $S$ ), dicho teorema presupone que los espacios y tiempos en ambos sistemas inerciales  $S$  y  $S'$  tienen la misma magnitud, o sea, que se puede usar el mismo sistema de medidas en

ambos sistemas, y por lo cual se pueden adicionar sin más las velocidades, o sean, los productos de las divisiones entre tiempos y espacios.

Para resumir lo expuesto hasta aquí, la teoría especial de la relatividad saca a luz el hecho de que en la teoría newtoniana las nociones de distancia y tiempo absolutos, si cumplen una función fundamental, ya que, por una parte, requieren que algunos procesos naturales ocurran con velocidad infinita, y por otra parte, y crucialmente, son nociones presupuestas por las transformaciones galileanas (y por el teorema clásico de adición de velocidades), las cuales son esenciales a la mecánica newtoniana porque son ellas las que hacen posible que resulten válidas las leyes de dicha mecánica para cualquier marco inercial de referencia.

Preguntemos ahora qué nos puede decir la teoría especial de la relatividad con respecto a el espacio y el tiempo entendidos como entidades que contienen o que son la arena en la cual ocurren los fenómenos espaciales y temporales. Para esto, recordemos que para la relatividad especial las distancias y tiempos son relativos al movimiento, lo cual significa que no se cuenta con un sistema de mediciones espaciales y temporales común a todos los marcos inerciales de referencia. Sin embargo, la situación no es desesperada, ya que Einstein y Minkowski encontraron que hay una manera de medir la separación entre dos objetos, denominada "intervalo einsteiniano entre dos eventos", tal que dicho intervalo es el mismo para todo marco inercial de referencia (4, p. 102; 15, p. 39). Lo fundamental de este intervalo es que está especificado por cuatro números, tres de los cuales representan coordenadas espaciales, y el otro la coordenada temporal; pero, cuáles de estos números representan coordenadas espaciales y cuál una coordenada temporal depende de cuál es el marco inercial de referencia particular para el cual se quiere distinguir los cuatro números del intervalo en 3 coordenadas espaciales y una temporal (9, p. 322). Así pues, si bien para la relatividad especial los intervalos espaciales y los temporales son relativos al marco inercial de referencia, los intervalos einsteinianos *espacio-temporales* no son relativos a los marcos inerciales de referencia, sino los mismos para todo marco inercial, ie. son absolutos.

Los intervalos einsteinianos son intervalos entre puntos del espacio-tiempo de Minkowski. El espacio-tiempo de Minkowski es una multiplicidad diferenciable de cuatro dimensiones con una métrica pseudo-euclídea determinada por la definición del intervalo einsteiniano

(<sup>5</sup>, p. 292; <sup>9</sup>, p. 332). O sea, lo que hace Einstein es sustituir el espacio, con una estructura euclídea, y el tiempo, con una estructura continua representable por la recta de los números reales, por otro aparato matemático, el espacio-tiempo de Minkowski, cuya estructura métrica es pseudo-euclídea. Nótese que el espacio-tiempo de Minkowski no es la simple conjunción del espacio y tiempo clásicos, ya que no sólo la métrica cambia sino también la descripción de los intervalos: para la concepción clásica, el intervalo espacial y el temporal son absolutos, mientras que para el espacio-tiempo de Minkowski los anteriores resultan relativos y lo único absoluto son los intervalos espacio-temporales entre dos puntos de dicho espacio-tiempo.

Dado que los intervalos espaciales y temporales de la mecánica newtoniana son relativos para la teoría especial de la relatividad, también para esta teoría hay que dar una interpretación relacional del espacio y el tiempo newtonianos, entendidos éstos como estructuras caracterizables matemáticamente, ya que el sistema de medición al que dan lugar varía con el movimiento de los marcos inerciales de referencia.

Preguntemos ahora si el espacio-tiempo de Minkowski es relativo o absoluto, o sea, si ha de concebirse como el conjunto de todas las relaciones espacio-temporales que generan los cuerpos o masas entre sí, o si ha de concebirse como una entidad con existencia propia en tanto que su estructura no está determinada por la materia, o por cualquier evento que ocurra en él. Podemos decir que la interpretación más adecuada es la de considerar al espacio-tiempo de Minkowski como absoluto, ya que su estructura métrica no está determinada por ningún suceso físico (<sup>4</sup>, p. 102; <sup>5</sup>, p. 294; <sup>16</sup>, p. 206). En efecto, el espacio-tiempo de Minkowski da lugar a un sistema de medidas único —el intervalo einsteiniano— que puede aplicarse en cualquier marco inercial de referencia independiente del movimiento de éste o de la distribución de masas dentro de un marco de referencia o en el universo; y es por ello que dicho espacio-tiempo se ha de considerar como una entidad cuya estructura métrica es independiente de los sucesos que en ella ocurran, i.e., como absolutos.

Alguien podría objetar a esto que lo que Einstein muestra es que la velocidad finita y constante de la luz es la que determina que el espacio-tiempo tenga la estructura que tiene (i.e. la descrita por la teoría de Minkowski), o sea, que son ciertos fenómenos físicos los que determinan la estructura del espacio-tiempo, y por ende que el espacio-tiempo no es lo

absoluto, i.e. no es una entidad cuya estructura sea independiente de los eventos físicos. Frente a esta objeción debemos aclarar que el hecho de que se usen ciertos datos de una teoría física para determinar cuál es la geometría del espacio o espacio-tiempo es una cuestión distinta a la cuestión ontológica de si el espacio o espacio-tiempo es absoluto o relacional. En efecto, dada la existencia de varias geometrías (euclídeas y no-euclídeas), el problema respecto de cual de éstas describe el espacio real (y no sólo el matemático), es un problema físico: una vez que se han establecido correspondencias entre los términos geométricos (p.j. línea recta, sistema de coordenadas, etc.) y ciertos hechos físicos, es la teoría física la que puede descubrir cual de las geometrías es la verdadera, o sea, es la que describe la estructura espacial o espacio-temporal del universo. Empero, esto no necesariamente quiere decir que son los fenómenos físicos los que *determinan* que el espacio o espacio-tiempo tengan cierta estructura, sino tan sólo que, dado el hecho de que el espacio o espacio-tiempo son inobservables, y dada la existencia de varias geometrías alternativas, el *descubrimiento* de cual es la geometría del espacio real se torna en un problema empírico, o sea, en un problema donde hay que investigar las propiedades espaciales o espacio-temporales de los eventos materiales. Ahora bien, una vez determinada así la estructura geométrica del espacio-tiempo, cabe preguntarse si el espacio-tiempo es absoluto o relacional. El dato crucial, al menos si uno quiere utilizar los resultados de las teorías científicas, para resolver esta pregunta es el de si intervienen o no variables que refieren a fenómenos físicos en la descripción matemática del espacio-tiempo. Dado que no intervienen dichas variables en la teoría especial de la relatividad (o más específicamente, en la teoría de Minkowski que ésta utiliza), generalmente se ha dado una interpretación absolutista del espacio-tiempo de dicha teoría, por resultar esta la más natural o menos forzada. En cambio, en la teoría general de la relatividad parecería ser que para determinar matemáticamente la métrica del espacio-tiempo hay que tomar en cuenta la distribución de la materia-energía en el universo, y por lo tanto, es esta teoría la que ofrece una mayor evidencia en favor de una interpretación relacional del espacio-tiempo. Veamos pues, brevemente, lo que la relatividad general dice sobre este punto.

La teoría general de la relatividad se caracteriza por extender el principio de relatividad a todos los marcos de referencia, ya sean inerciales o no; o dicho en otros términos, se caracteriza porque

las leyes de esta teoría son válidas para cualquier marco de referencia (y no sólo para los marcos inerciales, como en el caso de la relatividad especial) (<sup>2</sup>, p. 113; <sup>4</sup>, p. 105; <sup>6</sup>, p. 68; <sup>16</sup>, p. 211).

Einstein sostuvo que "De acuerdo con la teoría general de la relatividad, las propiedades geométricas del espacio no son independientes, sino que están determinadas por la materia". (<sup>6</sup>, p. 113). O sea, Einstein considera que la relatividad general satisfacía el principio de Mach, que Einstein lo interpretó como el principio de que la métrica del espacio-tiempo está completamente determinada por la distribución de la materia-energía (<sup>5</sup>, p. 301; <sup>7</sup>, p. 527).

La manera en que la materia-energía determina la métrica del espacio-tiempo es a través de los campos gravitatorios. La distribución de la materia-energía en una cierta región determina el que exista en esta región un campo gravitatorio específico, y éste, a su vez, se exhibe en, o se identifica con la métrica del espacio-tiempo (<sup>9</sup>, p. 335; <sup>16</sup>, pp. 72 y 215). Esta idea está expresada matemáticamente en el hecho de que la métrica del espacio-tiempo en cierta región se determina por medio de las ecuaciones einsteinianas del campo gravitatorio, que son ecuaciones diferenciales que relacionan la función gravitatoria en dicha región con el tensor de esfuerzo de energía que describe la distribución de la masa-energía a través de la región (siendo la función gravitatoria la que determina la métrica del espacio-tiempo en esa región) (<sup>5</sup>, p. 294; <sup>7</sup>, p. 527; <sup>16</sup>, p. 215). Es de notarse que, dado que el campo gravitatorio varía en una misma región, la métrica del espacio-tiempo en esa región también varía (<sup>5</sup>, p. 293; <sup>16</sup>, p. 228), o sea, el espacio-tiempo de la relatividad general no es homogéneo.

La idea einsteiniana de que el campo gravitatorio en cierta región se exhibe o identifica con la métrica del espacio-tiempo significa que en vez de explicar los movimientos como el resultado de la acción del campo gravitatorio, se explicarán como debidos al hecho de que el espacio-tiempo en esa región exhibe una determinada métrica. Por ejemplo, en vez de explicar el movimiento orbital de un planeta como causado por la atracción gravitacional que el sol ejerce sobre el planeta, se dirá que este movimiento tiene ciertas propiedades (como el ser elíptico, acelerado, etc.) por ocurrir en una región espacio-temporal que tiene cierta métrica (<sup>9</sup>, p. 326) —para entender mejor esta última afirmación, piénsese en un objeto que se mueve dentro de una esfera: su movimiento será necesariamente circular porque el objeto se mueve en un espacio curvo. La razón

por la cual Einstein buscó representar geoméricamente el campo gravitatorio (ie. identificar el campo gravitatorio con la métrica del espacio-tiempo) es la siguiente. Recuérdese que en el caso de la teoría especial de la relatividad, Einstein logró extender el principio de relatividad para incluir la teoría electrodinámica haciendo que las medidas espaciales y temporales fuesen afectadas por el movimiento de los marcos inerciales de referencia. En el caso de la teoría general va a utilizar la misma estrategia: para lograr que las leyes de la física sean válidas para marcos inerciales y para marcos acelerados de referencia, hay que hacer que el sistema de medidas espacio-temporales (ie. la métrica del espacio-tiempo) se vea afectado por el movimiento acelerado. Ahora bien, dado que uno de los supuestos fundamentales de la teoría general es que hay una equivalencia local entre los marcos acelerados y los campos gravitatorios (ie. generan los mismos efectos) (6, p. 68), en vez de hacer que el sistema de medidas espacio-temporal dependa de, y varíe de una manera definida con respecto a los marcos acelerados, lo hace con respecto a los campos gravitatorios.

El campo gravitatorio afecta de la siguiente manera la métrica del espacio-tiempo. Donde no hay campos gravitatorios (ie. lejos de los objetos masivos), la geometría métrica de dicha región es la geometría pseudo-euclídeana de Minkowski (ie. es la geometría de la teoría espacial), que es una geometría plana (ie. la luz se propaga en líneas rectas que se comportan de acuerdo a los axiomas de Euclides). En cambio, en las regiones donde hay un campo gravitatorio generado por la presencia de la materia, el espacio-tiempo se vuelve curvo (o sea, que la luz no se propaga en línea recta), con lo cual el espacio-tiempo en esa región deja de ser euclídeo y se lo puede describir adecuadamente con la geometría de Reiman (2, p. 113; 16, p. 62). La manera específica en que la presencia de la materia determina la "curvatura" del espacio-tiempo está dada por las ecuaciones einsteinianas del campo gravitatorio.

Algunos autores (cf. 5, pp. 287 y 314; 7, p. 527; 17, p. 506) han considerado que la teoría general de la relatividad implica que el espacio-tiempo no es absoluto, no tiene una existencia independiente, sino relacional, porque la curvatura de las distintas porciones del espacio-tiempo está producida por la cantidad y distribución de la materia-energía en esas porciones. Sin embargo, otros autores han dado buenas razones para sostener que el espacio-tiempo de la teoría general es absoluto. La razón principal (para otras razones cf. 16, pp. 212-31

consiste en establecer que la distribución de la masa-energía no logra determinar por completo la métrica del espacio-tiempo, y que por ende, ha de considerarse que la teoría general prueba que la presencia de la masa-energía, ie. el campo gravitatorio, tan sólo modifica la estructura métrica del espacio tiempo. La presencia de la masa-energía no determina por completo la métrica del espacio-tiempo por las siguientes dos razones. En primer lugar, las ecuaciones einsteinianas del campo gravitatorio, dada cierta distribución de la masa-energía, son compatibles con varias estructuras métricas del espacio-tiempo; para seleccionar a una sola de ellas se requiere imponer condiciones límite al infinito, que usualmente consisten en que el espacio-tiempo en regiones muy lejanas a cualquier masa es del tipo de Minkowski (7, p. 527; 16, pp. 215-6). En segundo lugar, aún cuando Einstein modificó (1916) las ecuaciones de campo para evitar el que su solución requiriese imponer condiciones límite, estas nuevas ecuaciones, al igual que las anteriores, daban por resultado el que el espacio-tiempo tuviera una métrica definida en regiones carentes de materia (7, p. 528). Estas dos razones muestran que la métrica del espacio-tiempo no está determinada por completo por la masa-energía, como pretendería un relacionista (como Mach), sino que más bien parecería que el espacio-tiempo tiene una estructura métrica propia (y que es la que tiene en las regiones carentes de materia), aunque esta estructura se ve afectada o modificada por la presencia de la materia. Esto significa que el espacio-tiempo de la teoría general es absoluto, ie. tiene una estructura propia, pero que, a diferencia del espacio o espacio-tiempo de las teorías newtoniana y relatividad especial, el espacio-tiempo guarda ciertas relaciones causales con la materia.

Lo que hemos querido demostrar con el examen de algunos aspectos de las teorías especial y general de la relatividad es que tiene un sentido muy claro el decir que el espacio (o espacio-tiempo) es absoluto: quiere decir que tiene una estructura geométrica independiente de la existencia y características de la materia. Esto, a su vez, tradicionalmente se ha considerado que implica que el espacio es una entidad (sentido ontológico de "absoluto") ya que lo más natural es considerar que dicha estructura tiene que ser estructura de algo —o sea, el paso de la determinación de una estructura autónoma a la existencia de una entidad presupone la tesis filosófica (típica de las posiciones "substancialistas") de que toda propiedad característica o estructura lo es de una entidad (cf. 1, E.,

v., nota a 36-48, p. 120). En cambio, lo que la teoría relacional del espacio afirma, si es que pretende ser una tesis filosófica susceptible de tener pruebas empíricas, o más precisamente, científicas, a su favor, es que el espacio no es una entidad porque la estructura está determinada por la materia, o sea, el espacio es tan sólo el conjunto de aquellas relaciones especiales que la materia produce (ie. el espacio no es sino un efecto de la materia). Dadas estas definiciones, no existe hasta hoy día ninguna teoría científica en la que el espacio resulte claramente relacional.

## Conclusión

Hemos visto que el concepto de espacio absoluto tiene dos funciones dentro de la física newtoniana.

La primera de ellas pertenece al campo de la fundamentación conceptual de la mecánica y consiste en explicar la relación a qué ocurre el movimiento absoluto. Newton postuló la existencia del movimiento absoluto a partir del dato científico de que hay una conjunción constante entre movimientos acelerados y fuerzas inerciales. Destacamos que hay en el argumento newtoniano una serie de interpretaciones, algunas de ellas fundadas en tesis filosóficas. Estas son (i) la afirmación de que es el movimiento acelerado el que *causa* las fuerzas inerciales; (ii) esto se interpreta como significando que el movimiento acelerado es real e independiente de la materia, o sea, que es absoluto; (iii) dado que todo movimiento es 'relativo' (tesis filosófica), el movimiento absoluto debe de ser con respecto a algo absolutamente inmóvil e independiente de la materia, o sea, debe ser con respecto al espacio absoluto (entidad que se postula a partir de la ciencia filosófica de que toda estructura (definida en este caso por las propiedades de ser absolutamente inmóvil e independiente de la materia) lo es de alguna entidad).

Examinamos varias contrapropuestas relacionales al espacio absoluto, y cuyo propósito era dar una interpretación del movimiento acelerado tal que no lo hiciera absoluto. La contrapuesta más interesante es la de Mach, pero en tanto que ésta implica una mecánica distinta a la newtoniana, que no se ha desarrollado aún, dicha contrapuesta no está hoy día bien fundada.

Examinamos la tesis relacional de que se puede sustituir el espacio absoluto por los marcos inerciales de referencia, con respecto al campo de aplicación válida de las leyes newtonianas, y encontramos que dicha tesis no resulta aceptable en tanto no permite dar una

explicación conceptual de la diferencia entre marcos inerciales y marcos acelerados de referencia.

A partir del examen de la teoría especial de la relatividad, encontramos que el concepto de espacio absoluto cumple una función explicitadora de ciertos aspectos matemáticos cruciales para la física clásica. Esta consiste en que el decir que el espacio absoluto, i.e. que la estructura geométrica, o más precisamente, la métrica del espacio, es independiente de la materia, implica que los intervalos espaciales (y los temporales) son absolutos, i.e. los mismos para todo marco de referencia. Esta absolutidad de las distancias (y tiempos) está presupuesta por las transformaciones galileanas y el teorema clásico de la adición de velocidades, que son el aparato matemático que permite afirmar la invariancia (o validez) de las leyes newtonianas para cualquier sistema inercial.

A partir del examen del espacio-tiempo en la teoría especial y general de la relatividad encontramos que lo que significa afirmar que el espacio (o espacio-tiempo) es absoluto es que el espacio es una entidad con una estructura geométrica no determinada por la materia o por los fenómenos físicos, de tal forma que sostener que el espacio es relacional consistiría en demostrar que la estructura geométrica que lo caracteriza está determinada por los fenómenos físicos —demostración que no parece realmente dar la teoría general einsteiniana.

Lo que hemos querido mostrar en este trabajo es que el concepto de espacio absoluto tiene un sentido muy claro, y que es un concepto que de hecho cumple al menos dos funciones dentro de la física: una pertenece al campo de los fundamentos conceptuales de la mecánica y que consiste en (a) aclarar conceptualmente la distinción entre movimiento inercial y acelerado y (b) en determinar cuál es el marco para el cual son válidas las leyes newtonianas; y la otra función aclara ciertos aspectos matemáticos, a saber, explicita que la geometría métrica que se usa en la física es independiente de los eventos físicos.

#### Notas

- 1 El sentido metafísico-teológico del concepto de espacio absoluto aparece en el Scholium General de los *Principia* y en algunos de los "Query" de la *Optica*. También aparece, de manera muy clara y explícita, en la Correspondencia entre Leibniz y Clarke, donde Clarke representa la posición newtoniana. El sentido metafísico del concepto de espacio absoluto ha sido expuesto magistralmente por Koyré. 10, 11.  
La idea básica de Newton es que el espacio debe ser absoluto, i.e. una entidad que existe independientemente de la ma-

teria, porque sólo así es pensable un espacio vacío, al cual se requiere para pensar en la existencia de átomos y fuerzas de acción a distancia. Esta tríada de conceptos —espacio absoluto, átomos y fuerzas de acción a distancia— a su vez remite a una concepción particular de Dios. Dios, ante todo, es omnipotente; y por tanto, necesita gobernar constantemente el mundo que creó —gobierno que puede ser ordinario, o a través de las fuerzas de acción a distancia, o extraordinario, reformando el mundo. Para ejercer su dominio sobre el mundo, Dios necesita estar constantemente presente en el mundo; Dios es omnipresente al mundo en tanto que el espacio es un atributo, o un "efecto emanativo" de Dios. Idea a la que alude Newton al sostener que el espacio es como el *sensorium* (i.e. el lugar de la sensación) de Dios. Este espacio, atributo o efecto de Dios, es absoluto en tanto que es tan infinito y eterno como Dios. (Para un mayor desarrollo, cf. los textos mencionados arriba y E. Nathan, "Newton y la controversia sobre el materialismo" por publicarse en las *Memorias del Tercer Coloquio Nacional de Filosofía*).

- 2 Todo movimiento acelerado (que puede ser lineal, en caso de que la velocidad no sea uniforme sino que cambia constantemente, o circular, en caso de que sea la dirección la que cambia constantemente) produce fuerzas. En el caso de la aceleración lineal se producen fuerzas como las que experimenta un pasajero de un tren que arranca o frena súbitamente (16, p. 184). En el caso de la aceleración circular, o rotación, dicho movimiento genera fuerzas centrífugas (que jalan hacia afuera el objeto que se mueve) y fuerzas de Coriolis (que operan lateralmente sobre el objeto que se mueve); p.j. las fuerzas de Coriolis generan el movimiento ciclónico y anticiclónico de nuestra atmósfera (16, p. 190). A estas fuerzas que son el resultado o efecto de los movimientos acelerados, se las llama fuerzas inerciales o aparentes; lo característico de ellas es que son el efecto de un movimiento acelerado y no el resultado de la interacción de las partes o masas del sistema que se mueve (16, p. 210).
- 3 La teoría especial de la relatividad ha sido criticada por basar los conceptos de espacio y tiempo en la ley de propagación de la luz. Frente a esta crítica, Einstein sostuvo que "Con el fin de darle un significado físico al concepto de tiempo, se requiere apelar a procesos de algún tipo para poder establecer relaciones entre distintos lugares. Es inmaterial qué tipo de procesos uno escoja para dicha definición del tiempo. (...) Sin embargo, es ventajoso, para la teoría, escoger sólo aquellos procesos respecto de los cuales sabemos algo de cierto. Esto se cumple para la propagación de la luz en el vacío en un grado mayor que para cualquier otro proceso que pueda ser considerado". (citado en 2, pp. 182-3). Así, para establecer vía un argumento conceptual que la distancia y el tiempo son nociones relativas, se requieren tan sólo que los procesos naturales que pueden funcionar como transmisores de señales, ocurran a velocidades finitas, como vimos en el ejemplo einsteiniano del tren. Ahora bien, la idea de Einstein es que todos los procesos naturales ocurren con velocidad finita; en particular, considera que la teoría electrodinámica de Maxwell y Faraday demuestra que toda acción a distancia se propaga con una velocidad finita (6, p. 48). Por otra parte, para desarrollar un aparato matemático es indispensable deter-

minar cuál es la velocidad finita que se ha de tomar en consideración; Einstein escogió la velocidad de la luz, no sólo por ser ésta "conocida con certeza" (i.e. bien fundada experimental y teóricamente), ya que la ley de la velocidad constante de la luz es parte de la teoría electromagnética, y ésta ofrecía resultados interesantes y generalizables, y porque la luz es la señal que más rápido se propaga en el vacío (Grunbaum, "La génesis de la teoría especial de la relatividad", 14, p. 120).

- 4 Vimos en la Sección I que la tesis de Mach es que las fuerzas inerciales están determinadas por la distribución de la materia. La razón por la cual Einstein pudo interpretar esta tesis como el principio de que la métrica del espacio-tiempo está determinada por la distribución de la materia-energía es que para la teoría general de la relatividad, la métrica del espacio-tiempo va a determinar los efectos inerciales del movimiento de un cuerpo (18, p. 219), y dado que dicha métrica está determinada por la distribución de la materia-energía, resulta que es ésta la que determina en última instancia los efectos inerciales.

#### BIBLIOGRAFÍA

- 1 Alexander, H. G. (ed.) *The Leibniz-Clarke Correspondence*. Barnes & Noble, 1978.
- 2 Bernstein, J. *Einstein*. Glasgow: Fontana, 1980.
- 3 Born, M. *Einstein's Theory of Relativity*. Nueva York: Dover Publications, Inc. 1965.
- 4 d'Abro, A. *The Evolution of Scientific Thought, from Newton to Einstein*. 2a. ed. Nueva York: Dover Publications, Inc. 1950.
- 5 Earman, J. "Who's afraid of Absolute Space?", *Australasian Journal of Philosophy*, vol. 48, No. 3, Dic. 1970.
- 6 Einstein, A. *Relativity, the Special and General Theory*. Nueva York: Crown Publishers, Inc. 1961.
- 7 Grunbaum, A. "The Philosophical Retention of Absolute Space in Einstein's General Theory of Relativity", *Phil. Review*, Vol. 66, 1957.
- 8 Hincckuss, I. *The Existence of Space and Time*. Oxford: Clarendon Press, 1976.
- 9 Hobson, E. W. *The Domain of Natural Science*. Nueva York: Doun Publications, Inc. 1968.
- 10 Koyré, A. *From the Closed World to the Infinite Universe*. Baltimore: John Hopkins University Press. 1957.
- 11 Koyré, A. *Newtonian Studies*. The University of Chicago Press. 1965.
- 12 Newton, I. *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Tr. de Motte y Calori. Berkeley: University of California Press. 1962.
- 13 Newton, I. *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton*. Ed. por A. R. Hall y M. B. Hall. Cambridge University Press. 1962.
- 14 Pearce, L. (ed.) *1 La teoría de la relatividad*. Madrid: Alianza Editorial. 1981.
- 15 Russell, B. *The ABC of Relativity*. Nueva York: Mentor Book. 1959.
- 16 Sklar, L. *Space, Time and Space Time*. Berkeley: University of California Press. 1977.
- 17 Smart, J. J. C. "Space" en *Encyclopedia of Philosophy*, ed. por Edwards, Vol. 7. Nueva York: The Macmillan Co. 1967.
- 18 Snow, A. J. *Matter and Gravity in Newton's Physical Philosophy*. Nueva York: Arno Press. 1976.

# Johanes Keplepler

## (1521-1630)

LUIS RIVERA TERRAZAS



Johanes Kepler (1571-1630).

Entre los más destacados impulsores del pensamiento científico de principios del S. XVII, Kepler ocupa un lugar relevante.

Desde un principio se declaró abierto y decidido partidario de la nueva cosmología heliocéntrica de Copérnico, dedicando todos sus esfuerzos científicos a demostrar la validez de la mencionada teoría y a combatir las impugnaciones que sus detractores habían levantado en su contra.

Debemos recordar que cuando en 1543 Copérnico saca a luz su obra fundamental, llamada *Revolutionibus Orbium*, imperaba en forma absoluta y total la vieja idea Aristotélica de un Univer-

so constituido por una serie de esferas sólidas cristalinas, a las cuales se adherían los planetas, el sol, la luna y las estrellas, y las cuales realizaban diariamente un movimiento de rotación en torno a la Tierra, considerada fija en el centro del Universo. Además de este movimiento diurno las esferas ejecutaban diferentes tipos de movimientos con objeto de representar las traslaciones de los planetas contemplados desde la Tierra.

Sin rechazar el sistema cosmológico Aristotélico de las esferas cristalinas Ptolomeo (S. II d.C.) astrónomo griego de Alejandría, había introducido un sistema complicado de círculos sobre los cuales se movían los planetas (excéntricos, deferentes, epiciclos, etc.) y mediante los cuales se podían determinar y predecir las posiciones futuras de los planetas.

Para Ptolomeo dicho sistema de círculos era sólo un recurso matemático de cálculo sin tener una realidad objetiva.

El sistema astronómico aristotélico Ptolomaico tenía en el siglo XVI, cuando Copérnico lo transformó, más de 20 siglos de vigencia y había arraigado profundamente en el pensamiento científico de Europa Occidental.

No solo este sistema tenía implicaciones científicas, sino que sobre todo se había transformado, con el tiempo, en un sistema religioso, adaptado al pensamiento teológico de la época.

Para entender esto con claridad basta leer el poema de Dante Alighieri "La Divina Comedia" donde junto con las proposiciones de tipo cosmológico se encuentran las de tipo religioso, como lo son las ubicaciones tanto del cielo, como del infierno, pasando por el purgatorio. Y si se escarba un poco más veremos que al sistema de marras también se le pueden determinar componentes de tipo político y social, ya que la estructura jerárquica de la Sociedad feudal encajaba perfectamente bien en la estructura jerárquica del Universo Aristotélico, dividido en dos renglones: la sublunar donde reina la imperfección y la corrupción, y la traslunar que es el reinado de la perfección de la eternidad, y de la pureza.

Así pues, es a este mundo tan embrollado, tan complejo por la multitud de implicaciones extra científicas, al que se

tienen que enfrentar pensadores tan eminentes como *Copérnico* (1473-1543) *Galileo* (1564-1642) y *Kepler*.

La lucha, como es sabido, fué ruda, siendo Galileo sobre quien se descargan los rayos de la tempestad de la Inquisición Romana.

Kepler se inicia profesionalmente en 1596, cuando aparece su primer libro que lleva por título "Misterio Cosmográfico", cuyo propósito es demostrar la validez de la teoría heliocéntrica y para ello emplea un argumento basado en el número de los planetas.

Desde el punto de vista del sistema de Ptolomeo existían 7 planetas a saber: Luna, Mercurio, Venus, Sol, Marte, Júpiter y Saturno.

