

**CON GOETHE VISITAMOS EL  
SABER CIENTÍFICO  
CONTEMPORÁNEO**

LUIS N. EPELE, CARLOS A. GARCÍA CANAL

*Instituto de Física La Plata, CCT La Plata, CONICET and*  
Laboratorio de Física Teórica  
Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas,  
Universidad Nacional de La Plata  
CC 67, 1900 La Plata, Argentina

## INDICE

*"Hay más literatura en el índice de un libro científico que en treinta volúmenes de literatura".* Juan José Millas durante el programa "La Página en Blanco" de Canal 