Pero adoptando el sistema Copernicano el número se reduce a 6: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno, lo que hace decir a Kepler que "Dios creo un Universo con seis planetas porque sólo hay cinco sólidos regulares, o poliedros", los cuales eran conocidos desde la época de Platón. (ver tabla)

| Poliedro   | Caras      | No. de Caras |
|------------|------------|--------------|
| Tetraedro  | Triángulos | 4            |
| Cubo       | Cuadrados  | 6            |
| Octaedro   | Triángulos | 8            |
| Dodacaedro | Pentágonos | 12           |
|            | Regulares  |              |
| Icosaedro  | Idem       | 20           |

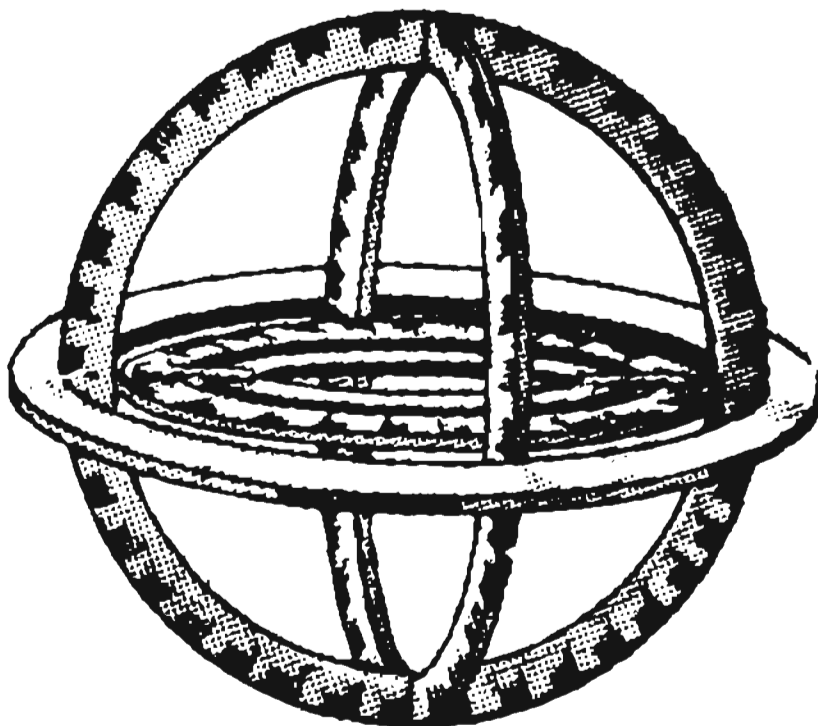
La relación entre planetas y poliedros aparece de una forma realmente sorprendente por la mezcla que hace Kepler de consideraciones científicas y extra científicas.

Desde su punto de vista filosófico, tanto Copérnico como Kepler fueron Neoplatónicos y por lo tanto sostenían, por lo menos en esa temprana época, que el Universo había sido creado de acuerdo con principios estrictamente geométricos que revelaban de esta manera la armonía interna de la estructura universal.

Fué dentro de este marco que Kepler estableció lo que él consideró su método de determinación de las magnitudes o tamaños de las esferas planetarias.

Tomando como punto de partida la esfera de Saturno, Kepler procede a inscribirle un cubo, de manera que el radio de la esfera inscrita al cubo, es igual al radio de la esfera de Júpiter. Si a la esfera de Júpiter así determinada le inscribimos ahora un tetraedro, a éste le inscribimos ahora una tercera esfera, esta será igual a la esfera de Marte, y así sucesivamente con el resto de los poliedros.

Resulta inconcebible esta extraña forma de pensamiento científico, pero en descargo de Kepler podemos decir que



Primer Intento de Kepler de interpretar el movimiento planetario, de *De Harmonice Mundi*, Linz, 1619.

ese era el espíritu de la época, lleno de misticismo y sin capacidad para discernir entre los elementos realmente científicos de una teoría y los elementos ajenos a ella.

Esto se logró posteriormente y aún podemos decir que ni el mismo Newton se pudo desembarazar del todo de los elementos extra científicos que aparecen claramente presentes en su obra. Sus conceptos de espacio y tiempo absolutos no son más que el resultado de la influencia Neoplatónica que se respiraba en Cambridge en la época en la que Newton era estudiante.

También en descargo de Kepler podemos decir que ésta fué su primera y última ligereza conceptual, pues el resto de su obra tiene un arte eminentemente científico sin agregados extraños.

En 1609 aparece su libro *Astronomía Nova*, donde empieza rechazando las esferas sólidas y cristalinas de Aristóteles apoyado en dos hechos astronómicos descubiertos por su maestro Tycho Brahe (1546-1601):

La nova de 1572 y el cometa de 1577.

Brahe llega a la conclusión de que ambos fenómenos ocurrieron fuera de la órbita de la Luna, sobre todo por lo que se refiere al cometa, ya que éste viene de muy lejos, pasa cerca del sol y retrocede a muy grande distancia.

Evidentemente hay una gran incompatibilidad entre este hecho astronómico y la presencia de esferas sólidas que debieron ser atravesadas durante el acercamiento del cometa al Sol.

Desde luego el rechazo de las esferas de cristal requerían de una nueva física celeste, y Kepler pasa a poner sus bases.

Apoyado por el gran cúmulo de observaciones realizadas por Tycho Brahe, observaciones de la mayor precisión hasta entonces realizadas, procede a usar las correspondientes al planeta Marte ya que, por el principio de uniformidad de la naturaleza, las propiedades dinámicas de Marte deberían ser aplicables a todos los planetas.

Kepler a estas alturas sigue aferrado a las órbitas circulares de Ptolomeo, por lo que para explicar el movimiento aparente de Marte, observado desde la Tierra,

ensaya una órbita circular pero no recorrida con movimiento uniforme, sino con velocidad variable.

Después de invertir dos años en éste esfuerzo, Kepler reconoció su fracaso pues sus resultados contenían un error de 8'.

Copérnico hubiera quedado satisfecho con una precisión de 10' pero no así Kepler.

En vista del fracaso, Kepler abandonó el estudio de la órbita de Marte y pasó a considerar la de la Tierra, concluyendo que la velocidad de la Tierra es inversamente proporcional a su distancia al Sol.

Esta ley de velocidades que Newton demostró era incorrecta, sirvió de guía a las posteriores investigaciones de Kepler.

A partir de ella dedujo Kepler la Ley de las áreas (tom. II) que sabemos es correcta, de modo que históricamente la primera ley descubierta fué la que ahora llamamos Segunda Ley, y que establece la constancia de la velocidad de barrido del área por el radio vector (velocidad areal).

Como vimos, Kepler obtuvo la Ley de las Áreas a partir de esa (errónea) ley de las velocidades planetarias, pero esta ley le sugirió los elementos básicos de su mecánica celeste, la cual debe depender de la función dinámica central asignada al Sol.

Kepler estaba convencido del papel primario del Sol en el Universo, ya que siendo este astro la fuente de luz y calor, también debería ser el centro dinámico del sistema solar.

Kepler suponía que del sol emanaba un poder que empujaba a los planetas y producía sus movimientos orbitales, de la misma manera que los rayos de una rueda arrastran en su movimiento de rotación.

Implícitamente, Kepler estaba empleando las proposiciones básicas de la mecánica de Aristóteles, según la cual un cuerpo permanece en movimiento solo en tanto y cuanto algo lo ponga y lo conserve en movimiento. En lenguaje aristotélico esta proposición se expresa diciendo: "Todo lo que se mueve es movido por algo".

Consecuentemente la velocidad del planeta debe ser proporcional a la fuerza motriz:

Luego la Ley Kepleriana de las velocidades planetarias aparece como una consecuencia de la dinámica básica del sistema solar.

Luego, el "poder" irradiado desde el Sol decrece en proporción a la distancia, y la velocidad de cada planeta debe variar inversamente a su distancia al Sol.

Además, por lo que se refiere a esta "fuerza" emanada del Sol, Kepler consi-

dera que ocurre exclusivamente sobre el plano de la órbita planetaria:

Esto es, para Kepler la "fuerza gravitacional" del Sol tiene una distribución plana; ocurre sobre un plano.

A medida que Kepler desarrollaba la dinámica del movimiento planetario, más le recordaba las relaciones básicas de la palanca a mayor distancia al Sol menor es el "poder" seguido por el Sol para moverlo.

Cuando apareció por primera vez la noción de un 'Poder' irradiando desde el Sol fué cuando se publicó el libro *Misterio Cosmográfico*.

En la primera edición, el término usado por Kepler para designar a este "poder" fué el de "Anima motrix", o sea, un "alma motriz", término con fuertes reminiscencias animísticas y que hacía recordar términos aristotélicos semejantes.



En la edición de 1621 se agregó una nota donde se aclara que hay que substituir la palabra "ánima" (alma) por la de 'vis' (fuerza) para poder entender cual es el principio mismo sobre el cual se basa la física celeste.

Dice Kepler: "Anteriormente creía que la causa que mueve a los planetas era un alma, estando sin duda influido por las enseñanzas de J.C. Escoligero acerca de las inteligencias motoras. Pero cuando reconocí que esa causa motora se debilita, al crecer la distancia al Sol, entonces concluí que esa fuerza debería ser de tipo corporal".

Mientras tanto permanecía sin resolver un problema de la dinámica celeste.

¿Qué es lo que hace variar la distancia de un planeta al Sol?

Los antiguos resolvieron el problema introduciendo las órbitas excéntricas y sobre todo los epiciclos, lo que permitía "explicar" dicha variación en distancia.

Cuando Kepler regresó al estudio de Marte, descubrió que usando una elipse y si el Sol se coloca en uno de sus focos, entonces la distancia sol-planeta varía de un modo uniforme entre dos valores extremos: un valor mínimo en el perihelio y otro máximo en el afelio. Esta variación uniforme sugiere la presencia de una acción física.

Luego, ya podía ser rechazado definitivamente el mecanismo de los epiciclos.

Así quedó establecida la ahora llamada Ley I de Kepler y eliminadas también, definitivamente las milenarias órbitas circulares. Por lo que se refiere a la fuerza que emana del Sol, Kepler se decidió por una fuerza magnética de atracción entre el Sol y el planeta.

Finalmente Kepler descubrió lo que ahora llamamos la Ley III que establece una relación constante entre el período P de revolución de un planeta y su distancia media al sol, la cual se demuestra que es igual al semieje mayor a de la elipse:

$$\text{o sea } P^2 / a^3 = \text{constante.}$$

Para finalizar este esbozo de la obra de Kepler diremos simplemente que su obra presenta dos aspectos igualmente interesantes:

Por un lado la obra de Kepler se puede ver como un rompimiento lento pero sostenido con la tradición aristotélica-ptolomaica, de esferas cristalinas, círculos, epiciclos y otros recursos geométricos inventados por los astrónomos antiguos para explicar, cosa que no siempre lograron, los movimientos de los astros observados desde la Tierra, todo esto ligado al establecimiento de una nueva cosmología en la que la Tierra ya no desempeñará ningún papel fundamental.

Por otro lado, y esta es tal vez la contribución más importante de Kepler, se lanzó a una tarea constructiva, ya que fue capaz de establecer nuevos conceptos, nuevas leyes que permitieron el desarrollo subsecuente de la ciencia en el mismo siglo XVI, y sacando a la física y a la astronomía del pantano donde habían sido llevadas, desde el siglo IV a.C., por Aristóteles, Ptolomeo y los escolásticos de los siglos precedentes al XVI.

# Importancia del estudio de la Electroquímica en la formación de Químicos Farmacobiólogos

MARTIN MARINO DAVILA JIMENEZ

En la actualidad el químico farmacobiólogo debe reconocer la necesidad de apoyar sus conocimientos en las bases científicas y en los últimos avances de la Física, la Química y la Biología.

¿Qué importancia tiene la Electroquímica en los conocimientos del Químico Farmacobiólogo?

La Electroquímica puede definirse como la rama de la Físicoquímica que estudia las leyes de la interacción y correlación de los fenómenos químicos y eléctricos, uno de los cuales se observa en el esquema presentado en la Figura 1, en donde conductores separados por una membrana semipermeable originan en la interface un proceso de óxido reducción acompañado de un salto de potencial.

Como resultado de este proceso el circuito funcionará como una fuente química de corriente eléctrica o como un electrolizador si se le une a una fuente externa.

Un proceso semejante al que ocurre en un circuito electroquímico se efectúa en los organismos vivos, en las membranas celulares como la representada en la Figura 2.

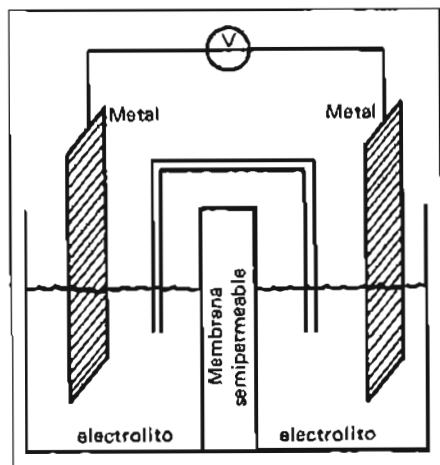


Fig. 1. Celda electroquímica.

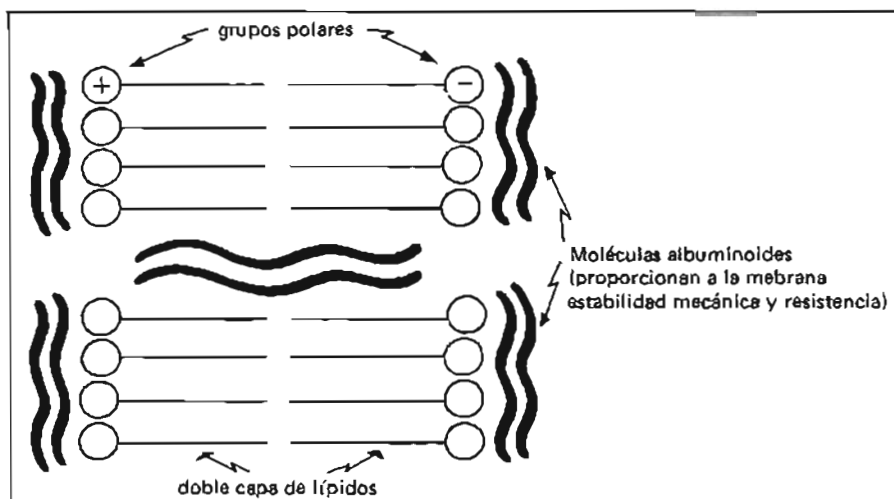


Fig. 2. Representación electroquímica de una membrana celular.

Las membranas están atravesadas por canales lipoproteínicos especiales, por medio de los cuales probablemente se realiza el transporte iónico selectivo.

De aquí que las regularidades electroquímicas sean la base para el transporte de las sustancias a través de las membranas. Esto indica la importancia del enfoque electroquímico en la investigación de seres biológicos, el cual ha dado origen a una nueva rama de la ciencia que es la Bioelectroquímica, encargada de estudiar las regularidades electroquímicas del funcionamiento de sistemas vivos y sus modelos.

Además de la bioelectroquímica existen diferentes métodos electroquímicos que permiten hacer investigaciones biomédicas y diagnosticar algunas enfermedades, tales como el cáncer, úlceras en el estómago, arterioesclerosis y otras. Por ejemplo el método polarográfico permite diagnosticar algunas enfermedades y determinar una gran variedad y cantidad de medicamentos incluyendo la estreptomina, el cloranfenicol y las sulfamidas.

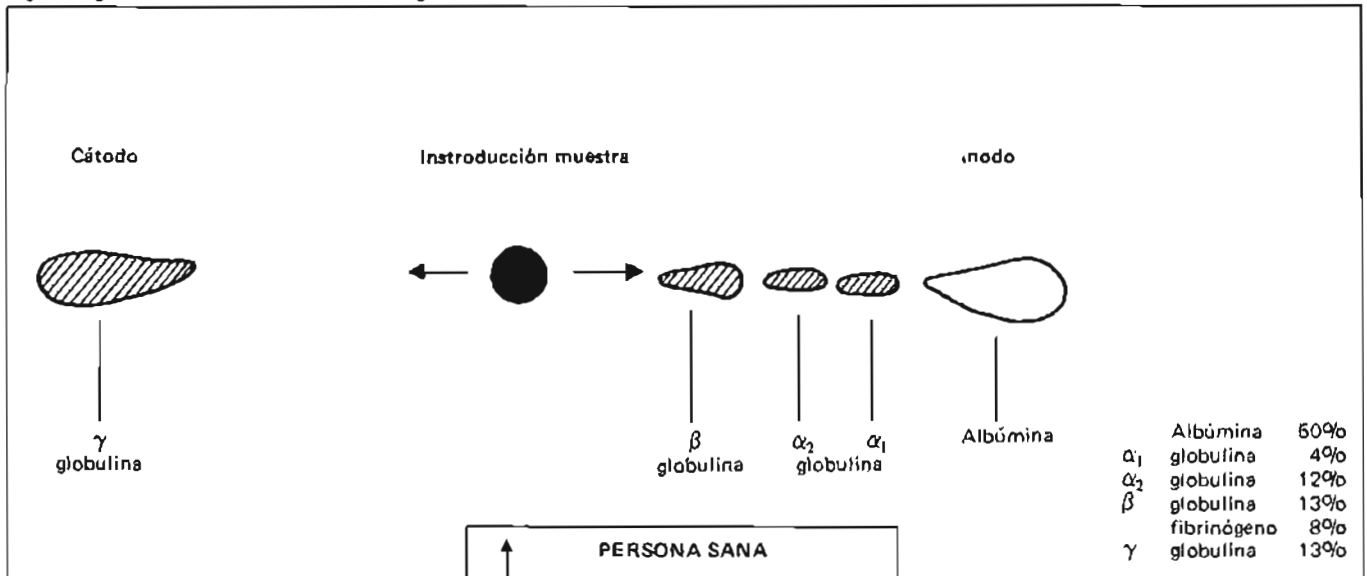
Experimentalmente el método polarográfico consiste en determinar la dependencia de la corriente que circula a través del circuito con el potencial aplicado al sistema. La dependencia gráfica se llama polarograma. Con ayuda de este método se pueden analizar compuestos hasta concentración de  $10^{-4}$  Mol/l y además determinar los diferentes componentes que se reducen al mismo tiempo.

Dentro de los métodos electrocinéticos, la Electroforesis tiene gran aplicación en el análisis de mezclas de líquidos biológicos, la separación de sus componentes y la determinación de sus características individuales.

Un caso concreto es la separación y la determinación cuantitativa de las proteínas en el Suero Sanguíneo de una persona normal (Figura 3)

Una variante de la electroforesis, que es la electroforesis en gel permite diagnosticar algunas enfermedades a partir de las proteínas del suero sanguíneo. La Figura 4 muestra gráficas de una persona normal y de personas con estados patológicos.

Fig. 3 Diagrama electroforético de suero sanguíneo.



La electroforesis y sus diferentes variantes también se pueden emplear para el análisis de las proteínas en el líquido encefaloraquídeo y la orina.

La variación del contenido de proteínas en el líquido encefaloraquídeo se observa en el caso de una fuerte esteriosclerosis, meningitis y encefalitis, así como también en el caso de algunas enfermedades cancerosas.

Se ve que la electroquímica o mejor dicho la Bioelectroquímica y los diferentes métodos electroquímicos son realmente indispensables para los estudios biomédicos, para el diagnóstico de algunas enfermedades y el análisis de productos farmacéuticos y reconocer la importancia de la electroquímica en las áreas antes mencionadas implica que los Químicos Farmacobiólogos deban estudiar las bases teóricas de la electroquímica, como son la teoría de la disociación electrolítica de Arrhenius y la teoría de Debye-Hückel.

Finalmente puede mencionarse que los fenómenos electroquímicos, que transcurren en el organismo humano representan una interesante y aún no completamente investigada área (BIOELECTROQUIMICA). Se sabe que el movimiento de los músculos, la contracción del corazón, la excitación e inhibición del sistema nervioso central, la transmisión de los impulsos por los nervios, van acompañados de fenómenos eléctricos (ELECTROQUIMICA DEL IMPULSO NERVIOSO) que producen potenciales eléctricos e impulsos observables y medibles con aparatos especiales, los cuales son usados ampliamente para la detección de estas corrientes en el diagnóstico de algunas enfermedades del corazón, del cerebro y de los músculos: ELECTRO-

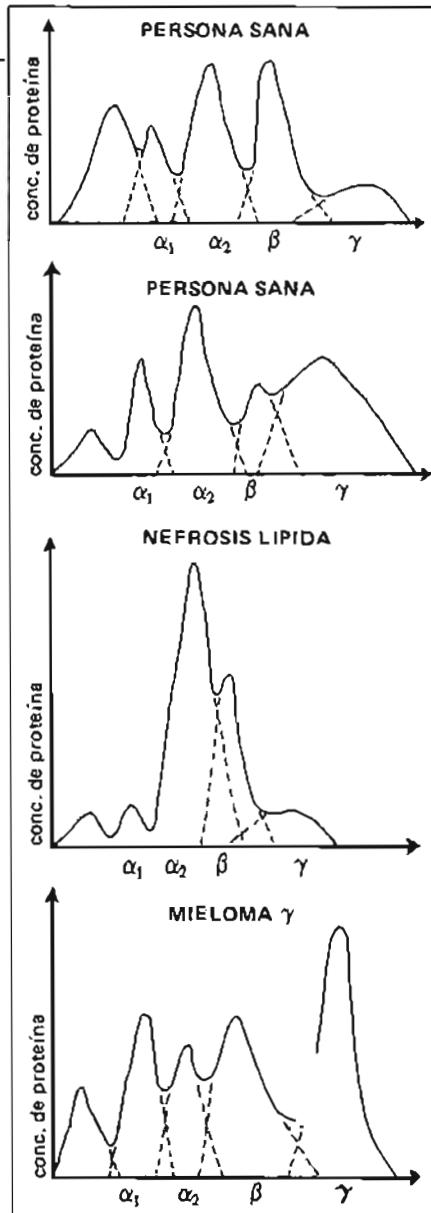


Fig. 4

#### CARDIOGRAMA, ELECTROENCEFALOGRAMA, ELECTROMEIOGRAMA.

Los tejidos y los líquidos biológicos contienen una considerable cantidad de electrolitos y presentan una gran electroconductividad. Este fenómeno de electroconductividad tiene un gran valor fisiológico y ampliamente se emplea en la FISIOTERAPIA. Mediante el empleo de cátodos para la restitución de las funciones de los tejidos y en particular de los nervios, los cuales como resultado de un trauma se encuentran en estado parabiótico. En fisioterapia exitosamente emplean la IONOFORESIS, es decir, la introducción de medicamentos en forma de iones a la superficie de la piel y mucosa, aplicando los correspondientes electrodos. Hasta la fecha sin embargo, poco se sabe acerca de las causas reales y la correlación entre la formación de los potenciales bioeléctricos y la distribución de los bióticos.

Puede concluirse que el Químico Farmacobiólogo moderno, no ajeno a los avances en Bioelectroquímica, Inmuno-electroforesis, Biopolarografía y Métodos Electroquímicos comprende el comportamiento de los iones, la conductividad eléctrica, la electroforesis, los fenómenos electrocinéticos, y conoce la doble capa eléctrica y las teorías sobre su estructura (interface entre una biomembrana y el medio exterior). Hechos tales como el descubrimiento hace 40 años de la existencia de la doble capa eléctrica en los filamentos musculares y nerviosos que componen los tejidos, han permitido realizar la inserción en el organismo humano de microestimuladores para el corazón.

# El Concepto de Elemento en el Liber Paramirum de Paracelso\*

PRIMERA PARTE

LOURDES RENSOLI LALIGA



La alquimia en busca de la piedra filosofal.

"Hay muchas invenciones, ciencias y artes que son atribuidas a la acción del diablo; pero antes que el mundo envejezca mucho se descubrirá que el diablo nada tiene que hacer con estas cosas, que el diablo no es nada y nada sabe, y que tales cosas son el resultado de causas naturales. . . Cosas que hoy se consideran imposibles serán logradas. Lo imposible será un hecho en el porvenir, y lo que es visto como superstición en un siglo, servirá en el siguiente como base de la ciencia oficial".

Paracelso

## Introducción

Entre los grandes humanistas del siglo XVI se destaca la vigorosa personalidad de Teofrasto Bombasto de Hohenheim, Paracelso, no solo a causa de su lucha contra las autoridades eclesiásticas y la Escolástica (pese a no estar del todo libre de su influencia como lo prueban sus concordancias con Meister Eckhart, etcétera) sino también por su defensa del método experimental que le permitió vincular la alquimia o espagiria y la medicina, lo cual redundó en favor del ideal común a cualquier mente avanzada de su época: el mejoramiento físico y espiritual del hombre, en pos del cual la naturaleza, como cosmos, se constituía en el único objeto posible de investigación.

Paracelso rompió en buena medida con algunos conceptos tradicionales de la alquimia, muchos de ellos estrechamente ligados a su aspecto místico, y con esquemas tomados del canon médico vigente. De esta forma intentó describir la estructura interna de las sustancias, el fenómeno de la vida, sus afecciones y

el retorno al equilibrio a partir de la interacción con medicamentos adecuados. El no haber logrado plenamente sus propósitos, el propio carácter a menudo impreciso de estos propósitos, mezcla asombrosa de ciencia y magia, no resultan obstáculo para apreciar en Paracelso la estatura científica que lo caracteriza como uno de los fundadores de la ciencia moderna, uno de los investigadores que contribuyeron eficazmente a la ruptura con concepciones tradicionales que toda revolución científica supone. Paracelso asistió a los inicios de la primera revolución científica global y, como Nicolás de Cusa, fue una figura de transición entre los estilos medieval y moderno de pensamiento. La complejidad de su lenguaje, sus inconsecuencias, sus conceptos extraídos del hermetismo han dado lugar, unidos a su filiación neoplatónica, a que pensadores como Jung o Abbagnano hayan subrayado con preferencia las tendencias místicas indudablemente presentes en su obra, pero vinculadas a posturas científicas avanzadas que en su tiempo, asestaron duros golpes al conservadurismo religioso oficial. Por eso fue tenido como sospechoso de herejía por la Iglesia y herejes como Giordano Bruno y Van Helmont, saludaron y asimilaron sus ideas.

El camino hacia el nacimiento de una nueva concepción de la naturaleza, tendiente al panteísmo y al materialismo, se nutrió de los aportes de idealistas como Paracelso, a los cuales puede aplicarse la harto conocida observación de V. I. Lenin: "Cuando un idealista critica los cimientos del idealismo de otro idealista, el materialismo siempre sale ganando".<sup>1</sup> En el siglo XVII Roberto Boyle, Leibniz, Francis Bacon, se referirían críticamente a diversos aspectos de su obra: el primero, como químico; el segundo

\* Trabajo presentado en la Primera Reunión Latinoamericana de Historiadores de la Ciencia, realizado en la UAP, Puebla, Pue.

<sup>1</sup> Lenin, V. I. Cuadernos filosóficos. Ed. Política, La Habana, 1964, p. 276.

como físico y gran filósofo dialéctico; el tercero, como materialista e investigador del método científico. El que orientaciones tan diversas pudieran volver sus ojos por igual a Paracelso sólo puede explicarse a la luz de la complejidad y heterogeneidad de sus ideas, de la síntesis de corrientes diversas apreciables en su obra. Se han ocupado de Paracelso autores positivistas, marxistas, neokantianos, representantes de la escuela psicoanalítica y de otras corrientes. En la historia de la química merece un lugar por sus contribuciones a la precisión del concepto de elemento, el nuevo objeto de la química que concibió y su defensa del valor de la experimentación en contra de las autoridades a las cuales, empero, no desdeñó sino pretendió corregir en concordancia con los nuevos descubrimientos. Su interés en vincular la naturaleza orgánica e inorgánica así como todo tipo de procesos y estructuras opuestas le conceden un valor en la historia del pensamiento dialéctico, que unido a la influencia que ejerció en su tiempo justifica cualquier estudio en torno a su figura. Objeto de este ensayo será el análisis crítico, desde las posiciones filosóficas del marxismo-leninismo, del concepto de elemento en una de sus obras fundamentales: *el Liber Paramirum*, cuyas primeras partes giran alrededor de cuestiones teóricas que resumen lo mejor de su pensamiento. Con frecuencia se soslaya su importancia o resulta tratado como una figura pintoresca, representativa de viejas tradiciones, de los aspectos menos avanzados del pensamiento renacentista. Como contribución a la tarea de valorar con objetividad la incidencia de sus ideas en la formación de la ciencia moderna trataremos el doble carácter, científico-natural y filosófico del concepto de elemento.

## I. Formación e influencias

Paracelso vino al mundo en 1493, 29 años después de la muerte de Nicolás de Cusa, 6 años antes de la muerte de Marsilio Ficino, uno después del descubrimiento de América. Lutero fue 10 años mayor y Calvino, 15 menor. Como vemos, la formación de las relaciones de producción capitalistas, estaban en pleno ascenso en Europa, y el pensamiento burgués nada libre aún de la herencia espiritual del Medioevo, daba sus primeros frutos. Le tocó nacer y pasar los primeros años, decisivos, de su formación, en aquella porción de Europa en la cual sobrevivían tenazmente las estructuras feudales cuando ya la bandera del capitalismo ondeaba en el resto de los países. Como todos los humanistas, suizos, austriacos, conservó siempre las profundas huellas

de una educación medieval y, lo que es más importante, de un espíritu medieval en el ambiente cotidiano, del cual formaban parte no solo ferias y epidemias, no solo guerras y noticias maravillosas sobre los descubrimientos en ultramar, sino la firme creencia en la hechicería, en la existencia de los monstruos que inmortalizaría el pincel de Durero junto a figuras humanas que denotan brillantes estudios anatómicos, análogos a los de Leonardo, o más tarde, Michelangelo, y en la eficacia de filtros y amuletos. Un mundo en que la leyenda del doctor Faustus conmovía y movía a temores y reflexiones, no solo a los conocedores como en nuestros días sucede, sino al pueblo analfabeto por cuya boca se transmitía. Este tipo de sabio, turbado por el dilema de decidir entre ciencia y magia, o convencido de la unión indisoluble entre ambas, resume brillantemente los rasgos característicos del científico de la época, sobre todo en los países de influencia germánica. El padre, doctor Wilhelm von Hohenheim, resultó para el joven Teofrasto el modelo de médico a la vieja usanza adscrito a Galeno, Hipócrates o Avicena, ineficaz para arrancar de la muerte casos insólitos, en los cuales resultarían impotentes los tratamientos tradicionales. Durante sus estudios de medicina, ya fuera junto al padre, en la escuela de Medicina de Nápoles o en la Universidad de Basilea, conoció a fondo los cánones establecidos cuya ineficacia corroborara repetidas veces en su propio hogar. Al tratar de esclarecer las causas de la misma, encontraría que la principal consistía en un total desconocimiento del organismo humano que hacía imposible establecer la génesis de la enfermedad y mucho menos los métodos curativos, debiéndose achacar los éxitos más bien a la acción de la naturaleza que a las prescripciones facultativas.

Existían en Alemania condiciones para penetración del humanismo, dada la fuerte oposición que se desarrolló durante todo el siglo XV y estalló en las guerras campesinas en el siglo XVI contra las trabas feudales que mantenían en la miseria al campesinado alemán cuando en Inglaterra y los Países Bajos la nobleza comenzaba a apoyarse en la burguesía manufacturera y comercial.

La reacción contra el poder de la Iglesia que presidió estos siglos fue también una reacción antifeudal por cuanto la Iglesia había ocupado tradicionalmente un lugar privilegiado en dicho orden y eternizado el mismo en su doctrina oficial, que penetraba y subordinaba todas las formas de la conciencia social. La Reforma fue un fruto, en el plano ideológico, de las mismas condiciones que die-

ron lugar a las insurrecciones del siglo XVI encabezadas por Münzer.

Los movimientos más progresistas de la Edad Media e inicios de la Época Moderna tuvieron en Alemania y los países de influencia germánica una marcada cobertura religiosa. Sectas heréticas, emparentadas con la mística alemana —que a través del contacto personal con la divinidad libera al devoto de la absoluta sumisión a la institución eclesiástica— habían aparecido desde la Edad Media en Francia y Suiza y mantuvieron en muchos casos estrechas relaciones con el esoterismo. Un buen ejemplo es el vínculo señalado entre otros por René Allendy, entre el *Roman de la Rose*, cuyo segundo autor, Jean de Meung, expresa un complejo simbolismo alquímico, y la herejía de los albigenses que ya influyera en el concepto de amor cortés de trovadores y de Minnesinger. Al respecto, Engels escribe:

"La oposición revolucionaria contra el feudalismo se manifiesta a través de toda la Edad Media. Según las circunstancias aparece como misticismo, herejía abierta o insurrección armada. En cuanto al primero se conoce hasta qué punto los reformadores del siglo XVI dependían de él. También Münzer le debe mucho".<sup>2</sup>

Una burguesía naciente incapaz aún de manifestarse con espíritu pleno de clase, se hacía ya sentir. La división política frustraba el proceso de unificación y afianzamiento de la burguesía como clase a través de la apropiación progresiva de la economía. Para caracterizar la situación en la Alemania del siglo XVI expresa Engels:

"La industria alemana había adquirido notable desarrollo en los siglos XIV y XV, los gremios de las ciudades habían sustituido la industria feudal del campo que no tenía más que una importancia local; producían para un círculo más amplio e incluso para mercados lejanos. El arte de tejer paños gruesos y telas de lino se había generalizado y en Ausburgo se elaboraban hasta paños y telas de mayor finura. Al lado de los telares había crecido aquella industria vecina del arte que hallaba su sostén en el lujo eclesiástico y secular de fines de la Edad Media: la de los plateros, joyeros, escultores, tallistas, grabadores, armeros, medallistas, torneros, etcétera".<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Engels, F. *La guerra de los campesinos en Alemania*. Ed. De Ciencias Sociales. La Habana, 1974, p. 23.

<sup>3</sup> Engels, F. Ob. cit. p. 5.

Oficios ligados como se ve, al trabajo con los metales que exigían en muchos casos el conocimiento de técnicas elaboradas y manejadas por los alquimistas.

De ahí que en Alemania las condiciones de la burguesía, sujeta al peso de la tradición, a la mediatización como clase y, en suma, a la cobertura religiosa propia de toda corriente renovadora en la época, marcaran el pensamiento científico y filosófico con profundas huellas de misticismo dando lugar a combinaciones muy complejas de humanismo, ciencia y esoterismo, de especulación y conocimiento positivo, de dialéctica y metafísica de lo trascendente como, en el siglo XV, Nicolás de Cusa y en el XVI, Paracelso y su discípulo Agrippa. Más adelante Jakob Böhme engrosaría el número.

No es de extrañar que ninguno tuviera dificultades para comprender y asimilar rápidamente las ideas de los humanistas, la doctrina neoplatónica y sus fuentes en Proclo, Plotino y Jamblico. El misticismo germano había predicado siempre aquel peculiar panteísmo que persigue la ascensión del hombre-microcosmos hasta el Uno, esencia omnipresente del Cosmos, en el cual el conocimiento de la naturaleza juega un papel fundamental pues permite ascender por analogía o por exclusión, según predica la dialéctica negativa hasta la vacuidad suprema o negación del ser contingente, Dios. El investigador se hace a través de su obra semejante a Dios, se aproxima al mismo. Nueva postura ante el hombre y la ciencia, enlazada, sin embargo, con la ideología alemana de fines del feudalismo, constituye el marco en el que el pensamiento de los países germánicos —el alemán Lutero o el suizo Paracelso— encontrará nuevas vías de expresión en la concepción del mundo y en la investigación científico-natural.

Para que Teofrasto pudiera concluir de manera precisa una teoría sobre el organismo, las enfermedades y su composición tendrían que pasar algunos años. Disgustado con la enseñanza oficial estudió un sinnúmero de disciplinas bien diferentes de las que componían el *curriculum* universitario junto a John Trithemius, curiosa mezcla de sabio humanista y esótera. Trithemius le enseñó astrología, las doctrinas de la kábala, los principios de la alquimia y, más aún, la filosofía neoplatónica en sus principales fuentes antiguas y modernas. Las traducciones de antiguos textos esotéricos —la *Tabula smeragdina* de Hermes, textos de Proclo y Pitágoras— se unieron al estudio de los sabios árabes —el alquimista Geber, Al-Kindi— y los sabios hebreos —Ibn Gabirol, Moisés Maimónides— le proporcionaron la oportunidad

de sintetizar en una doctrina filosófica diversidad de posturas, una base sobre la cual discernir críticamente y vincular la especulación teórica sobre los principios de la naturaleza con la práctica experimental predicada por los alquimistas más famosos de la Edad Media: Lull, Villanova, Roger Bacon. La escuela neoplatónica aceptaba y estimulaba toda actividad práctica, pues, de acuerdo con los fundamentos de la doctrina, ninguna forma mejor existe de acercarse a la suprema unidad, que el vínculo con las propiedades que se dan en las criaturas, análogas a las del Uno. El arte, la ciencia, la propia vida humana, con sus valores, en calidad de parámetros del acaecer, constituyen vías de aproximación a la perfección si se llevan a cabo no caótica, sino mesuradamente, reviviendo la clásica unidad entre ciencia y virtud. El neoplatonismo tenía una ventaja sobre el platonismo, que traía como consecuencia que fuera preferido por los humanistas: trascender las barreras de la finitud, no en forma de pura reminiscencia o contemplación intelectual, sino identificación del propio ser, a través de la unión mística, con la esencia última residente en todas las cosas, mediante múltiples grados o eslabones intermedios. El panteísmo neoplatónico, con el concepto de *anima mundi* establecía un puente entre la divinidad y las criaturas. Como elemento de transición entre lo sensible y lo inteligible, era expresión de lo divino y a la vez compendio de los rasgos universales de los fenómenos. Cada nivel de ascenso hacia lo absoluto suponía un enriquecimiento, por participación del individuo empeñado en dicho proceso, un conocimiento muy diferente de la racionalidad. La apertura a un nuevo y —para emplear los términos del Cusano— incomprensible campo de la inteligencia. El microcosmos que es el hombre no merecía el nombre de tal si, a través de la acción e impulso propios, no se hacía semejante al cosmos, pues el nacimiento no le proporcionaba más que los gérmenes no desarrollados indispensables para llevar a cabo esa tarea. Ficino pretendió establecer el Amor como medio supremo para arribar a ese "segundo nacimiento", a ese "despertar" de las facultades. Variaran o no en detalle, las escuelas coincidían en un aspecto principalísimo: el autoconocimiento como vía para la auto-transformación e identificación con el cosmos. O sea, hacerse a imagen y semejanza de Dios, que es la par, la Naturaleza. Es aquí donde la doctrina neoplatónica ofrece el terreno más adecuado para su entronque con la alquimia.

De la misma forma en que, durante la Edad Media, la filosofía neoplatónica

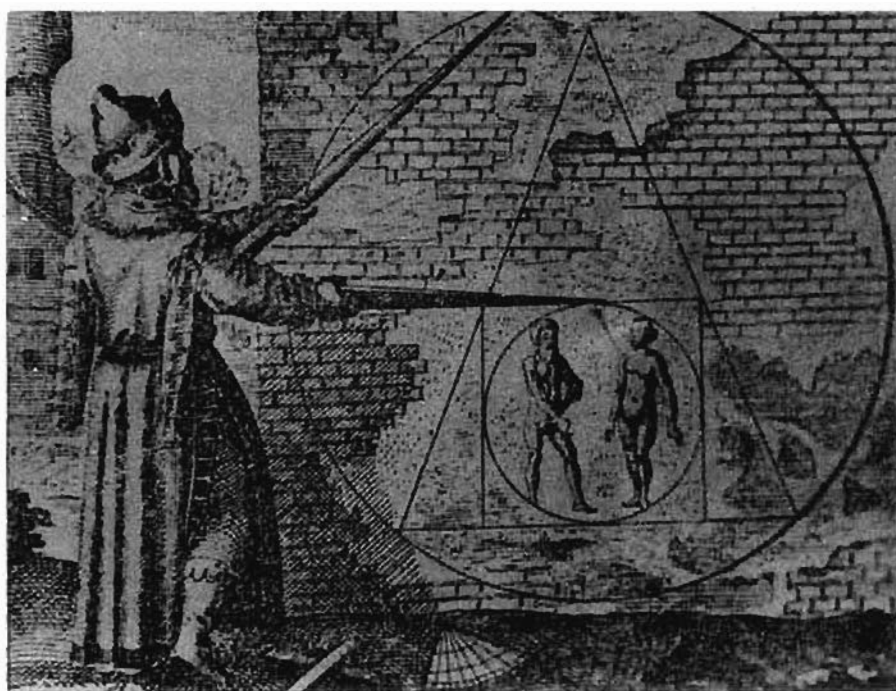
fue desconocida o perseguida, proscrita en las variantes que árabes y hebreos introdujeron en la Europa cristiana, y sus ideas se convirtieron durante el Renacimiento en un baluarte de la burguesía revolucionaria, la alquimia fue vista con desconfianza, vigilada, restringida, y al fin, condenada. En 1287, la Orden de los dominicos prohibió su práctica a sus miembros. En 1317 —es conocida la influencia de esta Orden en la cristiandad feudal— el Papa Juan XXII, en su Bula *Spondent Pariter*, arengó contra los alquimistas, considerados poco menos que siervos del demonio. Tradicionalmente, las formas esotéricas de las religiones, unidas o no a prácticas científicas, han desempeñado el papel de adversarias de las religiones oficiales, han atraído a mucho de sus mejores partidarios y ofrecido variantes menos corrompidas —al menos en lo aparente de culto y de creencias.\* La alquimia, claro está, no es una religión, sino una doctrina esotérica, susceptible de vincularse con cualquiera de éstas. La concepción de la identidad macrocosmos-microcosmos propia de la alquimia difería radicalmente de la aceptada por la teología oficial imperante durante la Edad Media. Ante todo, el concepto de cosmos se establecía sobre la unidad panteísta Dios-Naturaleza. Si en el caso de las religiones politeístas —como en el caso de la alquimia ligada al hinduismo, en el Oriente, o de Grecia— los adeptos partían de la suposición de un principio absoluto, emanante de las divinidades, en el caso de la alquimia cristiana, ese absoluto se identificó

\* Resultan interesantes al respecto las observaciones, tanto de C. Marx en su tesis doctoral y en la *Crítica del derecho político hegeliano*, como las de Engels, en sus escritos acerca del cristianismo primitivo. La ruptura con el orden decadente que representaba la antigua religión romana, la búsqueda de nuevas condiciones de vida y la expresión espiritual de dicho estado de rebeldía, incluían la adopción de nuevas formas de creencia y culto. El esoterismo, que pretende lograr la revelación de misterios, fue la oportuna vestidura de la actitud religiosa de la época, multiforme y ecléctica por lo demás. El cristianismo, esotérico también en sus inicios, triunfó sobre otras manifestaciones por la vía de asimilación de sus elementos fundamentales y por la esencia democrática sobre la cual los aglutinó. Engels escribe sobre esto: "Vamos entonces que el cristianismo de esta época, que aún no tiene conciencia de sí mismo, era tan distinto de la posterior religión universal de Concilio de Nicea, dogmáticamente establecida, como lo es el cielo de la tierra; el uno no puede ser reconocido en el otro. No hay en él ni el dogma ni la ética del cristianismo posterior, sino la sensación de que lucha contra todo el mundo y de que la lucha culminará con el triunfo" (Marx, C. y Engels, F. *Sobre la religión*. Ed. Política. La Habana, 1963, p. 283).

por su rápida convergencia con el neoplatonismo en el Renacimiento y quizás antes, con el Uno. La unidad Dios-Naturaleza suponía entonces la espiritualización del cosmos, susceptible de vincularse con tendencias hilezoístas, pansiquistas, etcétera. De ahí la justificación de la actividad incesante, interna y externa, como ley universal. La "imagen y semejanza de Dios" que el hombre representaba, adquiriría entonces un nuevo significado: no ya la mera analogía entre estructuras inconmensurables, sino verdadera identidad, pues solo en el hombre se da vinculada al cuerpo la trilogía vida-alma-espíritu. Pero el uso de estas propiedades supone un "despertar" a partir del trabajo esotérico. La obra u *opus* alquímico brindaba al hombre la oportunidad de realizar en sí ese despertar, representado por la piedra filosofal, pues el oro filosófico se obtenía paralelamente en el laboratorio y en el alma del *artífex*. Como ha señalado Jung, criterio al que se adhieren Mircea Eliade, Sherwood Taylor, y otros historiadores de la alquimia,<sup>22</sup> existe un paralelo entre el *lapis philosophorum* y la figura de Cristo como redentor, que todo alquimista podía imitar. Es así que la imagen y semejanza entre el hombre y Dios se da también a través de la acción, del esfuerzo propio plasmado en la obra, equivalente al segundo nacimiento. Es conocida la estrecha vinculación entre alquimia y astrología, de la cual parte la correspondencia entre los siete planetas y los siete metales análogos a su vez a determinados tipos humanos. Toda transformación alquímica requería por tanto de una situación propicia macro y microcósmica. Es decir, que por todos los conceptos se predicaba una armonía entre hombre y cosmos, no solo por constitución natural, sino por el propio esfuerzo humano, por el uso del libre albedrío, muy diferente de las concepciones tradicionales.

De la escuela de Trithemius salió otra figura cuyos aportes en el mismo campo dejarían también profundas huellas: Cornelio Agrippa de Nettesheim. Sin embargo, ninguno quedó a la sombra del maestro. En 1526 encontramos a Agrippa en Francia, al servicio de la reina madre. Paracelso por su parte, emprendió una serie de viajes que le proporcionaron infinitud de conocimientos prácticos: Schwabach, donde trabajó en los laboratorios de los Fugger y presenció la dura

<sup>22</sup> Este criterio, asumido en un sentido idealista por dichos autores, es retomado por un estudioso marxista de la alquimia como Reblinovich, quien señala el carácter "profundamente herético" del *opus* alquímico, en cuya intransferible individualidad se manifiestan, a fines de la Edad Media, gérmenes del individualismo burgués.



labor de las minas. La utilidad de este trabajo para la adquisición de técnicas operatorias con los minerales puede calibrarse si recordamos que ya "en el siglo XV los mineros alemanes tenían fama de ser los más hábiles del mundo".<sup>4</sup> Pasó por Viena, Colonia, París. Hizo estudios sobre las sustancias y sus propiedades y conoció nuevas doctrinas y obras herméticas. En Montpellier leyó a Arnaldo de Vilanova. Vivía aún la memoria de la herejía albigense. Paracelso encontró en esta un punto de concordancia con el neoplatonismo: la teoría de la transmigración, según la cual esfuerzo humano por la propia evolución conduciría a la salvación, y el poder redentor del Eros, que ya conociera en Ficino y Pico de la Mirándola. Como en el caso de Nicolás de Cusa, Italia fue decisiva para su formación, no solo por el aprendizaje realizado sino fundamentalmente, por el ambiente espiritual que allí reinaba, en la plenitud del Cinquecento. En Italia, los estudios sobre medicina habían experimentado un nuevo impulso desde el siglo XV con Lorenzo Valla, quien en su *De Voluptate*, había exaltado el placer y su vehículo, el cuerpo, como el bien mayor del hombre. De ahí que el cuerpo considerado tan valioso como el alma, deba ser objeto de esmero y que la prolongación de la vida se convierta en un bien y no en lenta tortura para el alma que, desde el mundo de lo corruptible, pugna por unirse al principio originario. Lo transitorio de la vida humana, la misma idea de la inmortalidad,

"Haz de un círculo con un hombre y una mujer; luego, un cuadrado; después, un triángulo, y, finalmente, un círculo, y obtendrás la Piedra Filosofal".

Michael Maier,  
Scrutinium Chymicum.

dad, no bastaban ya para obnubilar la magnificencia de los dones de la Naturaleza. Pero la salud, premisa indispensable para el disfrute de los mismos, entraña, como el placer, una medida. Tan malsano resultaba entonces el exceso ascético como el libertinaje. Con una alusión en todo momento presente al pensamiento socrático que exalta la templanza como vía idónea para realización del amor<sup>5</sup> la medicina se convierte en el baluarte del goce y la felicidad humanas. Más adelante, Pico en su trilogía *Pulchritudo-amor-voluptas*, cuya interpretación realiza felizmente Edgar Wind<sup>6</sup> subraya una vez más el placer como culminación y fin último de la vida, medio para alcanzar la identificación con el cosmos. Se torna así el amor un tipo de sabiduría que, partiendo de lo empírico, lo trasciende en un supremo acto de éxi-

<sup>5</sup> Véase Platón, *Banquete*. En: *Diálogos*. E.D.A.F. Madrid, 1965, pp. 518-519 y 528.

<sup>6</sup> Véase: Wind, E. *Los misterios paganos del Renacimiento*, cap. III: "La medalla de Pico de la Mirándola".

<sup>4</sup> Engels, F. Ob. cit. p. 6.

tasis en el cual son reveladas las esencias del Universo. A pesar del carácter místico y especulativo, esta concepción tuvo el mérito de ser una de las vías a través de las cuales el Humanismo valoró la nobleza de la medicina. Estrechamente ligada a la libertad y dignidad humanas, ha de apoyarse en todas las ciencias sobre lo divino y lo terrenal, pues todas encuentran su razón de ser en el hombre como unidad alma-cuerpo. En 1518 Erasmo de Rotterdam, quien, junto a Jean Frobenius y Jean Ecolampadius lograría en 1526 una cátedra de medicina en Basilea para Teofrasto, había escrito en su *Encomio de la Medicina*, las siguientes palabras:

“Ya la medicina no se ocupa solo del cuerpo, que es la más ruin porción del hombre, sino que cuida del hombre todo, aún cuando el teólogo sirve al ministerio del alma y el médico al ministerio del cuerpo. Por el muy estrecho parentesco y unión entre ambos, así como los vicios del espíritu redundan en el cuerpo, así a su vez, las enfermedades físicas estorban y aún extinguen el vigor del alma. ¿Quién es el más tenaz aconsejador de la abstinencia, de la sobriedad, de la moderación en la ira, de poner en fuga la tristeza, de evitar la embriaguez, de desechar los viciosos amores, de comederse en el ayuntamiento carnal, si no es el médico? (...) La piedad y las restantes virtudes de que se compone la felicidad cristiana dependen específicamente del alma, no lo niego. Mas, como está domiciliada en el cuerpo, inevitablemente tiene que servirse de órganos corporales y ello hace que, en buena parte, sea tributaria de la buena disposición del cuerpo”.<sup>7</sup>

Y más adelante:

“Ingratitud es para con las personas beneméritas no reconocer el beneficio; pero ese desconocimiento para con el médico es impiedad, puesto que como auxiliar y como medio del beneficio de Dios tutela con su arte lo mejor y lo más entrañable querido que la liberal mano de Dios nos concedió, quiero decir, la vida”.<sup>8</sup>

superior, como vemos según el fragmento, a la salvación, que supone una existencia incorpórea. El Humanismo, extendido ya hasta el mundo germánico, asimilaba las enseñanzas y descubrimientos más

recientes de Italia a la rica tradición farmacológica de dichos países. En sus viajes, probablemente en España, conoció más la cultura árabe, de sus obras que contenían información enciclopédica sobre anatomía, botánica, medicina y técnicas operatorias. Allí estudió con profundidad, en los médicos alquimistas árabes, la posibilidad de empleo del *opus* y sus resultados, en el mejoramiento de la salud humana y el conocimiento del cuerpo. Fungió en Holanda como médico militar y practicó la cirugía. Los países eslavos y Suecia ampliaron sus conocimientos sobre artes curativas del pueblo. De regreso a Suiza obtuvo el empleo de médico municipal y una cátedra en la Universidad de Basilea. Sus ataques contra el principio de autoridad, el uso de la lengua vernácula en sus lecciones, fueron puntos de coincidencia entre Paracelso y los partidarios de la Reforma protestante. Sin embargo, tuvo que abandonar la ciudad debido a su actitud rebelde y radical en extremo. Sus viajes prosiguieron hasta su muerte en 1541.

Esta heterogénea formación, teórica y práctica, no difería demasiado de la recibida por cualquier científico progresista de la época. No es posible juzgar la ciencia renacentista a partir de los mismos parámetros que se aplican al valorar periodos posteriores, en los cuales el desarrollo del método experimental, los procedimientos matemáticos, el estudio de las formas lógicas y su interrelación, permitieron la creación de teorías científicas con una estructura y contenido más acabados y coherentes. La complejidad de los siglos XV y XVI, transición hacia una nueva formación económico-social, y como consecuencia, un nuevo estilo de pensamiento, la necesidad de reacción contra siglos de dogmatismo y supersticiones, la incorporación de elementos no sistematizados al pensamiento, explican la coexistencia de cuestiones propias del conocimiento científico con otras totalmente ajenas: magia, astrología, kábala, a través de las cuales, por otra parte, se transmitió en buena medida el pensamiento dialéctico de la Antigüedad, en sus variantes idealistas o materialistas inconsecuentes. De la misma saldría la gran síntesis realizada por Paracelso: la formación de la iatroquímica, primer paso en la formación de la química moderna.

## II. El elemento, agente macrocósmico

Durante siglos, la teoría de los cuatro elementos había sido aceptada sin discusión aún entre los alquimistas, aunque no sin disparidades de criterio en cuanto a las afinidades e interacciones posibles

entre los mismos. Su unidad indisoluble no excluía su diferenciación, a partir de las propiedades atribuidas a cada uno. Ciencia y mística se apoyaban por igual en dicha teoría, que aportaba un principio de clasificación rudimentaria de los fenómenos de la naturaleza de acuerdo con sus componentes, o de las características del alma, también provenientes de éstos. El proceso alquímico exigía, para el cumplimiento acabado de cada fase, la estricta concordancia entre tres factores: la disposición astral, las sustancias a manipular y el estado espiritual del *artífex*. La medida en que los elementos se distribuyeran y vincularan propiciaría armonía, repulsión o transformación evolutiva, fácilmente convertible en su opuesto por una preparación errónea. Sin embargo, los cuatro elementos, dado su amplio grado de generalidad, unido a su carácter especulativo, no resultaban suficientes para explicar todos los matices del elevado número de fenómenos, sustancias y procesos descritos ya por los alquimistas a fines de la Edad Media. La transformación que esta teoría experimenta en la obra paracelsica sólo puede comprenderse a partir de la necesidad, planteada por la época, de ruptura con el paradigma aristotélico, insatisfactorio para organizar y explicar teóricamente el material empírico existente: los metales y sus compuestos, las diferencias entre sustancias antes y después de la destilación, de la calcinación, de la unión con un “opuesto” (sal y ácido o ácido y base). Esta intención adquiría entre los alquimistas un matiz determinado: a diferencia de las ciencias naturales propiamente dichas, que históricamente se habían propuesto el conocimiento y dominio de los fenómenos naturales y sus leyes, al alquimista interesaban solo en la medida en que podían contribuir a su evolución espiritual; su “segundo nacimiento”, apertura a los poderes y secretos cósmicos, o sea, su liberación de la realidad inmediata, equivalente a la obtención del oro filosófico, resultante de la evolución de la materia a través de todos sus grados o niveles de constitución hasta la incorruptibilidad. Es por esto que M. Eliade juzga al alquimista como un “sustituto del tiempo”<sup>9</sup> pues el *opus* debe acelerar procesos que requerirían un largo periodo; o sea, es capaz de obtenerlos de manera *contracta*, según expresara Cusa.

A lo anterior se añaden concepciones divulgadas en Europa desde la alta Edad Media, ampliamente difundidas desde los inicios del Renacimiento, propias de

<sup>7</sup> Erasmo. *Obras escogidas*. Aguilar. Madrid, 1965, p. 419.

<sup>8</sup> Erasmo: Ob. cit., p. 420.

<sup>9</sup> Véase: “Alquimia y temporalidad”. En: Eliade, M. *Herreros y alquimistas*. Taurus Ediciones, S. A. Alianza Editorial, Madrid, 1974, pp. 147-158.



La alquimia en busca de la piedra filosofal.

la alquimia judeo árabe. El desarrollo de la alquimia en el Oriente se nucleó en torno a un objetivo diferente a la búsqueda del *lapis*: el principio vital, elixir de vida o panacea, capaz de conservar y prolongar la vida. La cultura árabe portaba no sólo sus propias experiencias, sino la síntesis de las mismas con la alquimia india, propiciada por la dominación islámica en dicho país: esta concepción del proceso alquímico se presentaba estrechamente unida al vitalismo, cuya forma podría conciliarse perfectamente con la orientación de múltiples escuelas europeas. Así, afirma Morienus: "He aquí algunos de los nombres que han dado los sabios al Magisterio. Lo han llamado semilla, que cuando se transforma se vuelve sangre (en la matriz) y luego se cuaja y se convierte en una especie de carne compuesta; de esta manera se hace hasta que la criatura reciba otra forma, o sea la humana (que sucede a otra primitiva forma de carne). Entonces es necesario que se haga un hombre".<sup>10</sup> Aunque tanto Geber como otros destacados alquimistas árabes emplean el término "piedra filosofal", le atribuyen las características del elixir de vida. Este fue el punto de partida de la transformación sufrida por la alquimia europea que encontraría en Paracelso una de sus más eminentes figuras.

Pero es precisamente este vitalismo quien exige una redefinición del concepto de elemento, puesto que la vida es esencialmente autoactividad, y la sujeción de los cuatro elementos a fuerzas externas, causas eficientes, diferentes de ellos mismos, fuera un *noús* de cualquier tipo, u otro tipo de agente, condenaba los componentes últimos de todo fenó-

meno a un grado de pasividad incompatible con la esencia de la vida. Históricamente, el vitalismo y el hilezoísmo desempeñaron una función significativa en calidad de primeras doctrinas sobre el automovimiento de los fenómenos, y, a pesar de su unilateralidad, destacaron lo específico de la vida en contraposición con el mecanicismo, más o menos desarrollado en diferentes etapas. En la alquimia medieval europea, solo al hombre había sido dada la posibilidad de autodeterminación, fruto del trabajo esotérico, pues el *artifex* no hacía otra cosa que imitar, en relación consigo mismo, la obra redentora de Cristo, quien se hiciera inmortal por propio esfuerzo, según antiguas creencias gnósticas, idea introducida por C. Jung.<sup>\*</sup> El hombre puede hacerse inmortal mediante la obra encaminada ya hacia lo divino, o hacia lo demoníaco que según muchas escuelas gnósticas no constituían más que la suprema expresión de la *coincidencia oppositorum*, principio dialéctico que preside la concepción alquímica. Según éste, en el seno de toda sustancia existen, en perpetua tensión, un principio evolutivo y un principio involutivo. La ascensión, degeneración o estatismo de la sustancia provienen del equilibrio entre ambos o de su ruptura, según re-

\* Es conocida la esencia idealista e irracionalista de las posturas filosóficas de la escuela sicoanalítica a la cual pertenece C. Jung, quien realizó numerosos estudios psicológicos, históricos y culturales a partir de su concepto de "inconsciente colectivo". Sin embargo, algunas de sus interpretaciones del simbolismo alquímico han sido aceptadas, al menos como explicativas de un aspecto del problema, ya que no es posible reducir la práctica alquímica en su totalidad a una actitud mística de imitación de Cristo. En realidad, el aspecto religioso, presente en la tradición alquímica, sólo nos explica sus vínculos y diferencias con las religiones, su terminología y simbolismo en buena medida, pero no sus causas, no los móviles del origen y desarrollo histórico de la alquimia.

za ya en la *Tabula smeragdina*, o, más antiguamente, en los *hieroi logoi* órficos, para circunscribirnos al mundo "occidental". De ahí la estrecha relación entre alquimia y hechicería en la Edad Media, exagerada por la imaginación popular y la persecución eclesiástica, pero nada carente de base si recordamos que muchas prácticas opoterápicas empleaban órganos humanos o derivados de éstos (por ejemplo, la llamada "grasa de verdugo") y que en el siglo XVI, aún Paracelso recomendaba para la preparación del homúnculo, alimentar el compuesto en gestación con sangre humana. Sin referirnos al valor que la sangre, como principio vital, ha tenido secularmente en el esoterismo, recordemos que la demonología práctica medieval empleaba el sacrificio humano, total o parcial, como forma negativa de redención. La destrucción expresada alquímicamente en la *Nigredo* constituye el punto de partida de toda transformación. De esta forma interpretaron los alquimistas cristianos el pasaje de los Evangelios según el cual el hombre para alcanzar la vida eterna, debe volver a nacer.<sup>11</sup> La negatividad pues, conduce también a lo absoluto, concepto que encontró su correspondencia en la teología negativa que en distintas épocas desarrollaron el pseudo Dionisio Areopagita, Maister Eckhart y Nicolás de Cusa. El hombre podía ejecutar por sí mismo lo que a otros seres —vale decir, sustancias—, estaba vedado. Sin embargo las ideas de los árabes y hebreos alimentaban la posibilidad de comprender la actividad como propiedad universal. Según la línea neoplatónica que seguía Paracelso, todas las sustancias tienden hacia su "redención" o transformación en incorruptibles, pero el *artifex* puede acelerar este proceso tanto en ellas como en sí mismo, lo que concuerda con la mencionada tesis de M. Eliade sobre el alquimista como dueño del tiempo.<sup>12</sup>

<sup>11</sup> Véase: Juan, cap. 3, 3-7 (Diálogo entre Jesús y Nicodemo). Véase también: Lucas, cap. 17,33; Mateo, cap. 12,40 (Paralelo entre Cristo y Jonás. Recuérdense la simbología de la ballena o Leviatán en la alquimia cristiana). En: *La Biblia*. Trad. de Casiodoro de Reina. Sociedad Bíblica Americana-Sociedad Bíblica Británica y Extranjera. B. Aires, s/f.

<sup>12</sup> Saturno planeta que presidía la fase inicial del *opus*, representativo del plomo, metal venenoso, pesado, corruptible, simboliza también el tiempo y la melancolía, estado que predispone a la reminiscencia, necesaria para el correcto decurso de su obra, según su interpretación neoplatónica, pues implica remontarse a la esencia primigenia, trascendente, o sea, un acercamiento a la absoluta unidad y la inmortalidad. En la conocida pintura de Durero tenemos una prueba de la influencia de dichas concepciones en la cultura humanista alemana.

<sup>10</sup> Zalbidea, V. y otros. *Alquimia y ocultismo*. Barral Editoras, Barcelona 1973, p. 72, "Diálogo de Calid y Morienus".

La medicina espagírica constituyó el aporte más genial de Paracelso a la historia de la ciencia. De ésta hemos de partir para comprender su concepción de los elementos, opuesta a la aristotélica portadora del enfoque vitalista neoplatónico en contraposición con la postura tradicional que subordinaba a la búsqueda del *lapis*, cualquiera de sus aplicaciones maravillosas para la salud, el poder, la riqueza, etcétera. Paracelso subordina a la salud corporal y espiritual todo el proceso alquímico. Transformando el significado medieval del término latino *salus*, al sentido de salvación opone el de salud, como conservación y evolución. Paracelso consideraba la medicina una especie de ciencia de las ciencias pues el hombre, microcosmos y como tal, autodeterminado, es el punto de confluencia de la terapéutica o técnica curativa, la anatomía que describe sus partes, la alquimia, que trata del manejo de sus fluidos y componentes, la astrología, que marca su senda evolutiva por analogía con el macrocosmos y la kábala, que trata del valor mágico del verbo punto de enlace entre la suprema unidad y el hombre. Todo saber digno de ser denominado ciencia gira alrededor del hombre, síntesis abreviada del cosmos. El humanismo renacentista se hace evidente como premisa de esta teoría sobre el valor de ciencia rectora de la medicina. Si el humanismo medieval atendía a la composición del alma humana y su relativa autonomía en relación con Dios y el mundo, el renacimiento engloba también el cuerpo, no sólo como base material para la sustentación del alma sino porque ambos están compuestos por los mismos elementos y es imprescindible comprender su interrelación y estructura, sin lo cual no hay evolución posible. La doctrina neoplatónica, mediante el uso de la analogía, pretende definir un método para el encuentro y fusión definitiva entre el macrocosmos cuya esencia última es Dios y el microcosmos. Es por eso que la importancia del cuerpo y de su esmerado cuidado igualan la del alma. Si entre los neoplatónicos italianos el amor, la belleza o el *modus* constituían puntos polémicos en torno al puente idóneo entre cuerpo y alma. Paracelso sintetiza todos en la medicina espagírica que pretende un cultivo armonioso de ambos dada su indisoluble unidad. ¿Por qué la medicina espagírica o iatroquímica? Para comprender definitivamente su condición de ciencia rectora es necesario el estudio de la composición del cosmos. La clasificación de sus elementos, constitutivos de toda sustancia, principios primordiales simples dependerá, no ya forzosamente de su grado de "pasantez" o "ligereza", sino del tipo

de actividad que los caracteriza. Para ésto, la antigua teoría de los cuatro elementos resultaba obsoleta. El elemento químico, según Paracelso, expresa la forma de actuar, mediante combinaciones, disociaciones o corrupciones de las sustancias entre sí.<sup>12</sup> Si bien no rechaza la existencia de estos cuatro elementos, no resultan a su juicio verdaderamente merecedores de tal nombre, puesto que nada dicen sobre la actividad de los cuerpos o al menos, no la generan. Si la esencia de la materia es la actividad, sólo lo que genera ésta puede tomarse en cuenta al hablar de la constitución de las sustancias. Por eso establecerá su teoría de los tres principios.

Sherwood Taylor ha afirmado acertadamente que el aporte principal de Paracelso consistió en presentar la química o espagírica como "una ciencia relacionada con toda transformación de una sustancia en otra".<sup>13</sup> Siendo la enfermedad una transformación degenerativa y la curación una transformación que conduce a la estabilidad o la evolución ascensional, la relación alquimia-medicina conlleva al estudio de todo cambio, la distinción entre cambios "positivos" y "negativos", y la manera de modificarlos a voluntad, a partir del conocimiento de sus leyes. Si bien los alquimistas no procedieron —no era su interés realmente— a una clasificación de todas las reacciones posibles entre las sustancias, sino que sólo describieron aquellas vinculadas con sus propósitos peculiarísimos, resultan incuestionables sus aportes en cuanto a técnicas operatorias y sus observaciones sobre las propiedades de las sustancias.

Los tres principios, azufre, mercurio y sal, que pone la escuela paracélsica a la tradición, no son absolutamente originales. Sin embargo, es novedoso el enfoque realizado por ésta sobre aquellos. "El Azufre, el Mercurio y la Sal son las tres primeras sustancias que durante la vida permanecen ocultas y que con la separación de la vida se revelan y manifiestan".<sup>14</sup> De esta definición general se desprende que:

- 1) Se interrelacionan esencialmente con la vida.
- 2) Actúan indisolublemente ligados en condiciones naturales. Sólo en condiciones artificiales se separan.

<sup>12</sup> Véase: Paracelso. *Obras completas*, t. 1. Ed. Kier. B. Aires, 1945, p. 152.

<sup>13</sup> Sherwood, Taylor, F. *La alquimia y los alquimistas*. Ed. A.H.R. Barcelona, 1954, p. 226.

<sup>14</sup> Véase: Sherwood Taylor F. Ob. cit. pp. 229-230. Señala aquí en síntesis el devenir del azufre y el mercurio en las teorías alquímicas, mientras que juzga la sal como aporte de Paracelso.

<sup>15</sup> Paracelso. *Obras completas*, T. I, p. 155.

3) La vida es el resultado de la síntesis de los tres, cada uno de los cuales determina un aspecto de la misma.

No hay, como se ve, una distinción, desde el punto de vista químico entre la composición de las estructuras vivas y las no vivas, sino más bien una extrapolación de las características de la sustancia viva al resto de los cuerpos. La química orgánica y la bioquímica estaban en el siglo XVI muy lejos de poder ser siquiera avizoradas. Pero además, la postura hilezoísta de Paracelso lo lleva a apreciar más bien la continuidad que las diferencias entre ambas formas de existencia de la materia. De todos modos, apunta que la manifestación independiente de los principios se produce con la muerte o cuando, en forma de *excremento*, dejan de formar parte de un organismo vivo, lo cual indica una concepción de la vida como organización extremadamente compleja, irreducible a la suma de sus integrantes, cada uno de los cuales despliega completamente la gama de sus características al funcionar en el sistema general.

Pero la especificidad de cada principio puede determinarse. Aquí, las vías experimental y especulativa se complementan hecho perfectamente comprensible a la luz del nuevo enfoque de la naturaleza propio de la época. Ante todo el poder aglutinante de la vida sobre los tres principios se expresa como un fluido imponderable que los engloba, a manera de soplo divino: "Entre todas las sustancias del mundo, existen tres cuyos cuerpos vemos reunidos siempre en el cuerpo de cada uno de los seres. Estas tres sustancias —Azufre, Mercurio y Sal— al reunirse componen los cuerpos, a los que nada ya podrá ser añadido excepto el soplo de la vida y cuanto con él se relacione".<sup>16</sup> La teoría de los fluidos imponderables, que tanta influencia ejerciera en la química ya formada, tiene aquí un punto de partida. El soplo vital relacionado con el calor y su actividad, se transformó fácilmente en el "fluido calórico" o "flogisto". Esta idea transicional entre la alquimia y la química sobrevivía aún en el siglo XVIII.<sup>17</sup> Aquí se contienen dos cuestiones fundamentales: la vida está unida a la presencia del calor (la descripción de los principios demostrará que a la combustión), y además, el calor se relaciona con interacciones internas entre los principios.

Paracelso reafirma en todas sus obras, en especial en el *Paramirum* la importancia y necesidad de la investigación experimental, defendida por los alquimistas

<sup>16</sup> Paracelso. Ob. cit. pp. 149-150.

<sup>17</sup> Véase: Engels, F. *Dialéctica de la naturaleza*. Ed. Pol. La Habana, 1979, "El Calor", pp. 84-88.

a lo largo de la Edad Media: "Sapiencia y experiencia son dobles a su vez: en un lado está la base verdadera de la Medicina; en el otro, hallamos el error mezclado con la seducción.

En el primero de estos grupos están todas las verdades que el fuego proporciona cuando, por medio del arte de Vulcano, realiza la transmutación, fijación, exaltación, reducción, transición y demás operaciones conexas. En esta experiencia las tres sustancias de la naturaleza llegan a descubrirse sean cuales fueran la naturaleza, propiedad, o composición conque aparecieran contenidas en las cosas de todo el Universo del Mundo".<sup>18</sup>

Es decir, que la sabiduría del médico-alquimista proviene, en buena medida, de la experiencia y no de las autoridades contra las cuales reacciona Paracelso. Cabría entonces preguntarse, si la propia tradición hermética no funcionaba a manera de autoridad para los alquimistas. Lull, Calid, Geber, Vilanova ¿no resultaban maestros en el antiguo sentido del término, y por ende, incuestionables?

Para responder esta interrogante debe atenderse al carácter mnemotécnico de los textos alquímicos, al menos en su gran mayoría. El lenguaje críptico y las formas de expresión persiguen el objetivo de indicar al iniciado vías generales para el procedimiento de laboratorio, la preparación espiritual, las condiciones planetarias idóneas, trazan pautas capaces de servir al *artifex* como indicaciones para encontrar su propio camino en la búsqueda de la piedra o el *elixir* y no rígidos e incuestionables dogmas. La medida de los resultados era absoluta: se lograba o no el *lapis*, pero la interpretación de los textos y la ejecución de las operaciones era cuestión personal, lo cual demuestra la multiplicidad de testimonios diversos existentes. De esta forma, todo nuevo descubrimiento podía ser incorporado al acervo general, por lo que no es de extrañar que esta actitud antidogmática de los alquimistas se transmitiera a los temperamentos más audaces de la época, por ejemplo, a Giordano Bruno, cuyos escritos revelan la influencia del hermetismo alquímico.

Las características de los tres principios pueden comprobarse a partir de la experiencia sensible. La observación de sus reacciones, de su comportamiento, sirven de base a la definición de cada uno. Sin embargo, resulta evidente su carácter especulativo y resulta imposible identificarlos con ninguna de las sustancias químicas conocidas en la actualidad. En su definición se incluyen también concepciones propias de los maestros

consagrados y son, en definitiva, síntesis de diversas propiedades.

El *Paraminum* describe los tres principios de la siguiente forma:

—*Azufre*: activo en grado sumo, es el agente que desencadena las reacciones. Tiende al crecimiento, extensión o formación, o sea, actúa en sentido evolutivo. Puede ser de varios tipos: volátil, sólido, fluido, según el sistema del cual forme parte. Condiciona los cambios de estado en los cuerpos.

—*Sal*: de condición pesada, pasiva, fija los cambios, y tiende a conservar los estados de los cuales forma parte. Es el sostén de todo fenómeno, como una especie de "memoria" presente en los cuerpos, que resume toda su historia, el devenir experimentado desde su origen. También puede ser de varios tipos y sufrir cambios de fase.

—*Mercurio*: indispensable como vehículo de toda fuerza, su actividad puede dirigirse en sentido involutivo o evolutivo. Representa la dualidad o ambivalencia de cualquier estado como *contidentia oppositorum*. El mercurio, al cual se alude ya en la *Tabula smeragdina*, como eslabón entre el "camino hacia lo alto" y el "camino hacia lo bajo", puede considerarse el punto nodal de la tríada, transmite el calor del fuego y la estabilidad de la sal, da lugar al movimiento caótico o a la ruptura de los estados de equilibrio, unida a la actividad del azufre. Es, en suma, agente catalítico.

Esta tríada de principios, activo, pasivo, y neutro o dual, corresponde con la interpretación alquímica de la trinidad cristiana: Padre como creador, Hijo como *logos* o sabiduría, Espíritu Santo como fuerza consagratória o elemento mediador que dota al *artifex* de un poder que lo convierte en "enviado" de la divinidad y posibilita la *Imitatio Christi*, pero también se ajusta a la estructura tesis-antítesis-síntesis, presente en toda concepción dialéctica, en este caso, la doctrina idealista objetiva de Plotino: uno, *logos*, *anima mundi*, o, en su forma induista, *rajas-tamas-sattwas*. Su importancia científica radica en expresar el grado de reactividad de las sustancias según la proporción en que los principios se combinan, así como la capacidad potencial de todas éstas de influirse y transformarse mutuamente, según las condiciones específicas. El concepto actual de elementos químicos tiene en cuenta el peso atómico y el tipo de afinidad, o sea, la capacidad reactiva.

Aunque de manera rudimentaria, Paracelso intenta definir sus tres principios también a partir de la capacidad reactiva. Puede hablarse de una interpretación de la naturaleza a partir de su composi-



Sala de disección pre-vesalio.

ción química. Sabemos que, en realidad, un elemento químico se caracteriza por su número atómico, que abarca casi todo el contenido del núcleo y determina la estructura electrónica y por consiguiente, su afinidad. Más adelante, Robert Boyle, en *The Sceptical Chemist*, también hablaría de los elementos como sustancias simples a la manera de Paracelso y su discípulo Van Helmont, pero rechazaría la tríada mencionada por su índole no solo experimental, sino filosófica, que, según su justa interpretación, la convierte en dogma y cierra las puertas a cualquier renovación, resultante de descubrimientos ulteriores.

Paracelso concibe la estructura de la materia de manera dinámica, pero invariable. Aunque espera mucho de la ciencia futura, no parece admitir una renovación de las nociones fundamentales introducidas, sino más bien de las técnicas a partir de lo cual podrían obtenerse resultados en su tiempo inconcebibles. De acuerdo con lo expresado se vinculan los tres principios con los cuatro elementos. El *Paraminum* establece que habrá tantos tipos de azufre, sales y mercurios, como formas concretas de existencia de la materia aparezcan, pues su actividad, a pesar de permanecer esencialmente inalterable, modula su gama de acciones o efectos, según el medio del cual forme parte. La química contemporánea, sostiene una postura análoga: los mecanismos de reacción de las sustancias varían según la densidad, viscosidad, acidez, basicidad, etcétera, del medio reactivo.

<sup>18</sup> Paracelso, Ob. cit. p. 147.

Los tres principios en suma, expresan fuerzas relacionadas con los elementos: sustrato, de manera tal que pueden compararse en cierta medida azufre y fuego, sal y tierra, y el mercurio con el binomio agua-aire. No debe olvidarse la interpretación astrológica del mundo que compartía Paracelso con muchos de sus contemporáneos. Según ésta, fuego y tierra, absolutos y opuestos entre sí, se relacionan respectivamente con aire y agua, relativos, que portan la actividad incesante del primero y el carácter fijador de la segunda. Si, de acuerdo con la doctrina astrológica, tomamos al fuego como expresión de lo "eterno masculino" y la tierra, de lo "eterno femenino", los otros dos, transicionales, resultarán sintetizados en el mercurio, representado en el simbolismo hermético como el hermafrodita. De ahí la estructuración del macrocosmos en doce constelaciones o "signos", que afectan por igual al microcosmos y resultan de la combinación de cada uno de los cuatro elementos con cada uno de los tres principios. Es decir, componente y fuerza se vinculan indisolublemente en la teoría paracelsica. Desde luego que estas últimas ideas, totalmente ajenas a la ciencia contemporánea, denotan el peso de la tradición especulativa en Teofrasto y, además, la esencia contradictoria del pensamiento renacentista, puente entre dos mundos muy diferentes y, por ende, mezcla constante de ciencia y mito y de ciencia y religión,<sup>19</sup> nada ajena al pitagorismo, cuyos vínculos con el neoplatonismo son harto conocidos.

De todo esto se desprende que Paracelso concibió el mundo en términos químicos, de acuerdo con lo que en su época podía entenderse bajo tal denominación. Para él todas las cosas se relacionan íntimamente por su constitución interna e invisible, aunque verificable a través del estudio de su comportamiento en cualquier tipo de condiciones. Hemos hablado desde el inicio de una concepción vitalista en Paracelso que plantea la

actividad como manifestación de la esencia última del organismo universal. Esta se representa por el llamado "principio M". El término *principio* tiene aquí un significado más amplio, pues entraña la idea de actividad universal, a manera de un metabolismo cósmico, sin descender a formas particulares.

El principio M. es, bien "aquella cosa

indefinida e invisible que mantiene y conserva nuestra vida así como las de todas las cosas del universo dotadas de sentimiento y que proviene de los astros", es decir, "Algo que impida su consumición (del cuerpo) por la vida y que tienda a conservarlo en su propia sustancia", o bien, lo "que hace vivir el firmamento, que conserva y calienta el aire y sin el cual se disolvería la atmósfera y perecerían los astros".<sup>20</sup> Equivale a la Múmia en el hombre, y en cierto sentido, al Eros platónico, tan cercano al de Empédocles. Es fuerza aglutinante, pero también posibilita el equilibrio entre todos los fenómenos de la naturaleza y, en cada uno en particular la autoconservación y reproducción. El vitalismo de Paracelso supone al mundo un gigantesco ser viviente, dotado de los rasgos propios de todo organismo vivo. Compárese esta definición del principio M con la que nos ofrece sobre el metabolismo Linus Pauling:

"Todas nuestras ideas sobre la vida implican reacciones químicas (. . .) una planta o un animal tienen, en general capacidad para ingerir ciertas sustancias, alimentos, someténdolas a reacciones químicas que llevan consigo la liberación de energía y para segregarse (eliminar) algunos de los productos de las reacciones. Este proceso por el cual el organismo utiliza el alimento que ingiere, sometándolo a reacciones químicas, se denomina metabolismo".<sup>21</sup>

El mecanicismo, que en el siglo siguiente se abrió paso en las ciencias y la filosofía, redujo los organismos vivientes a máquinas en la misma medida que lo hizo con el sistema total de la naturaleza. Para estimar en su verdadero valor teorías como ésta, serían necesarios siglos, aunque los testimonios de Leibniz y Hegel demuestran que no fueron olvidadas por completo. Hay, en suma, un metabolismo de la naturaleza, según el cual el principio M repone la energía que consume el continuo desgaste producido por la interacción de los fenómenos. Cabría preguntarse, cosa que probablemente no hizo Paracelso, al menos en el mismo sentido, si el universo como unidad experimenta un intercambio a su vez (¿con qué, en ese caso?).

La infinitud del mismo, ya presente en las ideas del Cusano, muy distinta de *agregatum* indefinido de elementos, era una constante en la filosofía cosmológica de la época. Aunque en Paracelso po-

demos ver sin duda alguna un elementalista, su elementalismo no conduce a posturas rígidamente metafísicas como por ejemplo, la atomística de Gassendi, puesto que cada principio es una energía transformadora independientemente de sus propiedades físicas. Al igual que el cambio de fase no altera la naturaleza interna del elemento, éste puede hallarse según Paracelso, en distintas formas, incluso dentro de los límites de una fase. En la actualidad no sólo conocemos los estados alotrópicos sino también diversos compuestos como formas más comunes de presentarse en estado natural, un elemento químico.<sup>\*\*\*</sup> Mucho antes de la primera mitad del siglo XVI, los alquimistas habían obtenido metales en diferentes fases y trabajado con distintos compuestos de los mismos. La metalurgia, cultivada durante siglos, ayudó a conocer los tipos de menas más frecuentes y los procesos de separación del metal.<sup>\*\*\*\*</sup> No olvidemos que sus años de trabajo en los laboratorios de los Fugger lo adiestraron en este sentido. Paracelso llegó a comprender que las propiedades químicas, características de los principios, persisten al variar las propiedades físicas, al menos en el rango conocido en su época. De ahí que los cuatro elementos, aunque existen, sólo merecen tal nombre como formas de manifestación de la materia, correspondientes a los estados sólido, líquido, gaseoso y a la combustión, considerada como estado independiente. Hasta que fuese descubierto el oxígeno no podría desecharse

\*\*\* Paracelso se refiere a los "diferentes azufres" y, de la misma forma, a la sal y al mercurio. Aclara que sus cualidades y función varían, aunque no su condición sustancial. Así escribe: "En cuanto al mercurio, cuya naturaleza no es viril por sí misma, necesita la influencia astral del Sol para sublimarse dando lugar a numerosas preparaciones pero conservando siempre en un sólo cuerpo su propia esencia". Más adelante indica sobre el azufre y la sal que "éstos cuerpos pueden manifestarse bajo múltiples formas" (Obras completas, t. 1, p. 159). Las modificaciones alotrópicas son "formas de cristalización diferentes de una misma sustancia, que, por tanto, presentan distintas propiedades" (Franko, Hermann, *Diccionario de Física*. Ed. Labor, S. A. Barcelona, 1967, t. 2 p. 1194). Sin conocimiento preciso de estructuras cristalinas ni técnicas para determinar identidad de composición independientemente de las propiedades, Paracelso enuncia su hipótesis sobre la existencia de sustancias "simples" o elementos bajo una gama posible de manifestaciones.

\*\*\*\* Debe tenerse en cuenta la estrecha relación entre los ritos metalúrgicos y mitos relacionados con éstos, y las operaciones alquímicas. Sin olvidar los metales como punto de enlace, hay que considerar también la simbología y los tratados que sintetizan ambas vertientes, los cuales, en tiempos de Paracelso, estaban ya consagrados por una larga tradición.

<sup>19</sup> Véase: sobre este tipo de síntesis:

Lenin, V.I. Ob. cit. pp. 241-244. Las observaciones de Lenin acerca del pitagorismo contienen una valoración positiva de teorías de origen especulativo sobre los números, el universo, el éter, los elementos, en una época en la que aún no era posible una investigación estrictamente científica.

<sup>20</sup> Paracelso. Ob. cit. pp. 58-59.

<sup>21</sup> Pauling, Linus. *Química general*. Ed. Revo-lucionaria. Instituto del Libro, La Habana, 1969. p. 573.

radicalmente esta teoría, que sobrevivió en la idea del flogisto. Por tanto, lo "elemental" en la naturaleza son los tres principios: "Debemos conocer y explorar las tres sustancias, no por simple inteligencia, sino por la experiencia de la disolución de la naturaleza y la averiguación de sus propiedades".<sup>22</sup>

¿Por qué hemos hablado de Paracelso como una de las figuras que rompen con el paradigma aristotélico y van sentando las bases para la formación de nuevas líneas de investigación en las ciencias? Podemos resumir sus aportes de la siguiente manera:

1. Como afirmara Sherwood Taylor, concibe ya la química como una ciencia sobre cualquier "transformación de una sustancia en otra".<sup>23</sup> Con ésto, rompe con el enfoque puramente místico de la alquimia y extiende su alcance a toda la naturaleza y no sólo a aquellos fenómenos relacionados con la búsqueda del *lapis*, objetivo clásico de la misma.
2. Presenta una visión del mundo en términos químicos, a partir de la constitución de todos sus objetos por los mismos principios, lo cual rompe con la rígida demarcación entre lo vivo y lo no vivo.
3. Caracteriza el elemento químico por su forma de actividad, de intervención en la reacción, que a través de su

afinidad con otros elementos da lugar a los compuestos.

4. Concibe la alquimia como una ciencia de base eminentemente experimental, que comprueba sus resultados por el método de ensayo y error, a pesar de la gran dosis de teoría especulativa que aún contiene.
5. Establece la utilidad de la ciencia química, tanto en lo que puede beneficiar al hombre por sí misma, como a través de su aplicación a la medicina. Esta idea será examinada más profundamente al referirnos al microcosmos.
6. Comprende la independencia de las propiedades físicas y químicas en los límites descriptivos de las ciencias de la época.

No podemos compartir interpretaciones como las de Jung, Graf o Hull, quienes subrayan excesivamente las facetas místicas de Paracelso, hasta soslayar su valor científico, ni posturas como las de Allendy, que pretende ver en él un científico moderno. Kearney, Sarton, Vannier, Mieli, Shitikov, intenta valorarlo como figura de transición sin olvidar, pese a sus lastres, su condición de forjador de la ciencia moderna. Su posición filosófica dentro de los marcos del idealismo objetivo, contiene sin embargo raíces gnoseológicas de indiscutible valor. La falta de delimitación precisa del objeto de estudio de la filosofía en relación con las ciencias particulares propias de esta etapa, explica la estrecha relación existente entre el problema cosmológico y sus aportes a la historia de la ciencia. Es desde este punto de vista que consideramos posible un análisis verdaderamente objetivo de la significación de Paracelso en el pensamiento moderno.

Suele considerarse que la química inaugura su existencia como ciencia independiente de la alquimia con Robert Boyle, quien en su *Sceptical chemist* (1661), establece una definición moderna de elemento químico, que pretende apartarse de la especulación y se vincula con el atomismo. Sin negar la precisión indiscutible que logra Boyle en cuanto a la concepción de la química como ciencia capaz de captar relaciones mensurables, diferente de toda interpretación espiritualista, debemos sin embargo señalar la proximidad entre las concepciones de uno y otro sobre el objeto de esta ciencia y de los rasgos a tomar en cuenta en el estudio de las sustancias. En el marco de la primera revolución científica global, Paracelso se cuenta entre aquellos que tendieron un puente entre la labor crítica y la labor constructiva que se suceden de los siglos XV y XVII. Claro está que en el caso específico de la química, las dificultades para el investiga-

dor se acrecientan dado el alto contenido místico y especulativo de la alquimia y la radical diferencia de sus propósitos con respecto a la química. Al igual que no puede juzgarse la alquimia meramente como una química primitiva, tampoco podemos juzgar de la misma forma a figuras tan diferentes como Zozimo (siglo III de n.e.), Flamel (siglo XIV) y Paracelso, que muestran la clara evolución de la alquimia, desde el ocultismo a una ciencia sobre la naturaleza cargada, como muchas en el Renacimiento, de elementos místicos. No olvidemos que astrónomos como J. Kepler vincularon la doctrina pitagórica sobre la música de las esferas celestes con una investigación positiva de la estructura del sistema solar. El caso de Paracelso y su aparente conciliación de campos tan contradictorios como la ciencia y el ocultismo, era demasiado frecuente en su época como para subrayarse excesivamente en detrimento de su valor. Sus métodos de curación, tan eficaces como podían serlo en el siglo XVI, desconocedor de la asepsia, los antibióticos, incluso la esencia de la combustión, muestran el resultado positivo de sus investigaciones, que aportaron a la historia de la ciencia una nueva visión sobre las sustancias y su empleo. Así lo confirman sus palabras: "el alquimista es, pues, el que convierte en algo útil para el hombre lo que brota de la naturaleza, el que lo convierte en aquello que la naturaleza ha querido y ordenado que llegue a ser".<sup>24</sup> Suele considerarse uno de sus mayores defectos el no haber vinculado sus descubrimientos experimentales con las matemáticas. Es cierto que un estudio sobre las proporciones y pesos de las sustancias que intervienen en determinadas reacciones, en la preparación de medicamentos, falta. Bacon criticará con justa razón esta insuficiencia;<sup>25</sup> pero ¿acaso eran matematizables los resultados de las investigaciones químicas y médicas en la época? El nivel descriptivo de estas ciencias no permitía aún establecer regularidades expresables en forma de ley y la falta de una simbología química adecuada dificultaba mucho más el trabajo.

Sin embargo, no son sólo los tres principios el centro de los estudios paracelsicos, sino también el microcosmos. Se hace imprescindible por lo tanto, el análisis de la composición y funciones del mismo.

<sup>24</sup> Cita del *Paragranum*, en: Cassirer, E. *El problema del conocimiento*. T.I.F.C.E. México, 1953, p. 240.

<sup>25</sup> Véase: Bacon, F. *Del adelanto y progreso de la ciencia divina y humana*. Ed. Lautaro, B. Aires, 1947, pp. 222-225.

<sup>22</sup> Paracelso, Ob. cit. p. 149.

Compárese esta definición con algunas contemporáneas sobre el objeto de la química: "Chemistry is a study of the properties, the composition and the structure of matter, the changes that occur in matter, and the energy that is released or absorbed during these changes" (L. . .) "The activity that is primarily concerned with the observation, tabulation and correlation of facts is sometimes called descriptive chemistry" Ouagliano, J. *Chemistry*. Instituto del Libro. La Habana, 1968, pp. 3 y 4 (La química es) "La ciencia que trata de la constitución, propiedades y transformaciones de la materia". Babor, J. A. e Ibarz, J. *Química general moderna*. Ed. Ciencia y Técnica. Instituto del Libro, La Habana, 1970, p. 2. " . . . el objeto final de la química es el de la constitución de la materia puesto que este conocimiento permite identificar y diferenciar las sustancias, comprender sus propiedades y establecer su comportamiento frente a otras clases de sustancias o bajo la acción de cualquier forma de energía". (Babor e Ibarz, Ob. cit. p. 3).

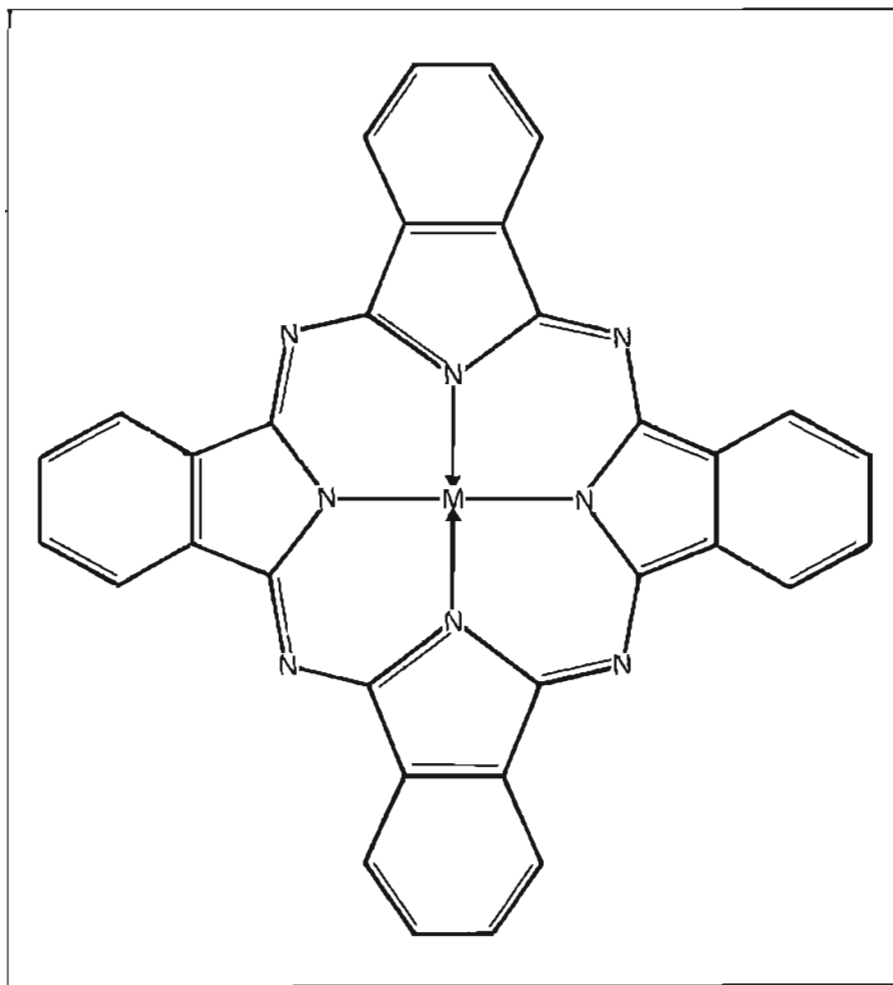
"La química es la ciencia que estudia las sustancias: su estructura, sus propiedades y las reacciones que las transforman en otras sustancias" (Pauling, L. Ob. cit. p. 3).

"Chemistry is concerned with the occurrence, isolation and artificial preparation of the different sorts of matter with the study of their composition, properties and reactions with the systematic and the reasons for the phenomena observed" (Remy, H. *Treatise of inorganic chemistry* Volumen I. Ed. Revolucionaria, Instituto Cubano del Libro, La Habana, 1974, p. XIX).

<sup>23</sup> Sherwood Taylor, F. Ob. cit. p. 227.

# Simetría ¿para qué?

MARIA EUGENIA MENDOZA / CRISTOBAL TABARES



Molécula de ftalocianina, la cual posee un eje de simetría  $C_2$  y dos planos verticales. El grupo puntual que le corresponde es  $C_{2h}$ .

Quando se estudia la materia en cualquiera de sus formas, es necesario tener una interacción directa con ella mediante la realización de experimentos y además es también necesario poseer los conocimientos teóricos que permitan la interpretación de los mismos. Existe una tendencia a subestimar la importancia de la teoría, sin ver que ella puede permitirnos una mejor interpretación de nuestros experimentos, una mejor planificación e incluso anticiparnos al resultado, siendo esta última posibilidad no menos importante que las anteriores, ya que de no existir una correspondencia entre la teoría y la práctica, tenemos la evidencia de que en alguna de ellas existen deficiencias.

Después de esta breve introducción es claro que hablaremos de teoría. Se trata de una teoría con aplicaciones en diferentes ciencias tales como la Física, la Química y la Biología.

La simetría es un método de observación y descripción de leyes invariantes (leyes de conservación), que son modificaciones específicas de la ley que establece que la materia no puede ser creada ni destruida.

Shubnikov y Koptsik (1974) definen la simetría como "el grupo de automorfismos que conserva la totalidad cualitativa de los sistemas bajo consideración".

Reflexionemos sobre este enunciado: se establece que existen sistemas en los que se pueden realizar rotaciones, reflexiones, etc. (automorfismos) y permanecen invariantes: una vez realizada una operación el sistema es equivalente, es decir, indistinguible del inicial.

Dicho de otra manera, la teoría de simetría considera que todas las transformaciones de un sistema son aplicadas a un conjunto de elementos, estos y sus relaciones estructurales son conservados como un todo único.

La importancia del método radica en que con él se tiene la capacidad de revelar las invariantes de las transformaciones, es decir, aquello que se conserva en un cambio, y describir así la estructura interna del sistema.

Si se conoce la simetría de una molécula o el entorno de un átomo, se puede saber el número y clases de niveles de energía posibles, qué interacciones y transiciones pueden tener lugar entre ellos, predecir el número de vibraciones fundamentales, la estructura de los espectros infrarrojo y Raman (Cotton, 1963); la existencia de un momento dipolar eléctrico, la presencia de actividad óptica (Atkins, 1982). Las consideraciones de simetría en las teorías físicas son aplicables a dominios tan variados como la teoría de transiciones de fase, el estudio de inestabilidades hidrodinámicas, la teoría de bifurcaciones o el estudio de defectos en sistemas físicos y biológicos (Boccaro, 1981).

En el caso de los sólidos, la gran mayoría de los cuales son cristalinos

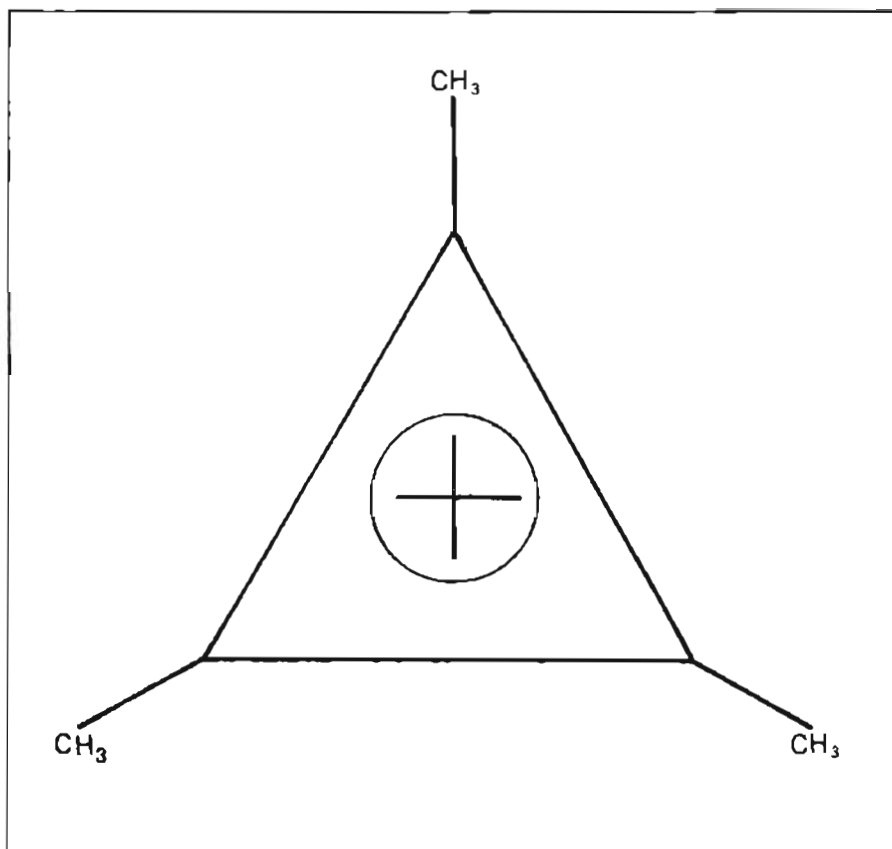
(es decir, los átomos que los constituyen están dispuestos en una forma regular) el conocimiento de los detalles de su arreglo atómico es de una gran importancia. Determinando la simetría de un monocristal es posible restringir las propiedades físicas que se pueden esperar de él, tales como la piezoelectricidad, la piroelectricidad, el carácter óptico, etc. Mediante la simetría, es también posible describir la estructura de los materiales; conociendo las posiciones de los átomos en el espacio podemos calcular las distancias y ángulos que existen entre ellos y de esta forma intentar explicarnos por qué presentan tal o cual propiedad.

Por ejemplo, Mooser y Pearson (1956) propusieron una relación mediante la cual puede predecirse un comportamiento semiconductor, ésta relación requiere, entre otras cosas, el número de enlaces anión-anión por anión y catión-catión por catión, datos que proporciona el conocimiento de la estructura.

Para los superconductores, Matthias y colaboradores (1965) describieron varios criterios cristalquímicos útiles para encontrar superconductores con altas temperaturas de transición y altos campos críticos.

Un ejemplo más conocido de la relación estructura-propiedades lo constituye el carbono, elemento que cristaliza en dos estructuras diferentes: diamante y grafito. El diamante tiene una alta resistividad eléctrica, mientras que el grafito es un semimetal anisotrópico, cuya conductividad es mayor en direcciones paralelas a las capas de grafito.

Hemos visto algunas de las aplicaciones que actualmente tiene la simetría en la ciencia, sin embargo el concepto no es nuevo, en Europa el primero en formalizar los principios de simetría y los números fue Pitágoras (582-500 a.n.e.). Más tarde Theaetetus (415-369 a.n.e.) llegó a establecer la existencia de solo cinco sólidos regulares. La extensión de éstas ideas con las propiedades de la materia surge en esta misma escuela, sin embargo es Platón quien la divulga en el diálogo "Timeo", en donde ofrece explicaciones para diferentes transformaciones tales como la fusión, la solidificación, la corrosión, etc. Las ideas de Platón ejercieron una gran influencia en la Edad Media y aún más tarde. Dalton sugiere que los átomos de oxígeno deben ser tetraedros regulares. Wollaston propone que para caracterizar un compuesto, además de conocer los números relativos de los átomos combinados, es necesario adquirir una concepción



Catión Trimetilciclopropeno. Molécula que presenta los ejes de simetría  $C_3$  y tres  $C_2$ , además de tres planos verticales y un plano horizontal, por lo que el grupo puntual al que le corresponde es el  $D_{3h}$ .

geométrica de su arreglo relativo en tres dimensiones. Más tarde son Pasteur, Le Bel, Van't Hoff y Werner quienes prosiguen ésta idea (Gorman, 1961). En 1894, Pierre Curie publica un artículo fundamental sobre la simetría de los fenómenos físicos, donde enuncia lo que actualmente se conoce como el principio de Curie: "cuando ciertas causas producen ciertos efectos, los elementos de simetría de las causas deben encontrarse en los efectos producidos. Cuando ciertos efectos revelan una cierta asimetría, esta asimetría debe encontrarse en las causas que les dieron origen".

Finalizaremos diciendo que todo aquel que se interese en el tema puede iniciarse en los aspectos cualitativos del mismo, para lo cual recomendamos la lectura de la referencia (Weyl, 1952) y para una mejor comprensión es necesario familiarizarse con la teoría de grupos, que es la discusión cuantitativa de la simetría. Esta teoría proporciona una excelente reflexión del movimiento de la materia, representado este como la unidad dialéctica de los momentos de cambio y de conservación.

En cada proceso material hay que buscar las leyes que lo gobiernan, sus

interrelaciones y las cantidades que se conservan.

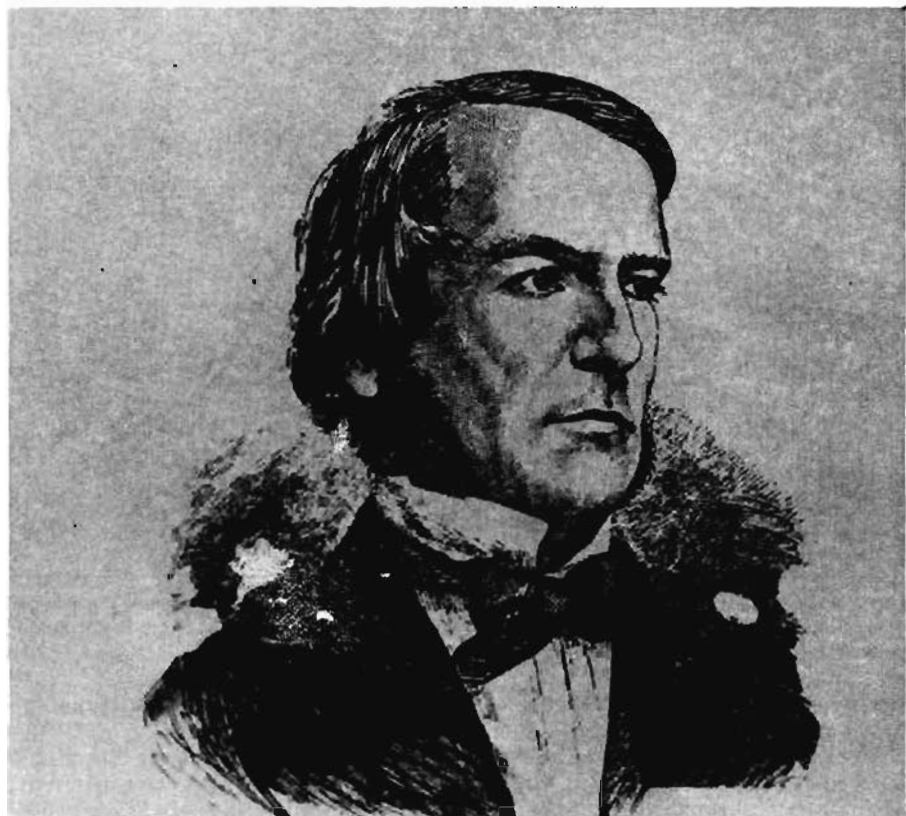
Quienes han desarrollado este conocimiento nos han legado una representación del orden, la simetría y la belleza que prevalecen en toda la naturaleza.

#### Bibliografía

- Atkins, P. W. (1982) "Physical Chemistry", 2nd. ed., Oxford University Press.
- Boccara, N. (1981) "Symmetries and broken symmetries", IDSET-París.
- Cotton, F. A. (1977) "La teoría de grupos aplicada a la Química", 2a ed. Limusa.
- Gorman, M. (1961) *J. Chem. Ed.*, 38, 2, 99 - 101.
- Matthias, B.T., Geballe, T.H., Compton, V. B. (1965) *Rev. Mod. Phys.*, 35, 1.
- Mooser, E. M., Pearson, W. B. (1956) *J. Electron.*, 1, 1.
- Shubnikov, A. V., Koptsik, V. A. (1974) "Symmetry in science and art" Plenum Press.
- Weyl, H. (1952) "Symmetry", Princeton University Press.

# El Álgebra Lógica de George Boole

MAURICIO BEUCHOT



George Boole (1815-1864).

## Introducción

El propósito de este trabajo es presentar las ideas fundamentales del cálculo de Boole, intercalando comentarios sobre el procedimiento que éste siguió en su constitución y tratando de manifestar sus supuestos filosóficos. Esto será de alguna ayuda para entender las aplicaciones del álgebra booleana en la actualidad partiendo de una comprensión más profunda de sus fundamentos lógicos-semánticos, es decir, filosóficos.

George Boole (Lincoln, Inglaterra, 1815 – Cork, Irlanda, 1864) es considerado como el primer autor que presentó un cálculo lógico aceptable, por lo que recibe el galardón de ser el auténtico fundador de la lógica matemática (Bochenski, pp. 294 y 312-313; Kneale, b, p. 376; Dumitriu, p. 39). Pero todavía más importante resulta el hecho de que, a pesar de comprensibles deficiencias e imperfecciones, su álgebra se sigue usando actualmente en varios aspectos.

Partiendo de la matemática, Boole construye su cálculo para la lógica, aunque no se da entre ellas una correspondencia biunívoca; mantienen algunas diferencias notables. El cálculo booleano abarca tanto la lógica de proposiciones analizadas (o lógicas de clases, términos o cuantores) como la lógica de proposiciones sin analizar (o lógica de juntores). Es un sistema bivalente (no admite intermedio entre los dos valores "verdadero" y "falso") que procede tanto por leyes como por reglas de inferencia; y, además, busca su aplicación práctica como metodología de la ciencia.

Las dos obras principales de Boole son *The Mathematical Analysis of Logic* (1847) y *The Laws of Thought* (1854). Nos centramos en esta última, pues nos ofrece los aspectos más filosóficos de su cálculo, a saber, su concepción del lenguaje, de sus leyes y de los tipos de enunciados. Desarrollaremos aquí específicamente estos tres temas.

## 1. Lenguaje y lógica

Boole concede gran relieve al análisis lógico del lenguaje. De la semiótica del lenguaje, encontramos que toma en cuenta sobre todo la sintaxis y la semántica, no tanto la pragmática. Pero es que, dada la formalidad de su cálculo o álgebra de la lógica, la dimensión semiótica más pertinente era la sintaxis (Beuchot, a, pp. 14 y 303 ss.). La intuición de Boole comienza al resaltar el aspecto sintáctico del lenguaje como la vertebración estructural del razonar: el lenguaje es el instrumento del pensamiento, y, ya que buscamos las leyes del pensamiento, éstas pueden rastrearse en el lenguaje (Boole, p. 24). A partir de él establece una álgebra o cálculo; pero no se contenta con adaptarlo sin más a la lógica, cosa que ya otros escritores habían hecho (Beuchot, b y c), sino que explicita la naturaleza misma de cálculo lógico, bien consciente de que lo desentraña a partir del lenguaje, como la sintaxis lógica de éste.

El lenguaje es restringido por Boole a su aspecto material de lenguaje escrito: atiende a la corporiedad gráfica del signo lingüístico, sin abordar los otros problemas que surgen en torno a él. A semejanza del álgebra, todas las operacio-

nes del lenguaje —que es el instrumento del razonamiento y cuyas leyes principales se buscan— pueden realizarse mediante un sistema de signos compuestos de los siguientes elementos: (i) Símbolos literales, como  $x$ ,  $y$ , etc., que representan cosas como temas de nuestras concepciones. (ii) Signos de operación, como  $+$ ,  $-$ ,  $\times$ , que están en lugar de las operaciones de la mente por las cuales las concepciones de las cosas se combinan o resuelven de modo que formen nuevas concepciones que envuelven los mismos elementos. (iii) El signo de identidad  $=$  (Boole, p. 27).

## 2. Las leyes del simbolismo

En seguida, Boole clasifica los signos adoptando un criterio generativo (pueden combinarse de manera simple y por leyes simples, y de ello se generan todas las formas concebibles del lenguaje). Constituyen tres clases: (i) "Signos apelativos o descriptivos, que expresan el nombre de una cosa o alguna cualidad o circunstancia que le pertenezca" (Boole, pp. 27-28). Estos son el sustantivo —propio y común— y el adjetivo. Designan una clase de individuos, y pueden representarse por una letra, p. ej.  $x$  puede significar la clase de los hombres. También pueden juntarse, y, así,  $x$  puede significar la clase de las cosas blancas, y la clase de los carneros y  $z$  la de las cosas cornudas, y entonces  $xyz$  significará la clase de los carneros blancos cornudos, i.e. esta conexión de conjuntos tiene el sentido de la multiplicación o producto lógico.

Hay ciertas leyes que se aplican a esta clase de expresiones. La primera es la siguiente:

$$(1) \underline{xy} = \underline{yx}$$

que corresponde a la ley de la conmutación para la multiplicación o el producto; es decir, el orden de los símbolos es indiferente. Por otra parte, cuando dos símbolos representan lo mismo, i.e. cuando  $\underline{xy} = \underline{x}$ , en realidad se trata de  $\underline{xx} = \underline{x}$  y  $\underline{xx}$  puede representarse como  $\underline{x^2}$ ; por lo cual, obtenemos otra ley general:

$$(2) \underline{x^2} = \underline{x}$$

que es la ley de la tautología, y con ella se evitan repeticiones innecesarias de palabras idénticas. Esta es una ley que no rige en el álgebra numérica y que fue implementada por Boole para el álgebra lógica.

Pasamos, entonces, a los elementos simbólicos de la clase (ii): "Signos de las operaciones mentales en las que colecta-

mos partes en un todo o separamos un todo de sus partes" (Boole, p. 32). Estos signos se intercalan entre los signos de la clase anterior, para tener fórmulas bien formadas. P. ej. tenemos el " $y$ " —conjunción— y el " $o$ " —disyunción—, etc. En concreto, " $y$ " y " $o$ " tienen leyes idénticas a las del signo " $+$ " en aritmética. En efecto, represente  $\underline{x}$  a "hombres" y  $\underline{y}$  a "mujeres", y " $+$ " esté en lugar de " $y$ " y " $o$ "; tendremos:

$$(3) \underline{x + y} = \underline{y + x}$$

que es la ley de la conmutación de la suma. Añádase además el símbolo  $z$ , representando el adjetivo "europeos" —que, según Boole, tiene la misma categoría sintáctica que el sustantivo—, y entonces decir "hombres y mujeres europeos" será lo mismo que decir "hombres europeos y mujeres europeas"; así:

$$(4) \underline{z(x + y)} = \underline{zx + zy}$$

que es la ley de la distribución de la suma. Ambas son las leyes que gobiernan el uso del signo " $+$ ", el cual representa la agregación de partes en un todo. Pero también se puede hacer lo opuesto, i.e. quitar partes a un todo y se expresará con el signo opuesto, a saber, " $-$ ". En consecuencia, "todos los hombres, excepto los asiáticos", se representa como  $\underline{x - y}$ . Y también es indiferente el orden en que se expresen los términos:

$$(5) \underline{x - y} = \underline{-y + x}$$

que es la ley de la conmutación de la resta. A semejanza de (4), i.e. con la suma, también esto sucede con la resta: si  $\underline{x}$  representa la clase "hombres", y la clase "asiáticos" y  $\underline{z}$  la clase "blancos", añadir "blancos" a la expresión "los hombres, excepto los asiáticos", será lo mismo que decir "los hombres blancos, excepto los asiáticos blancos"; de la siguiente manera:

$$(6) \underline{z(x - y)} = \underline{zx - zy}$$

que es la ley de la distributividad de la resta. Podemos interpretar claramente que Boole pretende expresar el hecho de que lo que se adscribe a los miembros del todo se adscribe a los miembros de todas sus partes, de cualquier modo como se conecten entre sí, i.e. da una versión de los principios aristotélicos *dictum de omni y dictum de nullo*.

La clase (iii) de símbolos es la siguiente: "Los signos por los cuales se expresa la relación, y por los cuales formamos proposiciones" (Boole, p. 34). A esta clase pertenecen en general todos los

verbos; pero Boole dice que en realidad basta con el verbo "ser", ya que todos los otros verbos pueden reducirse a él y a uno de los elementos de la clase (i). En otras palabras, Boole adopta la idea semántica tradicional de que el verbo "ser" es el verbo sustantivo y todos los demás verbos adjetivos, y que los verbos adjetivos pueden parafrasearse con el verbo "ser" y el participio, adjetivo o sustantivo derivados del otro verbo en cuestión.

El signo para el verbo "ser" o cópula es " $=$ ". Con ello Boole da una interpretación de la cópula predicativa o proposicional como identidad. Las leyes de este símbolo son consideradas por Boole como axiomas. Sea la proposición "las estrellas son los soles y los planetas", representando "estrellas" por  $\underline{x}$ , "soles" por  $\underline{y}$  y "planetas" por  $\underline{z}$ ; entonces:

$$(7) \underline{x = y + z}$$

De ello se deduce que las estrellas, exceptuando los planetas, son soles, i. e. la siguiente ecuación:

$$(8) \underline{x - z = y}$$

El término  $\underline{z}$  se ha cambiado de un lado a otro de la ecuación, mudando además su signo; esto corresponde a la regla algebraica de la transposición.

Boole enuncia para la igualdad los dos axiomas correspondientes del álgebra:

(i) Si cosas iguales se añaden a cosas iguales, los todos son iguales.

(ii) Si cosas iguales se sustraen a cosas iguales, los residuos son iguales.

También ve que se aplica a la lógica la ley algebraica de que si los dos miembros de una ecuación son multiplicados por la misma cantidad, los productos son iguales. Así, de  $\underline{x = y}$  se infiere  $\underline{zx = zy}$ . Pero hay un punto en el que la lógica no coincide con el álgebra, pues no vale la inferencia inversa a la anterior, i.e. de  $\underline{zx = zy}$  no se puede inferir  $\underline{x = y}$  válidamente como verdadera (sólo cuando se sabe que  $\underline{z = 0}$ ). Dicho de otra forma, no vale para la lógica el axioma algebraico de que ambos lados de una ecuación pueden ser divididos por la misma cantidad. Con todo, Boole asegura que este último axioma no tiene la generalidad de los otros que se han considerado.

Por lo demás, la exacta analogía de la lógica con el álgebra numérica no preocupa demasiado a Boole; pues, asimismo, hay que recordar que los símbolos del álgebra lógica están sujetos a la ley especial  $\underline{x^2 = x}$ , a diferencia de los símbolos del álgebra numérica. Y, lo que es más decisivo, en la lógica sólo hay, según Boole, dos símbolos de números:  $\underline{0}$  y  $\underline{1}$ , en los cuales se cumple dicha ley, pues  $\underline{0^2 = 0}$  y  $\underline{1^2 = 1}$ . Claramente

podemos decir que Boole admite solamente los valores 0 y 1 porque su lógica es bivalente (i.e. semánticamente 0 y 1 corresponden a los valores *falso* y *verdadero*, respectivamente) y porque en ellos se cumplen todas las leyes que ha establecido para la lógica; en especial, como hemos visto, la de  $\underline{x}^2 = \underline{x}$  y la última ley que mencionamos antes. Así, pues, dice: "Concebimos, entonces, un álgebra en la cual los símbolos  $\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}$  etc. admitan indistintamente los valores 0 y 1, y sólo estos valores. Las leyes, los axiomas y los procesos de tal álgebra serán idénticos en su totalidad a las leyes, los axiomas y los procesos de un álgebra de la lógica. Únicamente las separará una diferencia de interpretación" (Boole, pp. 37-38). He aquí su gran innovación y su verdadera aportación a la historia de la formalización de la lógica (Kneale, a, pp. 149-175); no sólo adapta un cálculo matemático a la lógica, sino que estudia la naturaleza del cálculo lógico en sí mismo y traza las direcciones por donde puede orientarse su desarrollo.

Finalmente, Boole asevera que los elementos del lenguaje ordinario que no ha tomado en cuenta se reducen a los que ha tratado (i.e. sustantivo, adjetivo, verbo y las partículas "y" y "excepto"), o bien sólo contribuyen a redondear su significado. El pronombre se reduce al sustantivo o al adjetivo, el adverbio es sólo un aditamento del verbo, y las preposiciones contribuyen a expresar las circunstancias y relaciones de los objetos significados por los símbolos literales. Y las conjunciones como "si" y "o" se usan principalmente "en la expresión de la relación entre proposiciones, y se mostrará después que las mismas relaciones se pueden expresar completamente con símbolos elementales de interpretación análoga, y con forma y ley idéntica a los símbolos cuyo uso y significado se ha explicado. . ." (Boole, p. 38). En verdad ahora encontramos estudios —como los de Montague— donde se muestra la importancia de recoger en las inferencias lógicas elementos proposicionales tales como los adverbios (Gochet, 158); sin embargo, en Boole encontramos, *avant la lettre*, la actitud formalista y reconstruccionista —superar con el formalismo lógico las ambigüedades del lenguaje ordinario— que se dará posteriormente en Frege y Russell.

### 3. Las Leyes del pensamiento

Continuando su investigación sobre estas leyes, Boole buscará una lógica de las operaciones mentales que no le haga comprometerse con una metafísica de la mente; los actos intelectivos le interesan específicamente a nivel operatorio, lo

cual esclarece el objeto de la lógica y excluye el psicologismo. Antes que nada, se propone: (1) "Deducir las leyes de los símbolos de la lógica a partir de una consideración de las operaciones de la mente que están implicadas en el uso estricto del lenguaje como un instrumento de razonamiento" (Boole, p. 42).

Lo primero que surge en este contexto es la noción de universo de discurso; el campo de objetos, el tema último sobre el que versan las expresiones que se usan. La noción de universo de discurso sirve para que el nombre o término descriptivo no se refiera indiscriminadamente a todos los entes a los que es aplicable esa descripción, sino a los que se dan dentro del límite de ese universo de discurso, y la conceptualización procede justamente delimitando o definiendo su alcance —al modo como al sustantivo se añade el adjetivo que lo restringe—. A partir de esa operación intelectual obtenemos las leyes del pensar, y las leyes de los símbolos que se han dado anteriormente son las mismas que las de los procesos mentales que representan o expresan.



Boole encuentra que esta operación de conceptualización constituye una de las mismas leyes del pensamiento, siendo indiferente el orden en que se realiza; y, efectivamente, esto corresponde a la ley (2) que ha establecido antes. Tal cosa nos conduce a pensar que de dos concepciones correspondientes a dos clases de cosas distintas podemos formarnos la concepción de una clase compuesta por esas dos clases, también con independencia del orden que se observe; y esto constituye la ley general (3), ya establecida.

De todo ello, Boole obtiene dos conclusiones: "(a) Que las operaciones de la mente por las cuales, en el ejercicio de su facultad de imaginación o concepción, combina y modifica las ideas simples de las cosas o cualidades, no menos que esas operaciones de la razón que son ejercidas sobre las verdades y las propo-

siciones, están sujetas a leyes generales. (b) Que esas leyes tienen forma matemática y que están de hecho desarrolladas en las leyes esenciales del lenguaje humano; por lo cual, las leyes de los símbolos de la lógica son deducibles de una consideración de la operación de la mente al razonar" (Boole, pp. 45-46).

Pasa después Boole a los problemas relacionados con la ley  $\underline{x}^2 = \underline{x}$ , que distingue al álgebra numérica. Para asegurar tal distinción o autonomía es necesario probar que los símbolos 0 y 1 tienen un lugar y una interpretación en la lógica. Boole advierte que los símbolos de la lógica, a diferencia de los símbolos numerales de la matemática, están universalmente sujetos a la ley expresada por  $\underline{x}^2 = \underline{x}$ . De entre los símbolos numerales sólo hay dos que la satisfacen: 0 y 1, como ya se ha dicho. Pero uno y otro tienen una ley peculiar en el sistema numeral —leyes que veremos en seguida—, y hay que investigar cómo esas leyes se realizan también en el sistema lógico.

De acuerdo con ello, Boole se propone, en segundo lugar: (ii) "Determinar el valor y la significación lógicos de los símbolos 0 y 1" (Boole, p. 47). En primer lugar, tenemos que la ley formal

$$(9) 0 \times \underline{y} = 0, \text{ o también } 0\underline{y} = 0$$

se cumple con la condición de que 0 significa "nada", sea cual fuere el número de  $\underline{y}$ . Por eso 0 significará la clase nula, el universo vacío, o la "Nada", que es el tope mínimo de individuos que puede tener una clase. El tope máximo es el "Universo", que es el mayor número de individuos que puede tener una clase. Esto se cumple en el 1, pues la ley

$$(9') 1 \times \underline{y} = \underline{y}, \text{ o también } 1\underline{y} = \underline{y}$$

se cumple a condición de que el 1 signifique el Universo, sea cual fuere el número de  $\underline{y}$ . Así, pues, en el sistema lógico 0 y 1 significan, respectivamente, *Nada* y *Universo*. La existencia de la clase universo y la existencia de la clase vacía, junto con la existencia de más de un término, son los supuestos existenciales del álgebra lógica booleana (Langer, p. 193; Suppes, p. 187). Por otra parte, (9) y (9') son las leyes de la clase universo y de la clase vacía, que constituyen las leyes de los elementos únicos (Langer, pp. 193-194; Suppes, p. 184).

Cada clase tiene como contrapartida la clase de cosas que no están en ella, pues ambas constituyen el Universo, p. ej. la clase de los hombres tiene como clase contraria la de los no-hombres. Así: (iii) "Si  $\underline{x}$  representa cualquier clase de objetos, entonces  $1 - \underline{x}$  representará la clase de objetos contraria o complement-

taria, i.e. la clase que incluye todos los objetos que no están comprendidos en la clase  $x$ " (Boole, p. 48). Es decir:

$$(10) x + -x = 1 \text{ y también } x - x = 0$$

que constituyen las leyes de la complementación o de la clase complementaria; por lo demás la existencia de una clase complementaria para cualquier clase constituye uno de los supuestos operacionales del álgebra booleana (Langer, p. 193; Suppes, p. 188).

Por otra parte, aunque dice que irá mejor en un capítulo sobre máximas o verdades necesarias, Boole introduce aquí el principio de no contradicción: (iv) "El axioma de los metafísicos que recibe el nombre del principio de contradicción, y que afirma que es imposible que cualquier ente posea una cualidad y que en el mismo tiempo no la posea, es una consecuencia de la ley fundamental del pensamiento cuya expresión es  $x^2 = x$ " (Boole, p. 49). Escribe esto en forma de ecuación, así:

$$x - x^2 = 0$$

de la cual obtiene otra ecuación que constituye una nueva ley:

$$(11) x(1 - x) = 0$$

mediante las leyes de combinación y transposición, i.e. (7) y (8); allí,  $x(1 - x)$  representaría, p. eje. la clase que es al mismo tiempo de hombres y de no-hombres, por lo cual es igual a 0, es decir, no existe. Boole afirma que esto coincide cabal y exactamente con el principio de contradicción puesto por Aristóteles como el axioma fundamental de toda la filosofía. Pero cabe notar una importante diferencia: para Boole ese principio primero de la metafísica es sólo una consecuencia de una ley del pensamiento que tiene forma matemática. Con esto, Boole da a entender que, a diferencia de los sistemas axiomáticos anteriores, no hay de por sí ninguna proposición que sea más "esencial" o "fundamental" que las otras. Esa ley que corresponde al principio de no contradicción recibe también de Boole el nombre de "ley de la dualidad". De hecho, en el álgebra booleana se maneja una doble ley de la dualidad, a saber:

$$(12) -(x + y) = -x \times -y, \text{ y también } -(x \times y) = -x + -y$$

que son análogas a las leyes de Augustus De Morgan, y que, junto con las leyes de la complementación —ya mencionada—, de la contraposición, de la doble negación y de la expansión, constituyen las

leyes de la negación (Langer, p. 194; Suppes, p. 204).

#### 4. Las proposiciones. Sus dos clases principales

Después de haber expuesto los símbolos elementales y sus leyes, pasa Boole a sus combinaciones, i.e. a las proposiciones y las inferencias. Con respecto a lo primero —a saber, las proposiciones—, trata de la disposición de sus partes y de dos clases principales de proposiciones; con respecto a lo segundo —a saber, el método de inferencia—, inicia la construcción de un método general de análisis deductivo. A esto llama la aplicación práctica de los resultados obtenidos.

Es decisiva la observación de Boole relativa a las proposiciones: "Todas las proposiciones lógicas pueden considerarse como pertenecientes a una u otra de dos grandes clases, a las que se pueden dar los respectivos nombres de 'proposiciones primarias' o 'concretas' y 'proposiciones secundarias' o 'abstractas'". (Boole, p. 52). Las de la primera clase expresan relaciones entre cosas, las de la segunda expresan relaciones entre proposiciones. Ejemplo de la primera: "el sol brilla", "la tierra está cálida"; ejemplo de la segunda: "si el sol brilla, la tierra está cálida".

Esta distinción se acerca, aunque no es coextensiva, a la distinción entre categóricas e hipotéticas (cfr. Prior, pp. 171-196). Boole dice que las proposiciones primarias y secundarias no son coextensivas a las categóricas e hipotéticas, porque cree que hay proposiciones que no pueden reducirse a ninguno de esos dos tipos o clases; pero no parece estar en lo correcto cuando aduce los ejemplos respectivos, pues ofrece ejemplos de proposiciones que desde antiguo se llamaban resolubles, las cuales pueden reducirse a hipotéticas mediante una paráfrasis. Tales ejemplos son, una de extremo disyunto (el predicado tiene una disyunción): "los animales son o racionales o irracionales" y otra que dice: "los hombres son, si sabios, templados", la cual —según Boole— no puede resolverse en: "si todos los hombres son sabios, entonces son templados"; sin embargo, no vemos por qué no puedan reducirse o resolverse en una disyuntiva y una condicional, respectivamente.

Boole añade que los miembros conectados en la proposición serán términos (sujeto y predicado), mientras que los de la proposición secundaria serán proposiciones. Sin embargo, ya que una proposición puede ser verdadera o falsa (tiene valor de 1 o de 0) sin término medio, toda proposición primaria origina una proposición secundaria que declara

su verdad o falsedad, p. ej. de "el sol brilla" obtenemos "es verdad que el sol brilla", la cual tiene como partes otras proposiciones —"es verdad" y "el sol brilla"—, según se ha estipulado para las proposiciones secundarias. Pues bien, Boole se esfuerza en deducir el método general de operación tanto para las proposiciones primarias como para las secundarias (Boole, pp. 54-55), y en su desarrollo de tal método consistió el surgimiento de la lógica matemática. Y, así, aunque Frege lo superó con "un algoritmo totalmente nuevo" (Frege, p. 176), tuvo que tomarlo en cuenta y partir de sus trabajos.

#### 5. Conclusión

Este método general del álgebra de la lógica que compuso Boole es el primer intento logrado de lógica matemática. Según Boole, toda ciencia parte de la experiencia, con diferente modalidad: la ciencia positiva, induciendo leyes de la naturaleza y la ciencia formal, estableciendo los principios con los que operará deductivamente. La lógica es un saber formal o matemático, pero sigue perteneciendo a la filosofía porque, aunque ésta no surge —según Boole— de la experiencia sino que procede por especulación, sin embargo, funda las ciencias al establecer la existencia de un orden que los fenómenos obedecen en todos los campos (cfr. Hesse, pp. 61-81).

Así, a partir de la experiencia, Boole demuestra que las leyes de las proposiciones primarias son las mismas para las proposiciones del análisis de las proposiciones primarias para obtener sus leyes de formación y transformación; leyes que simboliza algebraicamente. Examina el álgebra numérica (tal examen es sugerido por la representación algebraica obtenida del lenguaje de proposiciones primarias) y advierte que entre el simbolismo lógico y el álgebra hay analogías que permiten interpretar el simbolismo como un álgebra numérica restringida al 0 y al 1. Enriquece las leyes de transformación de la lógica introduciendo todas aquellas válidas, dentro del álgebra numérica, para el 0 y el 1, tal como la división, lo que da lugar a proposiciones no interpretables en lenguaje primario, que llegarán en el desarrollo final del cálculo, a ser nuevamente interpretables. Finalmente trata tal simbolismo como un cálculo cuyos signos variables están determinados por las relaciones en que pueden incurrir, relaciones simbolizadas por constantes lógicas; cálculo carente de contenido susceptible de ser interpretado con el lenguaje de las proposiciones secundarias. Cumple Boole su cometido al presentar al cálculo como un sistema

formal al que denomina 'matemático' debido a que es la forma y no el número lo propiamente matemático" (Zurcher, p. 73). Es decir, no deja de ser la lógica algo filosófico, sino que aquí su carácter *matemático* viene entendido como *formal*; o, con otras palabras, la lógica sigue siendo por antonomasia el instrumento filosófico (*organon*), pero ahora con una modalidad matemática: el formalismo. Y es esta formalización, justamente, la que permitirá a la lógica encontrar el cúmulo de aplicaciones que recibe en la actualidad.

#### Bibliografía citada

M. Beuchot, a, *Elementos de semiótica*, México: UNAM, 1979.

M. Beuchot, b, "Sobre algunas ideas lógicas de Johann Bernoulli", en *Diánoia*, (Instituto de Investigaciones Filosóficas de la UNAM), 28 (1982).

M. Beuchot, c, "El cálculo lógico de Gottfried Ploucquet", en *Estudios Filosóficos*, (Valladolid, España), 32 (1983).

I. M. Bochenski, *Historia de la lógica formal*, Madrid: Gredos, 1966.

G. Boole, *An Investigation of the Laws of Thought, on which are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities*, New York: Dover, 1958.

A. Dumitriu, *History of Logic*, Tumbidge Wells, Kent, England: Abacus Press, 1977, vol. 4.

G. Frege, "Booles rechnende Logik und die Begriffsschrift", en Idem, *Schriften zur Logik-Aus dem Nachlass*, Berlin: Akademik Verlag, 1973.

P. Gochet, "L'originalité de la sémantique de Montague", en *Les études philosophiques*, 1982.

M. B. Hesse, "Boole's Philosophy of Logic", en *Annals of Science* (London), 8 (1952).

W. Kneale, a, "Boole and the Revival of Logic", en *Mind*, 57 (1948).

W. y M. Kneale, b, *El desarrollo de la lógica*, Madrid: Tecnos, 1972.

S. K. Langer, *Introducción a la lógica simbólica*, México: Siglo XXI, 1975 (4a. ed.).

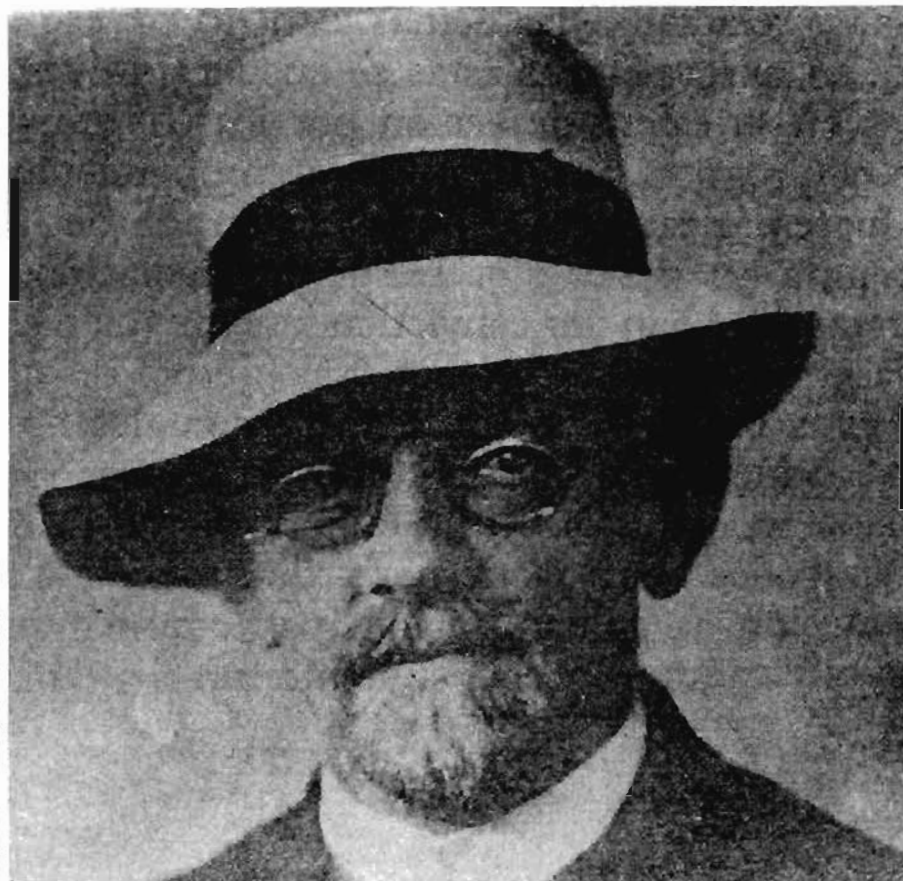
A. N. Prior, "Categorical and Hypotheticals in George Boole and his Successors", *The Australasian Journal of Philosophy*, 27 (1949).

P. Suppes, *Introduction to Logic*, New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1957.

J. Zurcher, "George Boole y las leyes del pensamiento", en *Revista de Filosofía de la Universidad de Costa Rica*, 19 (1981).

# Absolutismo y Relativismo en Lógica

JEAN VAN HEIJENOORT



David Hilbert (1862-1943).

El absolutismo, en el sentido en que aquí se entenderá la palabra, es la doctrina según la cual hay sólo una lógica, esta lógica es la que se ha llegado a conocer como lógica clásica y, además, que dicha lógica es omnicomprensiva y universal. El relativismo es la doctrina opuesta y niega aquello que el absolutismo sostiene. A menudo, absolutismo y relativismo aparecen como tendencias a seguir en las investigaciones filosóficas más bien que como doctrinas claramente definidas.

El absolutismo ha permeado en distintos grados y épocas la filosofía de la lógica. En los tiempos modernos ha sido propuesto de diferentes maneras

por Kant, Frege y Russell, entre otros, y generalmente, sin una suficiente argumentación que los sostenga. La explicación de esto radica quizás en el hecho de que un argumento tal tendría que ser circular. De acuerdo con Kant, la lógica, y lo que él tenía en mente era la lógica clásica, era la 'forma del pensamiento'. Y supuestamente, ningún pensamiento puede cuestionar su propia forma sin él mismo incurrir en un círculo. El cuestionamiento implicaría algún tipo de argumentación y la 'forma' que adquiriera esta argumentación sería precisamente lo que se está examinando.

Frege es quizás el lógico que más firme en: ha definido el absolutismo en lógica. No como una tesis explícitamente enunciada y definida por una

elaborada argumentación, sino como un tema siempre recurrente que penetra sus escritos y explica muchos de sus rasgos. Contra Boole y Schroder, Frege sostiene el punto de vista de que la lógica no es un *calculus cationator*, sino una *lingua characterica* adecuada para el todo del conocimiento humano. Para el alcance de los cuantificadores que ligan a las variables individuales, Frege considera a todos los objetos. Su universo de discurso no es un dominio que pueda ser cambiado a voluntad; es, al mismo tiempo, fijo y universal. Cuando Frege quiere tratar con una clase especial de objetos, los números naturales por ejemplo, usa un procedimiento que de hecho es el método de relativización de los cuantificadores, los cuales abarcan todavía a todos los objetos.<sup>1</sup>

La adhesión de Frege al absolutismo se manifiesta con mayor fuerza en sus polémicas con Hilbert sobre la naturaleza de la geometría.<sup>2</sup> Frege considera los axiomas y teoremas de la geometría Euclidea como objetiva y absolutamente verdaderos; no puede, por tanto, comprender qué es lo que Hilbert trataba de lograr en los fundamentos de la geometría.

Con el propósito de aclarar la oposición entre absolutismo y relativismo, empezaremos por revisar, de manera simple y natural, las afirmaciones que hacemos cuando introducimos a los alumnos al estudio de la lógica. En tal revisión, se podrían suscribir tantas preguntas que no las podríamos tratar todas aquí con amplitud. Escogeremos algunas de ellas que nos parecen especialmente importantes para nuestra tarea actual.

En una presentación de la lógica, generalmente empezamos con el cálculo de enunciados e introducimos símbolos enunciativos:  $p, q, r$ , etc. ¿qué son estos símbolos? Supuestamente están en lugar de enunciados ¿Y qué son los enunciados? Cuando estamos usando un lenguaje específico, los enunciados están determinados por las reglas gramaticales de ese lenguaje. He aquí un punto sobre el cual el absolutismo y el relativismo discrepan. Para el absolutista, la lógica tiene que elevarse sobre los lenguajes particulares, y los enunciados se determinan entonces por su carácter lógico, y no como meras entidades gramaticales. Esto generalmente sucede cuando se les considera como invariantes que aparecen al pasar de un lenguaje a otro. Esto impli-

caría que cuando un texto es traducido, un enunciado en un lenguaje correspondería a otro enunciado en otro. Es esta una suposición aún más débil que el suponer que, para cualesquiera dos lenguajes, las palabras en uno corresponden a las palabras en el otro en una relación uno-a-uno. Esta es, sin embargo, una suposición que el relativista pondría en tela de juicio, en tanto que el absolutista difícilmente vería un problema en ella. El absolutista se inclina a dar por sentada, tras los lenguajes particulares, una estructura lógica de la realidad; hay un lenguaje perfecto que refleja esa estructura, y este lenguaje perfecto es aquello de lo que se ocupa el lógico.

Consideremos ahora enunciados atómicos. Un enunciado atómico es de la forma  $Pa$ , o más generalmente,  $Qa_0 a_1 \dots a_{k-1}$ . Históricamente, el pasar de los símbolos predicativos de un argumento a los símbolos predicativos de un número arbitrario de argumentos, representó un paso importante. Desde nuestro actual punto de vista tiene una importancia secundaria, puesto que lo que por el momento nos interesa es qué hay detrás de los  $a_j$  y detrás de  $P$  y  $Q$ .

Los  $a_j$  son símbolos individuales y moleculares denotan individuos. Estos individuos son, en la semántica generalmente asociada con un sistema lógico, elementos de un dominio, el universo de la interpretación. ¿Qué puede decirse acerca de estos individuos? Pueden ser contados; podemos distinguir dominios de distintas cardinalidades. De ahí que cada elemento de un dominio tiene su identidad y puede ser distinguido de otro elemento del mismo dominio. ¿Cómo es que la identidad y no-identidad pueden reconocerse y aceptarse? nada ha sido dicho a este respecto. De hecho, acerca de los individuos en un universo, no podemos decir nada aparte de cuanto hay, puesto que las cuestiones lógicas permanecen invariantes bajo una transformación que relaciona a un universo con otro de una manera biunívoca. Los individuos son meros marbetes.

Asociado con el conjunto que constituye el universo de la interpretación está un número de predicados, uno por cada símbolo predicativo del sistema considerado (con el número correspondiente de argumentos). Pero estos predicados hacen su aparición una vez que el dominio está ahí ya, pero no contribuyen en la tarea de identificar o distinguir elementos del dominio. No contamos con predicados internos por decirlo así, sobre los cuales esta tarea pudiera recaer.

La ontología así introducida es, por supuesto, una ontología disecada, muy distante del mundo concreto de personas, objetos físicos, eventos y demás, donde, para cada tipo de objeto tenemos criterios bien definidos para establecer la identidad o no-identidad de dos individuos. En los dominios usados para la interpretación de los sistemas lógicos, estos criterios han sido suprimidos, de manera que nos quedamos con una colección abstracta de elementos contables y distinguibles, aunque nada se diga acerca de cómo la identidad o no-identidad de estos elementos queda establecida.

Si permanecemos en el terreno de la lógica, una semántica semejante favorece ciertamente al relativismo, puesto que consideramos sucesivamente dominios distintos para nuestras interpretaciones. El absolutismo reaparecería si tuviéramos una intuición extra-lógica que sujetara la interpretación de ciertos símbolos (predicativos o constantes individuales) imponiendo un dominio sobre los demás. Pero volveremos a este punto cuando nos ocupemos de los cuantificadores.

Continuamos ahora con nuestra revisión. Una vez que tenemos los enunciados atómicos, formamos los enunciados moleculares con la ayuda de los conectivos. Estos conectivos se definen por tablas de verdad o bien se caracterizan por axiomas y reglas. En algunos sistemas de lógica, la equivalencia entre estos dos métodos se establece por las pruebas de corrección y completud. Al introducir los conectivos nos encontramos en una situación en la que pueden ofrecerse definiciones divergentes. Fijémonos por un momento en la disputa engendrada por consideraciones divergentes acerca de la negación, esto es, al desacuerdo sobre la ley del tercio excluido,  $p \vee \neg p$ . El argumento generalmente presentado en favor de esta ley, es como sigue: un enunciado es verdadero si satisface un cierto criterio, la condición de verdad del enunciado. Si el enunciado no satisface el criterio, falla en ser verdadero y esta falla es todo lo que se quiere decir cuando afirmamos que no es verdadero. De ahí que todo enunciado sea verdadero o no lo sea. Podemos, sin embargo, considerar esta cuestión de manera distinta. Supóngase que el enunciado es un enunciado atómico,  $Pa$ . Para establecer su verdad tenemos que afirmar que el predicado  $P$  vale del objeto  $a$ . Pero no consideramos esta afirmación como el establecimiento de su verdad, en la que atestigüamos que el predicado vale o no, sino como una operación que se da o no. Si esta ope-

1 En este punto, ver van Heijenoort, 1967.

2 Los textos han sido reunidos convenientemente en Frege, 1971.

ración se da, podemos afirmar  $Pa$ . Si la operación no se da estamos en el mismo punto inicial, anterior a la operación, pues de hecho nada se ha establecido; por supuesto no se afirma  $Pa$ , pero tampoco  $\sim Pa$ . Para establecer  $\sim Pa$  tenemos que realizar una nueva operación por ejemplo, intentamos mostrar que  $Pa$  implica un enunciado que se sabe que es falso. La verdad se establece por una operación, y puesto que la falla de una operación no es una operación, necesitamos de dos operaciones una para  $Pa$  y otra para  $\sim Pa$ . Nada nos asegura que alguna de las dos operaciones será exitosa, por tanto, la ley del tercio excluido falla.

Un absolutista que quisiera defender a toda costa esta ley, replicaría: lo que usted acaba de decir es correcto, pero no ha refutado la ley del tercio excluido. Usted ha introducido una nueva conectiva la cual, realmente, debería ser denotada por un nuevo signo, digamos. —Y  $P \vee \sim P$  debería ser leído:  $P$  se ha establecido o  $P$  se ha refutado. Esto por supuesto, no impugna la ley del tercio excluido. Lo que usted está haciendo en el fondo, es introducir una nueva concepción de la verdad y, usted y yo estamos hablando simplemente de dos cosas distintas.

En efecto, hay aquí dos concepciones de la verdad. Desde un punto de vista, la verdad de un enunciado se establece por contemplación. Por el otro, se establece por una operación. Las maneras alternativas en que pueden ser definidas los conectivos, pueden verse como definiciones alternativas de la verdad, puesto que las definiciones introducidas para los conectivos, llevan a una definición inductiva del predicado ' $\dots$  es verdadero' para los enunciados. Al absolutista le gustaría decir —usted está hablando de otra cosa, luego esto no disturba de ninguna manera mis leyes de la lógica clásica. Pero el observar que nos conducimos ahora hacia otra noción de la verdad no elimina el problema, porque tal problema es precisamente cuál de las dos (o más) nociones alternativas de la verdad es la que debe adoptarse. Una vez abierta una brecha en la defensa del absolutista, no puede eludir la confrontación.

Su defensa era, por supuesto, la seguridad de que hay una intuición universal, innata en todo ser pensante, que lo hace reconocer la verdad de las leyes de la lógica clásica. De acuerdo con el absolutista, el mero cuestionamiento de estas leyes nos conduciría a confusión y parloteos. En este punto ha sido refutado por la existencia de sistemas lógicos alternativos cuya con-

sistencia no está más en duda que la de la lógica clásica.

Pero ahora, ¿Cómo proceder en la confrontación de lógicas alternativas? Una caracterización alternativa de los conectivos da lugar a una concepción alternativa de la verdad. Si admitimos, por el momento, que hemos establecido una noción de la verdad con la cual pudiésemos comparar, una después de la otra, las concepciones engendradas por sistemas alternativos de conectivos, entonces la elección entre los sistemas lógicos es guiada por consideraciones superpuestas, por las consecuencias que la adopción de una lógica u otra tendrían en la organización general de nuestro conocimiento. Ahora, si contamos con una firme y generalmente aceptada concepción de la verdad antes de considerar varios sistemas lógicos entonces podríamos confrontar cada sistema en turno con esta concepción de la verdad, ver cuál sistema se adecua mejor a esta concepción, y aparentemente, llegar a una decisión sobre cuál de los sistemas lógicos alternativos es el correcto.

Pero, por supuesto, estamos contemplando una asunción enorme y estremecedora, la asunción de que tenemos una concepción de la verdad, anterior a cualquier lógica, que es estable y suficientemente precisa para imponer un sistema lógico entre muchos otros. El status de la ontología y la epistemología como ciencias no es tal como para permitir una confrontación tan precisa.

Con la aparición de las geometrías no-euclidianas, de la teoría relativista, de la mecánica cuántica, la intuición, al menos una cierta forma de intuición ha sufrido muchas derrotas en los últimos ciento cincuenta años. Aquel sentimiento de certeza que por siglos los hombres tenían acerca de importantes materias se probó como ilusorio. Uno busca en vano una razón por la cual la lógica debería escapar al cuestionamiento que tuvo lugar en otros campos básicos del conocimiento. Y si la lógica no descansa sobre una incuestionable e inamovible intuición, entonces su validez es la validez que adquiere en la organización general de nuestro conocimiento.

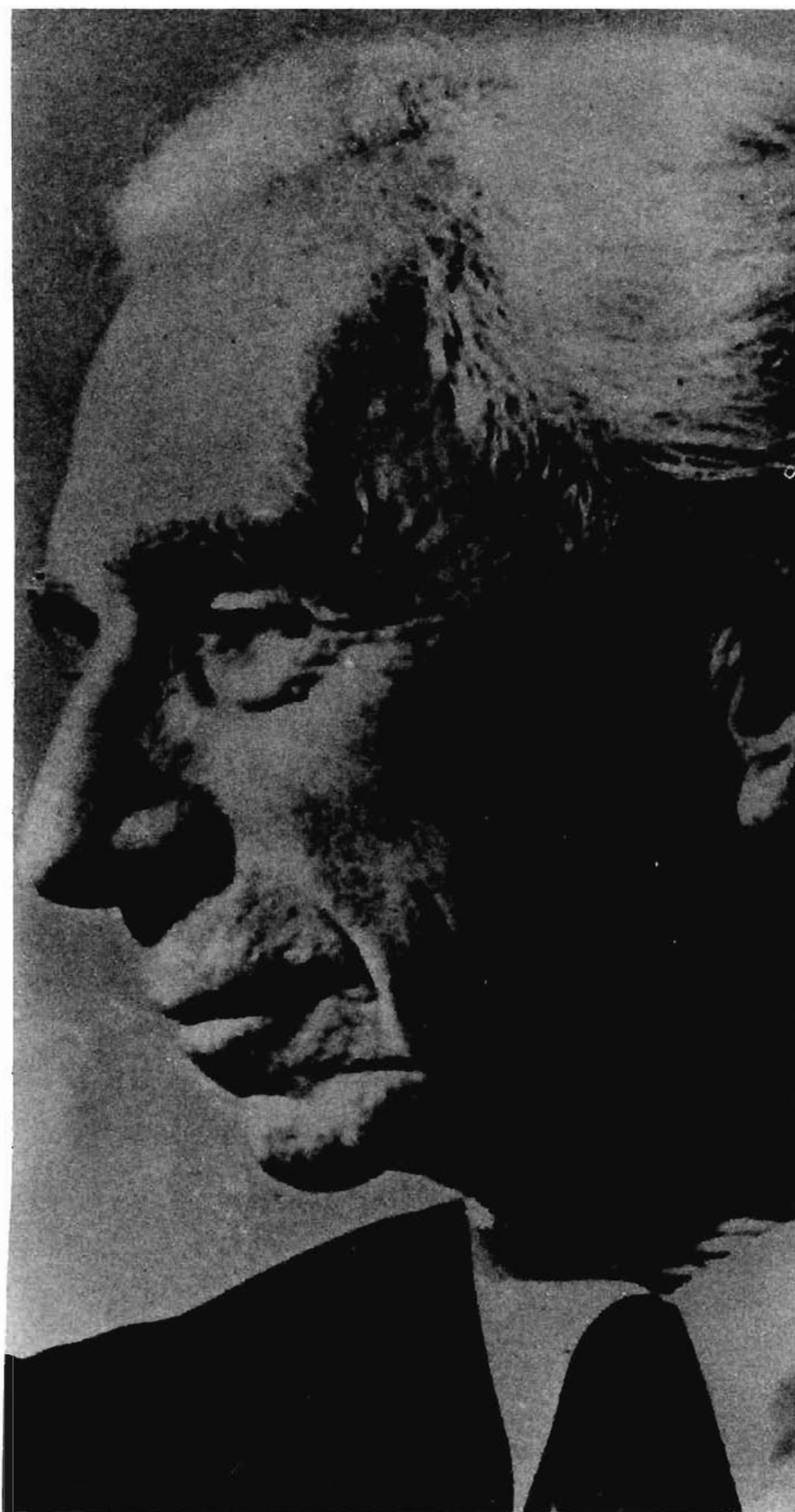
Prosiguiendo con nuestra revisión, nos vamos más allá de los conectivos y los enunciados para considerar la introducción de los cuantificadores. Aquí surge inmediatamente una pregunta ¿Sobre qué dominio supuestamente se extiende el alcance de los cuantificadores? En este punto la oposición entre absolutismo y relativismo en lógica se nos manifiesta con toda su fuerza. Para

un absolutista, sólo hay justo un dominio, un universo fijo y omnicomprensivo (de un nivel o jerarquizado en varios niveles) que comprende todo aquello sobre lo cual puede haber algún discurso. Tal era la concepción de Frege, tal era también la concepción de Russell aunque para él este universo estaba estratificado de acuerdo con la teoría de los tipos. Bajo el nombre de *lógica magna*, tal sistema universal ha sido un sueño constante entre los lógicos. El logicismo es una forma moderna de *lógica magna*. Las bien conocidas dificultades con el logicismo han llevado a los lógicos contemporáneos, en su mayor parte, fuera de este sueño. En lugar de una *lógica magna* la lógica de nuestros días es una *lógica utens*; sistemas son introducidos aquí y allá de acuerdo con las necesidades. Diferentes dominios se consideran sucesivamente para las interpretaciones. En este sentido, el relativismo posee en el presente la primacía.

Una importante razón para ello es indudablemente el hecho de que carecemos de un criterio universalmente aceptado de la existencia. ¿Qué es lo que vamos a contar como individuos? Es suficiente el mencionar que no hay acuerdo en si entidades abstractas como los números naturales, sin hablar de la belleza, el coraje, etc., deben ser contados como objetos. No hay, anterior a la lógica, una ciencia de la ontología que pudiera fijar la estructura ontológica del mundo y nos presentara con el fijo y omnicomprensivo dominio que el absolutista quisiera tener. Por el contrario, considerando varios sistemas lógicos, podemos llegar a considerar las implicaciones que poseen para la ontología.

Sea  $S$  un conjunto de fórmulas de primer grado. Un *modelo* para  $S$  es un par ordenado  $\langle U, \alpha \rangle$  donde  $U$ , el *universo* del modelo, es un conjunto no vacío y  $\alpha$  es una función que, de una manera bien conocida asigna a los símbolos de los elementos de  $S$  subconjuntos de  $S$  o elementos de  $S$  (para cada variable libre o constante individual se asigna un elemento de  $U$ ). Una fórmula  $F$  en  $S$  pasa a ser  $t$  o  $f$  en el modelo, de acuerdo con especificaciones bien conocidas.

Sea  $U'$  un conjunto que tiene la misma cardinalidad que  $U$ . Entonces existe una función  $\alpha'$ , tal que cualquier fórmula  $F$  en  $S$  es  $t$  o  $f$  en el modelo  $\langle U', \alpha' \rangle$  de acuerdo con si es  $t$  o  $f$  en el modelo  $\langle U, \alpha \rangle$ . Por tanto, en un lenguaje de primer orden no podemos distinguir entre universos que tienen la misma cardinalidad. La 'naturalidad' de los elementos por sí mismos es irrele-



Bertrand Russell (1872-1970).

vante. La distinción entre universos sólo podría hacerse considerando alguna interpretación intuitiva de algunos símbolos (símbolos predicativos o constantes individuales) que fijará un universo a costa de los otros. Si cada fórmula del conjunto  $S$  es  $t$  en un modelo  $M_a$ , de cardinalidad  $a$  ( $a$  siendo finito o no, numerable o no la única restricción sobre  $a$  es que  $a \neq 0$ ), entonces, para cualquier  $b$  tal que  $a < b$ , hay un modelo  $M_b$ , de cardinal  $b$ , tal que toda fórmula de  $S$  es  $t$  en  $M_b$ .

Por otra parte, por el teorema de Lowenheim-Skolem, podemos desatendernos de modelos no-numerables. Así pues, finalmente considerando estos varios resultados, podemos limitarnos al universo de los números naturales,  $w$ . Esto parece traer de vuelta al absolutismo. Pero una conclusión tal sería decepcionante, por las siguientes razones:

1. A pesar de que dos modelos pueden tener el mismo universo,  $w$ , pueden sin embargo diferir por el modo como los predicados son tomados en tal universo;

2. Cuando pasamos de un modelo  $M_a$  a un modelo  $M_b$ , con  $a \leq b$ , la verdad se preserva a costa de una posible reinterpretación de los símbolos predicativos; por ejemplo, hay un modelo  $M_w$ , cuyo universo es  $w$ , en donde la fórmula  $x (x = a)$  es  $t$ , pero en  $M_w$ , no es el predicado de identidad lo que se asigna a los dos argumentos del símbolo predicativo '='.

3. Si nosotros asumimos, como deberíamos, algún contacto con la experiencia, entonces los modelos pueden ser distinguidos por una interpretación intuitiva dada a algunos objetos lingüísticos.

Por esta razón, la semántica de la teoría conjuntista, como generalmente es usada en la actualidad, no parece imponernos algún absolutismo lógico. Pero podemos ir más lejos de nuestro relativismo y preguntar si esta semántica es la única posible. Las dudas en este campo han surgido en varias direcciones. De acuerdo con los intuicionistas, las matemáticas se comprenden mejor en términos de construcción que en términos de conjuntos. La ocurrencia de términos de masa en el lenguaje ordinario sugiere, para la interpretación de estos términos, una ontología de sustancias continuas, en lugar de una de objetos. Una ontología de eventos podría también ser explorada.<sup>7</sup> Hay varias ontologías guardadas en el lenguaje ordinario "compitiendo entre sí".

La oposición entre relativismo y

3 En este punto ver van Heljenhoort, 1973.

absolutismo en lógica se manifiesta en sí misma en la oposición entre lógica de primer orden y lógica de orden superior. Como un dominio de primer orden es realmente insuficiente para una codificación general de nuestro conocimiento, existen dos posibilidades: tanto recurrir a un dominio estratificado, o bien, pasar de un dominio a otro. El absolutista escoge la primera alternativa. La estratificación puede diferir, la de Russell no es la de Frege, pero ambos prefieren el único dominio estratificado, en lugar de una sucesión de dominios de primer orden.

Frege y Russell no pusieron mucha atención a la lógica de primer orden como tal. Era insuficiente para su propósito, y ellos iban simplemente detrás de otra cosa. Ellos no mostraron interés por la diferencia en complejidad entre la lógica de primer orden y las lógicas de un orden superior, diferencia que se manifiesta en un número de cuestiones técnicas (problemas de decisión y reducción, compacticidad, etc., Russell por ejemplo, nunca dijo una palabra, hasta donde yo sé, sobre el teorema de Lowenheim Skolem). He aquí lo que escribí en 1976: "Embarcados en su grandiosa reconstrucción lógica, Frege y Russell no dudaron en ir más allá de la lógica de primer orden. Y tenían que hacerlo, puesto que la noción del ancestro es necesaria para su definición de número natural. Cuando Frege pasa de la lógica de primer orden a una lógica de orden superior (en *Begriffsschrift*, 11), difícilmente hay una réplica. No comprometidos con requerimientos de altos vuelos, Peirce, Schroder y Lowenheim pudieron más precisamente sentir el suelo bajo sus pies, y entonces, por supuesto, la diferencia en complejidad entre la lógica de primer orden y la lógica de orden superior resulta inmediatamente aparente". (Van-Heijenoort 1976, p. 184). Con su instinto matemático, Hilbert, también sintió que esta diferencia en complejidad era de primera importancia. La oposición entre Frege y Hilbert en esta cuestión es bastante clara en su controversia sobre los fundamentos de la geometría. Para usar los términos Escolásticos que hemos introducido arriba, una lógica de primer orden es necesariamente una *lógica utens*, mientras que una *lógica magna* es necesariamente una lógica de orden superior (pero, en ambos casos, no contrariamente).

Cuando Michael Dummett escribe (1973, p. 432) que para Frege la lógica está "relacionada con una característica de los enunciados, la verdad, más que con las transiciones de enunciados

a enunciados", está señalando, nuevamente, la distinción entre *lógica magna* y *lógica utens*. En la semántica de Frege, o en la de Russell, puesto que hay justo un dominio, las nociones de validez y satisfactibilidad se desvanecen, y la noción de verdad se hace presente.

Tan lejos como concierne a la semántica, podemos distinguir las cuatro posiciones siguientes:

1. Hay una estructura, fija y universal, y esta estructura impone una lógica clásica (Frege, Russell).

2. Hay arbitrariamente muchas estructuras; en cada campo de la investigación, nosotros decidimos que es lo que cuenta como un individuo, nosotros seleccionamos nuestro dominio, y los cuantificadores van a tener su rango sobre ese dominio (Hilbert, Tarski, etc.); ocasionalmente, un sistema puede ser traducido a otro, pero no hay relaciones entre estructuras (a diferencia del (4) más abajo).

3. No hay estructuras, esto es, no usamos una semántica teórico-conjuntista (Brower, por ejemplo).

4. Hay arbitrariamente muchos conjuntos parcialmente ordenados de estructuras (modelos de Kripke); dentro de cada estructura la lógica es clásica, pero las sucesiones ordenadas de estructuras pueden convenir a lógicas no clásicas (por ejemplo, la completud de la lógica intuicionista a través de los modelos de Kripke).

En cualquier semántica para un lenguaje, la verdad de las expresiones es explicada en términos de una relación entre símbolos del lenguaje y 'otra cosa'. En la semántica de la teoría conjuntista asociada con la lógica clásica, la 'otra cosa' consiste en elementos y subconjuntos del universo del modelo. En el artículo de Tarski sobre el concepto de la verdad en lenguajes formalizados (1936), donde la semántica de la lógica clásica está codificada, hay una nota a pie de página (1956, p. 155) refiriéndose a Aristóteles, y esta nota es algunas veces interpretada como implicando que la semántica de la teoría conjuntista está basada en el realismo. Esto no parece ser correcto (cualesquiera hayan sido las intenciones de Tarski). La 'otra cosa' a lo que la definición de la verdad nos manda es, como hemos tenido ocasión de señalar arriba, un dominio abstracto. En lugar de haber sido dictado a nosotros por la experiencia, este dominio podría verse más como una construcción que nosotros imponemos a la experiencia. Esto es claramente aparente cuando discutimos lo que debemos contar como individuos.

El fracaso del absolutismo en lógica es el fracaso del realismo, esto es, de una concepción por la cual la experiencia es transformada en una realidad independiente de cualquier proceso de conocimiento. Esta no es ciertamente una concepción que el desarrollo histórico de la ciencia parezca favorecer. La organización del conocimiento no procede por la suma de piezas, sino por una incesante reorganización, en donde los conceptos se reemplazan por otros. Este clima de ciencia es más cercano al relativismo en lógica que al absolutismo. Los sistemas son cambiados de acuerdo con las necesidades. La superación del logicismo, aunque provocada por dificultades específicas en el tratamiento de los fundamentos de las matemáticas, puede ser vista como una manifestación de esta tendencia en la lógica moderna. El conocimiento humano no ha alcanzado una etapa de terminación y estabilidad tal que nos permita convertirlo en una *lógica magna*. Nuestra revisión de los puntos en los que pueden ser tomadas decisiones alternativas, nos permite el hacer más precisos los temas de discusión entre el realismo y el anti-realismo.

## Referencias

Dummett, Michael 1973 Frege: *Philosophy of Language*, Duckworth, London.

Frege, Gottlob 1971 *On the foundations of geometry and formal theories of arithmetic*, traducido y con una introducción de Elke-Henner W. Kluge, Yale University Press, New-Haven and London.

Tarski, Alfred 1936 Der Wahrheitsbegriff in den formalisierten Sprachen, *Studia Philosophica* 1, 261-405; traducción inglesa en Tarski 1956, 152-278.

1956 *Logic, semantics metamathematics*, artículos de 1923 a 1938, traducido por J. H. Woodger, Clarendon Press, Oxford.

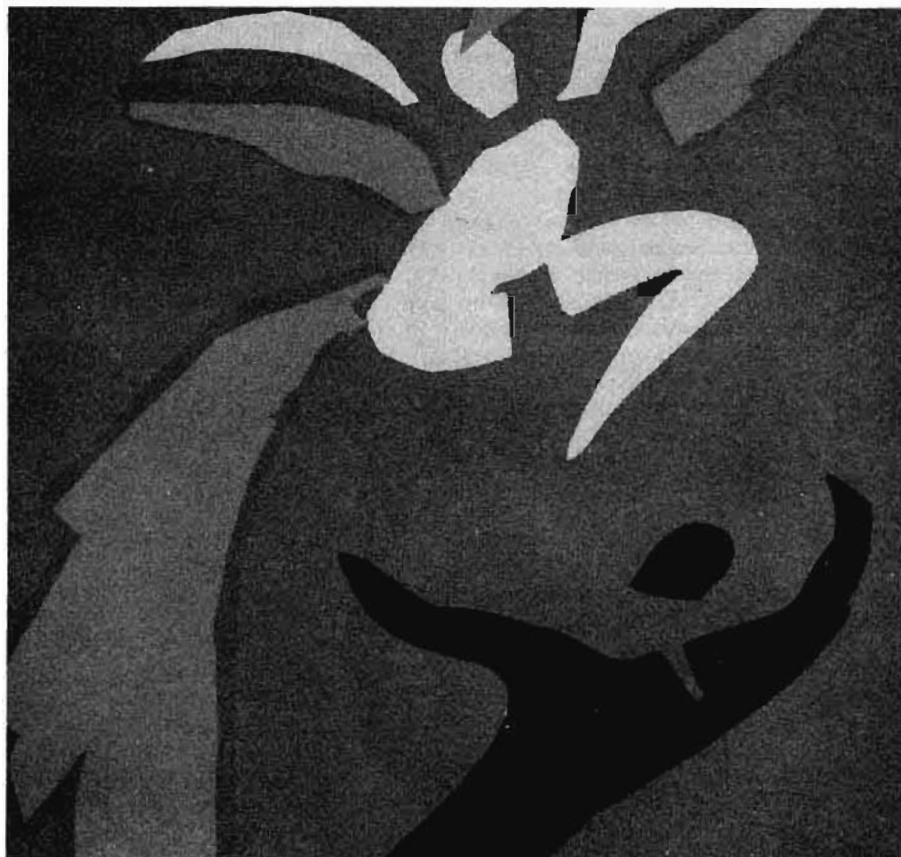
Van Heijenoort, Jean. 1967 *Logic as calculus and logic as language*, *Boston studies in the philosophy of science* 3, 440-446.

1973 Subject and predicate in Western logic, artículo leído en la Conferencia de Filósofos Este-Oeste, Hawaii, junio 1973; impreso en *Philosophy East and West* 24 (1974), 253-268.

1976 Set-theoretic semantics, artículo leído en el Coloquio de Lógica de Oxford, julio 1976, impreso en *Logic Colloquium* 76, editado por R.O. Gandy y J.M.E. Hyland, North Holland, Amsterdam, 1977, pp. 183-190.

# Una sugerencia

JUAN JOSE RIVAUD



En nuestro medio con mucha frecuencia sucede con que los egresados a nivel licenciatura o a nivel de maestría que se incorporan a las escuelas de ciencias, se encuentran que no teniendo todavía una preparación completa ni la experiencia necesaria para poder realizar investigación, se limitan prácticamente a preparar e impartir sus clases, esta situación indudablemente está alentada por la poca estima que se tiene ante cualquier otro tipo de actividades, como son la asesoría a personal fuera de la escuela (aunque éste se encuentre dentro de la misma universidad), la preparación de material didáctico y en general cualquier tipo de servicio, trayendo consigo una sobrevaloración de la investigación por la investigación misma, y no la investigación como la consecuencia de que la docencia y la prestación de servicios se están realizando de manera óptima. No queremos dejar la impresión de

que la investigación no es algo de gran importancia que debe de realizarse en las escuelas de ciencias, pero queremos insistir también que hay muchas actividades que deben llevarse a cabo allí.

El propósito de ésta nota es proponer una actividad concreta que desde nuestro punto de vista no sólo es conveniente, sino necesario realizar, y que puede llevarse a cabo a excelente nivel por algún grupo de trabajo en una escuela de ciencias. Los que estudiamos en los 60's en las escuelas de ciencias recordamos muy bien el curso que en aquel momento se llamaba "Complementos de Álgebra" o simplemente "Álgebra", y que era obligatorio en primer año; en este curso tradicionalmente, a partir de los números naturales, se construían los enteros y los racionales y se daba una idea de los números reales, pero el núcleo del programa estaba dedicado a la solución de ecuaciones algebraicas, así como al estudio de sistemas lineales, esta parte

no sólo le daba al estudiante los antecedentes necesarios para sus estudios en otras materias, sino motivaba temas que se verían posteriormente en análisis. También hay que decir que la asimilación de éste material no era fácil, pues la solución de ejercicios y de problemas requerían de la realización de operaciones algebraicas interminables. Quizás es ésta la razón por la que poco a poco el material de éstos cursos se transformó en la construcción de números naturales según Peano o Von Neumann, la construcción de los enteros y de los racionales, terminando con la construcción de los reales usando cortaduras de Dedekind, temas que sin restarles importancia se pueden ver en mucho menos tiempo, cuando el alumno tiene la madurez y motivación necesaria para ello, es decir, un par de años más adelante en la licenciatura.

Consideramos que es conveniente volver a hacer énfasis en los temas del programa anterior, y que además hoy en día contamos con una gran ayuda para quitarle la aridez a la solución de los problemas y ejercicios antes mencionados, esta ayuda como ya el lector lo habrá sospechado, la constituyen las microcomputadoras y las minicomputadoras que actualmente proliferan desde los puestos de fayuca hasta las escuelas de ciencias. Pero para utilizar esta ayuda, es necesario reescribir los textos clásicos, que en el momento de su elaboración no contaban con ello. Creemos que la reescritura, introduciendo el uso de éstas máquinas y un mínimo de análisis numérico\* de textos como "Theory of Equations" de J.V. Uspensky o "New first course in the theory of equations", de L.E. Dixon, sería no sólo un trabajo interesante y que le dé madurez al grupo que lo realice, sino que prestaría un excelente servicio a la comunidad matemática así como a los estudiantes y profesores de matemáticas de las diversas ingenierías.

Por supuesto, éste no es el único trabajo posible en ésta dirección, hay muchos otros que también son útiles y necesarios, pero como dice el dicho: "para muestra basta un botón".

\* También sería conveniente ver detalladamente Graficación de Polinomios.

# El Mundo Físico del Niño

JEAN PIAGET

(Physics Today, Junio 1972, p. 23; traducido por Juana González Hernández\* y Jesús Reyes\*).

Los conceptos físicos que los niños desarrollan a más temprana edad, tales como "velocidad" y "acción", han demostrado ser los mismos conceptos que mejor han resistido las "revoluciones" en la ciencia.



La visión de la física que tiene el niño no es tan infantil como uno podría pensar. Por el contrario, presenta una serie de problemas que podrían interesar al historiador de la ciencia,<sup>1</sup> e inclusive al físico quien, comparando el estado presente de la física con etapas anteriores de desarrollo, se pregunta por qué ciertas ideas han podido resistir mejor que otras los trastornos que han ocurrido en la física desde el principio de siglo. En nuestros estudios de los niños, los he-

mos observado jugando con juguetes simples, los hemos interrogado acerca de sus percepciones y les hemos puesto problemas para que los resuelvan. De estos estudios hemos aprendido algo acerca de la manera en que la mente de un niño desarrolla conceptos matemáticos y físicos —tales como topología, velocidad, tiempo y causalidad— así como algo acerca de la naturaleza de las ideas en sí mismas.<sup>2</sup>

## ¿Ordenamiento histórico o lógico?

Notamos primero que, naturalmente, las explicaciones inventadas espontáneamente por los niños a menudo son similares a conceptos conocidos y abandonados hace tiempo. La "ANTIPERISTASIS", con la cual Aristóteles explicaba el movimiento de los proyectiles, es un ejemplo llamativo: Los proyectiles avanzan en vez de caer, porque el aire que desplazan los empuja por atrás. Un niño de seis u ocho años explica a menudo el movimiento de las nubes en esa forma, es decir, en términos del viento que las nubes producen al avanzar, o explica la trayectoria de una pelota en términos del aire desplazado al lanzar la pelota, el cual produce una corriente. En forma similar, encontramos que los niños inventan ideas reminiscentes de la teoría del "ímpetu" y otras teorías anteriores al tiempo de Galileo.

Pero lo que es más interesante, frecuentemente, la secuencia de estas ideas físicas o fisicomatemáticas no corresponde a su orden cronológico, es decir su orden histórico (desde los griegos hasta el presente), sino que, por el contrario, corresponde al orden lógico que relaciona lo fundamental con lo derivado. Como un ejemplo veremos ideas acerca del espacio y la geometría, que conciernen tanto a los físicos como a los matemáticos. Conocemos el orden histórico de estas ideas: Las primeras en ser desarrolladas fueron las relaciones lineales de la Geometría Euclídeana (con mu-

chas primeras versiones en Egipto, entre otras civilizaciones); enseguida, comenzando con el Renacimiento y Pascal, las ideas de la geometría sólida; finalmente, y sólo tan recientemente como en el siglo XIX, hemos descubierto el papel fundamental de la topología.

Cuando vemos el orden teórico o lógico de estas ideas encontramos una progresión muy diferente: primero vienen las ideas e intuiciones de la topología (tales como "el grupo homeomórfico" y los conceptos de "vecindad" y "cerradura"); de estas ideas se llega a la geometría sólida por una parte y a conceptos generales de medición (con la geometría Euclídeana como un caso especial) por la otra.

Si estudiamos la forma en que los niños desarrollan sus ideas acerca del espacio, notamos que los niños menores de 4 años, en promedio, no distinguen entre cuadrados, círculos, triángulos, etc. En sus dibujos, ellos simplemente representan todas estas figuras con curvas cerradas, aunque distinguen éstas de las figuras abiertas, tales como cruces o fragmentos de anillos. Si damos al niño muestras para copiar, tales como un círculo grande y uno pequeño en tres combinaciones —el pequeño adentro, afuera e intersectando el mayor— él, nos da tres dibujos diferentes y correctos, aunque aún es incapaz de copiar un cuadro, un círculo, etc. Sólo más tarde él desarrolla alguna comprensión de la perspectiva y la medición; aparentemente él descubre las ideas de la geometría sólida y la geometría Euclídeana casi simultáneamente. El progreso del niño sigue entonces el reverso del orden histórico; conformándose más bien según el orden lógico.

## Diferenciado e indiferenciado

Esta observación nos conduce a problemas más generales. Entre los conceptos de la física encontramos algunos que pueden ser divididos en dos categorías psicológicas: Aquellos conceptos que son "INDIFERENCIADOS", porque cada uno de ellos aparece como una combinación de varias ideas simples, y otros

\* Nota sobre los traductores: Juana González Hernández es educadora en el Círculo Infantil de la UAP. Jesús Reyes es investigador en el Departamento de Física del Instituto de Ciencias de la UAP.

<sup>1</sup> T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, 1970.

<sup>2</sup> J. Piaget, *Scientific American*, noviembre 1953, p. 74; marzo 1957, p. 46; J. Piaget y B. Inhelder, *Child's Concept of Space*, Routledge y Paul, Londres, 1956.

que son descritos como "DIFERENCIA-DOS", porque ellos entran en la composición de los conceptos indiferenciados. "VELOCIDAD", por ejemplo, es una idea indiferenciada, mientras que tiempo y distancia son diferenciadas. En dinámica, "ACCION" es indiferenciada, mientras que las ideas cuantitativas acerca del movimiento, el trabajo, etc., son diferenciadas.

Estamos ahora listos para proponer este problema del desarrollo psicológico, y proponerlo independientemente del desarrollo histórico, porque hemos visto que los órdenes histórico y psicológico no son siempre el mismo: ¿Empiezan las ideas acerca del mundo físico con la elaboración de conceptos diferenciados, porque ellos son más simples, y sólo más tarde se combinan en las relaciones que forman las ideas más complejas que llamamos indiferenciadas, o, por el contrario son formados primero los conceptos indiferenciados (justificando el nombre que les hemos dado) y más tarde separados en ideas diferenciadas?

En el caso de la velocidad  $V = \frac{S}{T}$  y sus dos componentes, distancia  $S$  y tiempo  $T$ , la respuesta es clara. En 1928, Einstein, presidiendo una reunión de filósofos de la ciencia en Suiza, nos aconsejó determinar si la idea de velocidad, precede psicológicamente a la de tiempo o le sigue. Después de muchos experimentos con niños muy pequeños hemos encontrado nociones tempranas acerca de la velocidad que son puramente ordinales y por lo tanto independientes de cualquiera observación de tiempo o distancia. Estas ideas intuitivas tienen que ver con "el pasar" o "el rebasar": un objeto en movimiento  $A$  está primero atrás y después adelante de otro objeto en movimiento  $B$ . Todos los niños, sin importar que tan pequeños sean, dirán que  $A$  viajó "más aprisa" que  $B$ . Claramente, esta clase de intuición está basada solamente en la secuencia de eventos ("antes" y "después") y en las posiciones relativas ("atrás de" y "adelante de") pero no en alguna evaluación cuantitativa de tiempo y longitud. Estas evaluaciones cuantitativas y su relación  $\frac{S}{T}$  vienen solo más tarde. De hecho, el niño con frecuencia emplea erróneamente el concepto de velocidad, aún, cuando quiere medir longitud, mostrando una confusión entre elongación y desplazamiento.

Cuando nos volvemos hacia la dinámica, encontramos resultados similares. Relativamente pronto los niños pueden reconocer la equivalencia de dos "acciones", por ejemplo lanzar un objeto pesado desde el punto  $A$  hasta el punto  $B$  y empujar el objeto sin soltarlo, entre los mismos dos puntos, aún cuando empu-

jarlo toma más tiempo y la fuerza requerida no es ejercida toda a la vez. Hay muchas otras evidencias de ideas tempranas acerca de la acción, en el sentido físico del término. Pero solamente cuando los niños son mayores pueden desarrollar una composición elemental de fuerzas o resolver problemas simples de trabajo (por ejemplo, que subir  $N$  unidades de peso  $M$  pasos es equivalente a subir  $2N$  unidades  $\frac{M}{2}$  pasos). De nuevo aquí ideas indiferenciadas son aparentes antes que las ideas diferenciadas.

Estos resultados tienen un interés para los físicos que quieren relacionar los orígenes de las ideas con su sitio presente en la misma física. Ciertas ideas como hemos notado, han resistido las revolucionarias teorías científicas de la relatividad y de la mecánica cuántica, mientras que otras han sido modificadas significativamente. Resulta que las ideas que han sido más resistentes al cambio son aquellas que hemos llamado indiferenciadas: en física relativista la velocidad ha llegado a ser una especie de absoluto, con tiempo y distancia relativos a ella. En teoría cuántica, la acción ha llegado a ser un concepto fundamental. ¿Es esto por casualidad, o podemos decir que las ideas más fundamentales y por lo tanto más resistentes son aquellas más profundamente incrustadas en el desarrollo psicológico, como hemos visto que es el caso con la topología? Nosotros dejaremos a los físicos contestar esta pregunta, notando solamente que tal relación, si ella existe, es biológicamente comprensible: la formación de las ideas es ciertamente influenciada por nuestra propia estructura corporal, la cual es el asiento de la actividad humana, pero está ella misma sujeta a las mismas leyes fisicoquímicas que cualquier otro objeto material.

### Explicaciones de la causalidad

Finalmente miramos el problema del desarrollo psicológico de las ideas acerca de la causalidad. Nuestra hipótesis es que analizar su formación en los niños nos permitirá aprender cosas precisas acerca de estas ideas.<sup>3</sup> Notemos primero que las múltiples interpretaciones de causalidad pueden agruparse en tres categorías filosóficas principales:

1. Aquellas que no reconocen "resultado" ni conexión inherente entre causa y efecto sino sólo secuencias ordenadas de eventos. La impresión de

"proceso" o de conexión se debe a las asociaciones que resultan en nuestras mentes por estas repetidas secuencias ordinarias (Hume y los positivistas lógicos).

2. Aquellas que conceden la existencia de una conexión observada entre causa y efecto, como sabemos que es el caso de nuestras propias acciones personales, con una generalización de estas ideas a las acciones de los objetos sobre otros (Maine de Biran).
3. Aquellas que conceden una conexión directa entre causa y efecto, una conexión que no es observada sino deducida lógicamente. (El racionalismo desde Descartes y Leibnitz).

Estas interpretaciones son aparentemente las únicas posibles. (Aún las ideas de A. Michotte<sup>4</sup> de la "causalidad perceptual" pueden ser interpretadas en estas tres maneras. En los estudios de Michotte, de hecho nunca vemos nada transmitido entre los objetos "agente" y "pasivo"; vemos solamente que algo ha sucedido y reconstruimos el evento por medio del tipo de inferencias perceptuales analizadas por Helmholtz<sup>5</sup>).

Los estudios sobre la forma en la que los niños perciben la causalidad física nos parecen verificar la hipótesis racionalista y verificarla en todos los estadios. En verdad, al inicio del período sensorio-motor (a los cuatro o cinco meses), encontramos un comportamiento que puede ser descrito así; por ejemplo el infante jala un cordón que cuelga del techo de la cuna para agitar objetos colgados del techo, entonces jala el mismo cordón ya sea para mecer un objeto que cuelga a dos metros de distancia y que ha dejado de moverse o para hacer que continúe un silbido tras una cortina. A primera vista esta clase de comportamiento parece verificar la hipótesis de Hume (una sucesión ordenada entre alguna cosa y alguna otra cosa) tanto como la de Biran (el papel de las acciones propias al jalar el cordón, sin causalidad externa) y ninguna con exclusión de la otra.

Pero debemos tomar nota especial de la clase de comportamiento que aparece entre los seis y los diez y ocho meses. Este comportamiento es caracterizado por una "especialidad" de la causalidad; el niño reconociendo causalidad en sus propias acciones, generaliza y extiende el concepto de causalidad a objetos externos a sí mismo. Las relaciones causales son ahora vistas como permanentes, mientras que a los cuatro o cinco meses

3 J. Piaget, Proceedings of the Symposium in Honor of the Fiftieth Anniversary of the Niels Bohr Institute, Copenhagen, 1970; The Child's Conception of Physical Causality, Littlefield, Adams, Patterson, Nueva York, 1970.

4 A. Michotte, Perception of Causality, Basic Books, Nueva York, 1963.

5 A. Helmholtz, Treatise on Physiological Optics (J. P. C. Southall, ed.), Dover, Nueva York, 1962, vols. 1, 2, 3.

un objeto se supone reabsorbido temporalmente cuando deja el campo de visión, y los niños muy pequeños no hacen esfuerzo alguno por encontrarlo.

Aún en el estadio sensorio-motor del desarrollo humano las ideas de causalidad se desarrollan en términos de los conceptos de espacio en el niño (que ha aprendido las reglas del desplazamiento), del tiempo (el orden en el que los desplazamientos ocurren), de la permanencia de los objetos, etcétera. En otras palabras las ideas de causalidad en el niño se desarrollan a partir de sus observaciones experimentales y construcciones inferenciales, donde las inferencias se vuelven más importantes cuando el niño crece en concordancia con la hipótesis racionalista.

Durante estadíos posteriores (de cuatro o cinco a once o doce años de edad) es notorio un desarrollo cuya significación es inmediatamente clara. Cuando los niños formulan las operaciones lógicas y matemáticas que son características del comportamiento inferencial inteligente no sólo "aplican" estas operaciones a los objetos físicos sino que también las atribuyen a los objetos cuando es posible. Los objetos son entonces transformados en "operadores" (en el sentido ordinario, no en el de la mecánica cuántica); es decir, se suponen capaces de llevar a cabo las actividades u operaciones con mucho en la misma manera que la gente lo hace, y las explicaciones de la causalidad son basadas en esta correspondencia.

Un ejemplo más bien simple, el de Trasmisión mediada del movimiento, ayudará a comprender el proceso. Se le da al niño una fila de canicas A, B, C, ... G, con A en contacto con B, B en contacto con C, etc. Otra canica X descende de un plano inclinado y golpea a A, la primera canica en la fila. Niños pequeños generalmente esperan que toda las canicas, A a G rodarán dispersadas y se asombran al ver que solamente G, la última canica, se aleja rodando.

Niños de cuatro a cinco años dan explicaciones fantasiosas. Ellos dicen, por ejemplo, que la canica X viaja atrás de las otras y golpea a la última. El niño de cinco y medio a seis años transforma lo que ha visto en una serie de transmisiones directas: X golpea a A, que se mueve y golpea a B, que se mueve y golpea a C, etc. Alrededor de la edad de siete u ocho años la trasmisión se vuelve indirecta o mediada: la canica X le imparte a A un "ímpetu" o "fuerza" y esta fuerza pasa a través de todas las canicas, A hasta G, y G se aleja rodando.

Pero entre las edades de seis y once años esta trasmisión aunque claramente "mediada", en el sentido que se su-

pone que los miembros intermedios transmiten el movimiento a través de sí mismos, permanece al menor parcialmente "externa", aun se supone que cada canica A a G es puesta en movimiento por un ligero e invisible empujón de su vecina. El sujeto joven mantiene esta creencia, aun cuando sostenga las canicas o monedas con sus dedos y observe evidencia de lo contrario. No es sino hasta que el niño ha alcanzado la edad de once o doce años que su comprensión de la trasmisión se vuelve totalmente interna y no más parcialmente interna y parcialmente externa; él tiene entonces la idea de trasmisión de energía por impulsos moleculares o vibraciones y no cree más en empujones por los vecinos.

Lo que nos interesa en todo este comportamiento es el inicio del concepto de trasmisión mediada y la razón por la cual éste aparece a la edad de siete u ocho años. La razón por la que aparecen a esta edad parece clara: Sólo a esta edad empiezan los niños a comprender la propiedad matemática de "transitividad":  $a = c$  si  $a = b$  y  $b = c$ . Antes de los siete u ocho años los niños no pueden concluir que  $a = c$  a menos que vean juntas a  $a$  y  $c$ . Una vez que la transitividad es apreciada se atribuye a las canicas. Cada canica trasmite a la siguiente el empujón que ha recibido, como  $b$  trasmite la igualdad de  $a$  a  $c$ .

¿Qué podemos decir de la trasmisión puramente interna que empieza a los once o doce años de edad? Hasta esta edad la transitividad se aplica solamente a equivalencias o diferencias macroscópicas (es decir, a relaciones físicamente observables) y no aún a equivalencias o diferencias inferidas, como estudios recientes han demostrado.

### Acción y reacción

Los conceptos de "acción" y "reacción" proveen un segundo ejemplo de las ligas entre el desarrollo de las operaciones lógico-matemáticas y el de la causalidad. Cuando una bola en movimiento A golpea a otra estacionaria B haciéndola que se mueva, el niño rápidamente aprende a predecir que mientras más pesada es A tendrá mayor fuerza y empujará más a B. Pero si hacemos B más pesada los sujetos más jóvenes también piensan que se moverá más porque es más fuerte. De acuerdo a ellos esta fuerza o peso se añade al peso de A, reforzando su efecto. Sin embargo la mayoría de los niños de cinco y medio a seis años de edad ya predicen que una bola B más pesada "restringe" el efecto de A; este comportamiento es una idea temprana del concepto de resistencia. Pero los niños están

aún muy lejos de ver esta resistencia como una "reacción" en el sentido de una fuerza dirigida y opuesta a la de A; sus ideas conciernen solamente con el frenado o pérdida de velocidad.

En un experimento llevado a cabo hace algunos años (en colaboración con Bärbel Inhelder) usamos un tubo en forma de U lleno en 3/4 partes y con un pistón que presionaba hacia abajo en la rama derecha del tubo. Los niños hasta la edad de nueve o diez años predecían que si incrementábamos el peso del líquido del lado izquierdo (cambiando a un líquido de mayor densidad) el líquido de la izquierda subirá a un nivel más alto. De nuevo aquí los niños ven el peso del líquido como añadiéndose al peso del pistón para incrementar su efecto. Sólo a la edad de once o doce años entienden los niños que este incremento en el peso del líquido como causante de una reacción opuesta a la dirección de la acción del pistón.

En un estudio más reciente, hecho en colaboración con Gilbert Voyat, les dimos a los sujetos un pedazo de arcilla de modelar. El experimentador empujaba con una barra de metal con un disco sujeto a su extremo, mientras que el niño hacía lo mismo en su lado, la cuestión era: ¿Insertará alguno de los dos su barra más que el otro y si es así cuál de los dos? Niños de hasta once o doce años naturalmente respondían que el adulto es más fuerte e insertará más a su barra. Pero a partir de los once o doce años empezamos a obtener elegantes explicaciones: Cuando tú empujas con fuerza yo resisto con fuerza y cuando yo empujo con suavidad tú resistes con suavidad, así que tenemos compensación.

¿Por qué la comprensión del efecto de reacción llega tan tarde? La explicación es que el fenómeno "reacción" es de hecho un grupo de cuatro operaciones (un grupo Kleiniano).

- Una operación directa: incremento en la acción.
- Una operación inversa: decremento en la acción.
- Una operación recíproca: incremento en la reacción.
- Una operación correlativa o dual de la operación directa; inversa de la operación recíproca: decremento en la reacción.

El entendimiento del niño de las operaciones lógicas y proposicionales no incluye una comprensión de estas inversiones coordinadas y reciprocidades hasta que tiene once o doce años, explicando su atribución retrasada de ellos a la causalidad física.

Podríamos citar muchos otros casos de operaciones lógico-matemáticas cuya comprensión en los niños llega más bien

tarde, de tal manera que un retraso similar ocurra en la comprensión de los mismos en términos de causalidad. La distributividad,  $n(x + y) = nx + ny$ , es una de esas operaciones. Al explicar, por ejemplo, la elongación de una banda de hule los niños fallan persistentemente en comprender la distributividad del estiramiento; confunden la elongación de los objetos y partes de objetos con su desplazamiento. Esta confusión también es evidente cuando mostramos al niño dos reglas y movemos una de ellas, la regla desplazada supuestamente se elonga, lo que muestra que los niños persistentemente creen en la no-conservación de la longitud.

Así pues, existe un notable parentesco entre el desarrollo de las operaciones lógico-matemáticas en la mente de un niño y su desarrollo de explicaciones causales para los fenómenos físicos, y existe por dos razones independientes: ambas clases de entendimiento están caracterizadas por ciertos "procesos", porque las operaciones transforman sus objetos en la misma manera que lo hacen las causas, y ambas involucran conservación o invariancia. Las operaciones no transforman todo a la vez sino que siempre dejan ciertas propiedades invariantes mientras que modifican otras. De la misma manera la causalidad implica una transmisión que conserva alguna cantidad (como  $mv$  ó  $mv^2/2$ ) mientras modifica otras.

Dado éste paralelismo general entre las varias combinaciones y coordinaciones de operaciones intelectuales (tales como la transitividad, distributividad, grupos de transformaciones) es natural "atribuirlas" y no solamente "aplicarlas" a los objetos. En otras palabras, tenemos aquí ni simplemente la elaboración de un lenguaje, como al positivismo lógico le gustaría hacernos creer, ni el uso de modelos simples convenientes pero subjetivos. Más bien lo que vemos es una búsqueda inexhaustible de las estructuras objetivas que están ocultas bajo los observables, que nuestras coordinaciones lógico-matemáticas tratan de alcanzar deductivamente y cuyos resultados son entonces confirmados por la experiencia.

La causalidad nunca es una relación visible sino siempre, de la infancia a las más altas formas del pensamiento científico, una reconstrucción inferencial. Comprensiblemente el único medio de explicación a nuestra disposición es una atribución continua de nuestros propios procesos mentales a análogos que creemos encontrar de nuevo en el mundo real.

## Autores y colaboradores

**Mauricio Beauchot**, Doctor en Filosofía, realizó sus estudios en México y en Suiza (Friburgo). Investigador en el Instituto de Investigaciones Filosóficas de la UNAM. Profesor de la División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM. Ha publicado: ELEMENTOS DE SEMIOTICA (UNAM 1979), LA FILOSOFIA DEL LENGUAJE EN LA EDAD MEDIA (UNAM 1981), EL PROBLEMA DE LOS UNIVERSALES (UNAM 1982) y prepara junto con Walter Redmond un estudio sobre la Lógica en México.

**Martín Marino Dávila Jiménez**. Comienza sus estudios como Químico en la Escuela de Ciencias Químicas de la UAP para obtener su Licenciatura en Química en la especialidad de Electroquímica en la Universidad Estatal de Moscú "M. V. Lomonosov" siendo distinguido con Diploma con Mención Honorífica. Maestro de tiempo completo en la Escuela de Ciencias Químicas de la UAP, responsable del proyecto "Creación del Laboratorio de Investigación de Electroquímica", recientemente aprobado por la SEP y miembro de la Mesa Directiva de la Sociedad Mexicana de Electroquímica.

**Deborah Dultzin Hacyan**. Obtiene la licenciatura en Física en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, realizando sus estudios de postgrado en la Universidad Estatal de Moscú "Lomonosov" y en el Observatorio Astronómico Sliterberg. Especialista en astrofísica relativista e investigadora en el Instituto de Astronomía de la UNAM y profesora de asignatura en la Facultad de Ciencias de la UNAM.

**María de la Paz Elizalde González**. Titulada en Química por la Escuela de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Puebla. Realiza estudios de Postgrado en la Universidad Estatal de Moscú "M. V. Lomonosov" donde obtiene su Doctorado en la especialidad de Físico-Química realizando una estancia postdoctoral en la misma institución. Investigadora de tiempo completo del Departamento de Físico-Química del Instituto de Ciencias de la UAP, titular de la Maestría en Química del mismo departamento y profesora de la Escuela de Ciencias Químicas de la UAP.

**Rodrigo Huerta**. Maestría y Doctorado en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Realizó su postdoctorado en el Stevens Institute of Technology, Columbia University y en el Fermi National Accelerator Laboratory. Área de especialidad en Física de Partículas

Elementales de Interacciones Débiles, estructura y conexión con las demás interacciones. Investigador de tiempo completo en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN.

**Jean van Heijenoort**. Fue Profesor en la Universidad de Harvard y es especialista en Historia de la Lógica Contemporánea.

**María Eugenia Mendoza Alvarez**. Obtuvo su licenciatura en Química en la Escuela de Ciencias Químicas de la UAP y realiza actualmente su Doctorado en Química en el Laboratorio de Química Aplicada de la Universidad de Ginebra.

**Elia Nathan Bravo**. Maestría en Filosofía por el Instituto de Investigaciones Filosóficas de la UNAM donde actualmente es investigadora y su campo de trabajo se ubica en la Historia de la Ciencia, siglo XVII.

**Jean Piaget**. De los más importantes Psicólogos contemporáneos realizó contribuciones fundamentales al desarrollo de la psicología infantil.

**Edward P. Tryon**. Es profesor de Física en el Hunter College y en el Graduate Center of the City University of New York, EUA.

**Lourdes Rensoli Laliga**. Historiadora de la Ciencia, es investigadora de la Facultad de Filosofía e Historia de la Universidad de La Habana, Cuba.

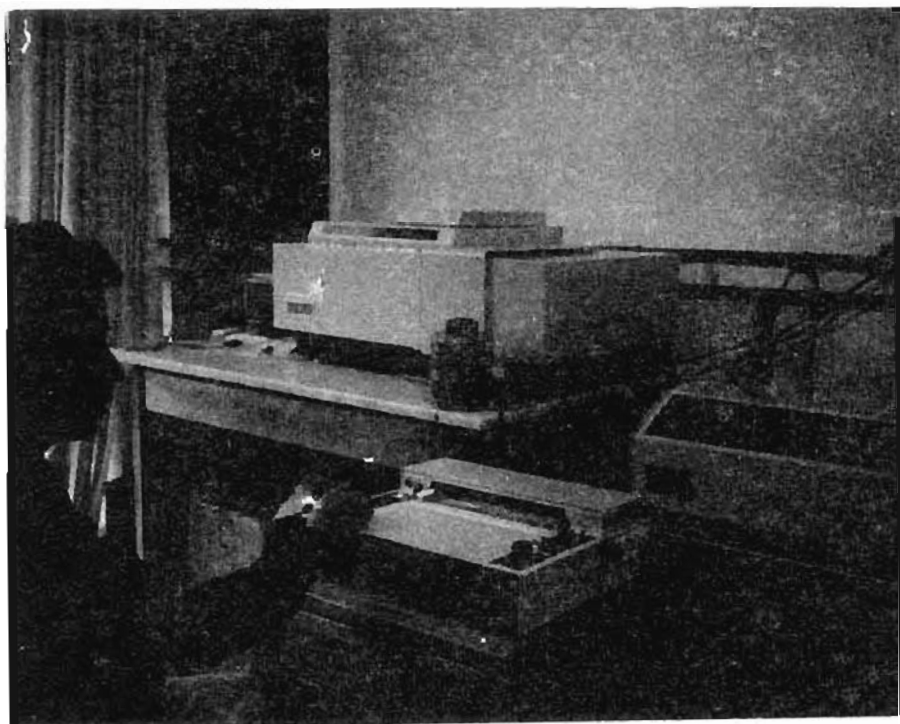
**Juan José Rivaud**. Doctorado en Matemáticas (Ph. D.) por la Universidad de Northwestern, EUA. Área de trabajo: análisis. Profesor titular del Departamento de Matemáticas del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN.

**Luis Rivera Terrazas**. Ha trabajado en el Instituto de Astronomía de la UNAM, en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica de Tonanzintla. Fue Director de la Escuela de Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Puebla y Rector durante dos períodos de la misma universidad. Fue Director del Instituto de Ciencias de la Universidad Autónoma de Puebla y actualmente es coordinador del Departamento de Física de dicho Instituto. Doctor Honoris Causa de la Universidad Autónoma de Sinaloa y candidato al Doctorado Honoris Causa de la UAP.

**Cristóbal Tabares Muñós**. Obtuvo su grado de Maestría en la Universidad de Amistad de los Pueblos "Patricio Lumumba". Fue investigador en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica de Tonanzintla. Actualmente realiza su Doctorado en el Laboratorio de Química Aplicada de la Universidad de Ginebra.

# El Departamento de Físico-Química del ICUAP

MARIA DE LA PAZ ELIZALDE GONZALEZ



Espectro-fotómetros de Absorción Infrarroja, Perkin Elmer mod. 598 y Ultravioleta Visible, Perkin Elmer mod. 552 A.

La creación del Instituto de Ciencias de la Universidad Autónoma de Puebla en el año de 1972 originó un cambio trascendental en la canalización de recursos financieros para la investigación, a la cual se asignaba en el año de 1970 el 0.72% del presupuesto general de la UAP. Así se sentaron las bases que vendrían a impulsar la investigación científica dentro de la Institución y a crear el Laboratorio de Investigación de Físico-Química del ICUAP, mismo que se estableció en 1973 en un recinto de pequeñas dimensiones (8 x 8 mts<sup>2</sup>) de la Escuela de Ciencias Químicas, localizada en Ciudad Universitaria.

Desde su inicio, hasta 1980, el laboratorio careció de una infraestructura adecuada que le permitiera desarrollarse. No obstante estas dificultades, se llevaron a cabo proyectos básicos que en un comienzo fueron encausados a satisfacer las necesidades de la Escuela de Ciencias Químicas en particular.

En el año 1973 el laboratorio contaba sólo con un Investigador. Básicamente los trabajos efectuados fueron llevados a cabo por Tesistas y Ayudantes de Servicio Social. Entonces se realizaron investigaciones de las propiedades cromatográficas de arcillas mexicanas, y trabajos que no acusaban una línea determinada, muchos de los cuales quedaron inconclusos.

En el año 1977 quedó vacante la plaza de investigador, misma que se ocuparía en 1978. Utilizando los servicios del Centro de Cálculo de la UAP y de la UAM-Azcapotzalco, en este período, colaboradores del departamento tra-

bajan sobre la aplicación de la computación a Problemas Teóricos de Química.

Con la contratación en 1979 de un segundo investigador, y el entusiasmo de colaboradores, se presenta el proyecto de reestructuración del laboratorio, comenzándose ese mismo año las obras de reconstrucción que se prolongarían hasta fines de 1980.

La contratación de un investigador más, permitió al Departamento presentarse en ese año el proyecto de investigación: "Síntesis y Caracterización de Compuestos Orgánicos y Organometálicos, con Propiedades Magnéticas, Eléctricas y Ópticas" a la DGICSA-SEP (Dirección General de Investigación Científica y Superación Académica de la Secretaría de Educación Pública). El apoyo financiero otorgado por esa dependencia equipó al departamento prácticamente con los instrumentos de investigación fundamentales.

Paulatinamente son incorporados otros 2 investigadores en 1981 y otro en 1982, dando lugar a 2 nuevos proyectos de investigación, que aunados al ya existente y al proyecto encabezado por un colaborador, vienen a constituir los 4 proyectos de investigación que actualmente se desarrollan en el Departamento de Físico-química del ICUAP. También en 1982, y por propuestas de este departamento, se crea en la UAP el Taller de Soplado de Vidrio.

El proyecto "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS ORGANICOS Y ORGANOMETALICOS CON PROPIEDADES ELECTRICAS, MAGNETICAS Y OPTICAS" tiene por objetivo la síntesis y caracterización de compuestos orgánicos (complejos de transferencia de carga, sales simples y complejos del 7,7,8,8-tetracianoquinodimetano); organometálicos (complejos de níquel y cobre con beta-dicetonas y 7, 8,8-tetracianoquinodimetano como ligando e intercalado) y complejos inorgánicos (ftalocianinas de metales como litio, sodio, calcio, magnesio, manganeso, hierro, níquel, cobre, cinc, plata, estaño);

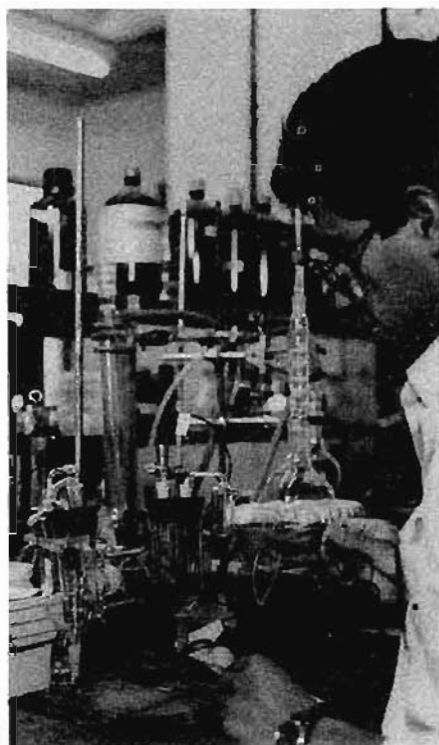
así como la obtención de cristales de estos compuestos de pureza elevada y tamaño adecuado para determinación de sus propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas.

En la realización de esta investigación, el principal interés radica en el desarrollo de infraestructura en México para la obtención y estudio químico de materiales que puedan tener aplicación tecnológica en dispositivos electrónicos (semiconductores, celdas solares) dadas sus relevantes propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas. La formación de recursos humanos en esta específica área de la Química es asimismo meta muy importante de este trabajo.

En este proyecto, iniciado a finales de 1980 y hasta la fecha auspiciado por la DGICSA-SEP y la UAP, toman parte los siguientes investigadores: Quím. Amparo Salmerón V., Quím. Juan Gerardo Robles M., M.C. Jesús Mendieta P.; auxiliares y colaboradores: Quím. Alberto Galindo G., Quím. Javier Sosa R., Pas. Baldomero Gómez R., Pas. José Antonio Guevara G., Pas. Alejandro León E., Srita. Yolanda Angeles C., Srita. Laura Orea F., Srita. Diana Castolo L. y Dra. Ma. de la Paz Elizalde G.

El proyecto "SINTESIS DE ZEOLITAS Y SU APLICACION A LA INDUSTRIA PETROQUIMICA" comprende la obtención y caracterización físico-química y el estudio de las propiedades de adsorción y cinético-catalíticas de zeolitas tipo "Y"; así como investigaciones sistemáticas de reacciones catalíticas.

En México, la gran mayoría de los procesos químicos industriales, particularmente en la industria petroquímica, se realizan con ayuda de catalizadores importados. De esta manera, producir en el país los catalizadores es la meta ambiciosa de esta investigación.



Celdas para el trabajo de Electrosíntesis de Metaftalocianinas.

Este proyecto fué iniciado en 1982, recibiendo en 1983 apoyo financiero de la DGICSA-SEP y en él participan los siguientes investigadores: Dr. Gelasio Aguilar A., Dr. Carlos Bascuñán, M.C. Eduardo Campos R., y colaboradores: Pas. Ana Ma. Cervantes T., Pas. Gerardo Aguirre M., Pas. José Miguel Anaya L., Pas. José Manuel Islas M., Pas. José Baez G., Pas. Javier Avalos M.

La "COMPUTACION APLICADA A LA QUIMICA" es el título del 3er. proyecto que encabeza el M.C. Jesús Mendieta P., profesor adscrito a la Escuela

de Ciencias Químicas y colaborador de este departamento.

En este trabajo, iniciado en 1982, se pretende construir diversos dispositivos de control automático de los instrumentos de análisis químicos empleados en los trabajos de investigación del departamento. Para esto ha sido necesario diseñar y desarrollar circuitos microcomputacionales de conversión analógico-digital y digital-analógico para la adquisición de datos, control de instrumento y análisis gráfico de señales.

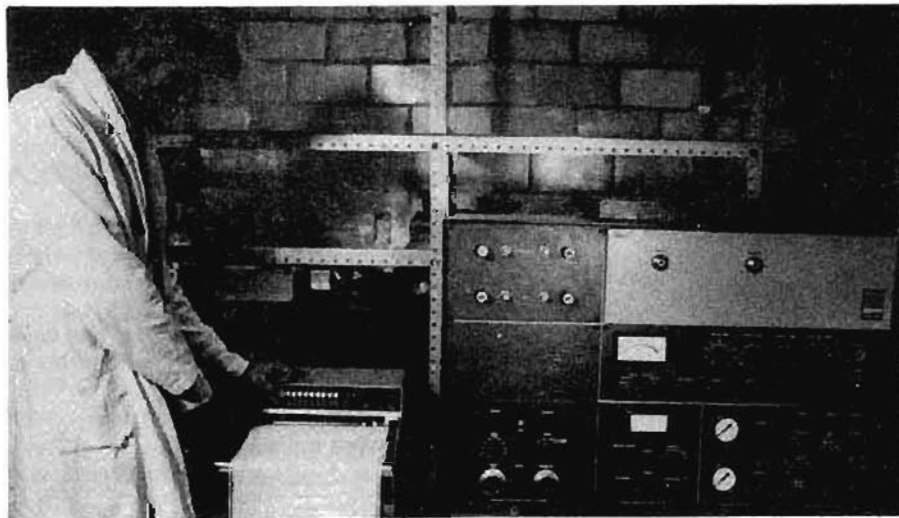
Señalar que dichos circuitos comúnmente son adquiridos por importación y que el acoplamiento del sistema de cómputo ramificado a los diferentes instrumentos analíticos ha suprimido en este departamento la importación duplicada de equipo costoso, hace destacar la importante labor que realiza el pequeño grupo de universitarios que desarrollan trabajo tan relevante: Pas. Eugenio López G., y estudiantes de la Escuela de Ciencias Físico-Matemáticas-Colegio de Computación, Sr. Pedro Jacobo C. y Sr. Héctor Mendoza H., quienes por su interés en la colaboración interdisciplinaria han logrado exitosamente aplicar sus conocimientos.

Actualmente se tiene acoplado el sistema de microcómputo al Espectrofotómetro IR, Espectrofotómetro UV, pH-metro y Potenciógrafo, y se realizan además múltiples tratamientos de datos experimentales y estudios teóricos de Química.

Este proyecto no ha solicitado subsidios externos y es financiado totalmente por la UAP.

El proyecto más reciente del departamento "DESARROLLO DE ADSORBENTES Y ESTUDIOS DE ADSORCION APLICADOS A CROMATOGRAFIA Y A CATALISIS" se inició en 1983. El trabajo contempla la obtención de diferentes tipos de adsorbentes, su tratamiento, caracterización y prueba de la reproducibilidad de sus propiedades, para aplicaciones prácticas en cromatografía (fases estacionarias y columnas empacadas) y catálisis (catalizadores y soportes).

La cromatografía como método físico-químico de separación de mezclas, de análisis de pureza, de identificación y determinación de magnitudes físico-químicas, ha jugado un papel determinante en el desarrollo de la Química de los últimos 30 años. Actualmente puede estimarse que mundialmente ninguna investigación química puede prescindir del uso de alguna técnica cromatográfica. En México, el equipo, los adsorbentes y las columnas cromatográficas son adquiridos por importación; por lo que su obtención, investigación y desarrollo son



Cromatógrafo de Gases Varian modelo 2800. Se emplea en los Campos Analíticos y Físico-químico de superficies.



Equipo de computación aplicado a instrumentos químicos. En la foto se muestra el equipo para el análisis de espectros UV/VIS e IR.

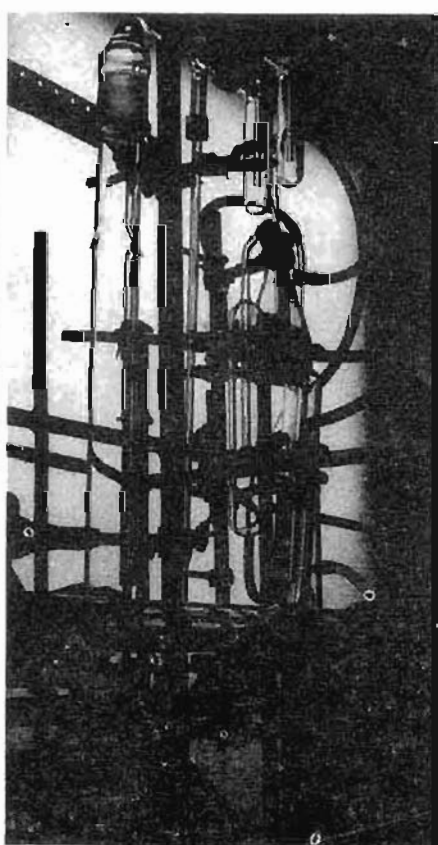
la justificación del proyecto desde el punto de vista de la investigación básica, de la interacción interdisciplinaria y de la aplicación práctica inmediata en el campo docente, de investigación y de producción.

Inquietud del responsable del proyecto, Dra. Ma. de la Paz Elizalde G., es además la formación de recursos humanos en esta disciplina, la consolidación de un grupo de investigación dentro de la institución y la interacción disciplinaria e interinstitucional.

En este proyecto colaboran: Quím. Hilda Lima L., Los Pas. Quím. Sr. Luis Soto F., Sr. Trinidad Juárez A., Sr. Martín Álvarez y los estudiantes Sr. Andrés Camacho Y. y Alfredo Gómez G., contando con el apoyo de la DGICSA-SEP y del CONACYT.

Actualmente las fuentes de ingresos del Departamento de Fisicoquímica del ICUAP para el desarrollo de sus investigaciones son la UAP, la DGICSA-SEP y el CONACYT; destinándose los presupuestos provenientes de la primera a salarios, reactivos y materiales de mantenimiento, y de los de la segunda y tercera a la compra de equipo, sustancias y materiales especiales.

Los investigadores de este departamento sostienen nexos científicos nacio-



Sistema de Trampas de la Línea de Alto Vacío.

nal e internamente mediante los convenios celebrados por la UAP en particular con la UNAM, la Universidad de Camaguey (CUBA), la Universidad Técnica de Dresden (REP. DEM. ALEMANA), la Universidad de Lodz (POLONIA), y próximamente con la Universidad Estatal de Arizona (EUA). Conjuntamente se trabaja en proyectos de investigación, manteniendo un intercambio académico. Siendo una de las preocupaciones del colectivo la elevación del nivel académico y científico de los profesores y egresados químicos de la institución, el departamento ha presentado a las autoridades universitarias y educativas nacionales un programa para establecer estudios de MAESTRIA EN QUIMICA en fechas próximas.

El departamento por su crecimiento se localiza en dos áreas de ciudad universitaria: Escuela de Ciencias Químicas y Escuela de Ingeniería Química. Los responsables de éste son la Dra. Ma. de la Paz Elizalde G. y el Dr. Gelasio Aguiar A., funcionando además internamente comisiones científicas, técnicas y administrativas entre los investigadores, auxiliares de investigación y colaboradores.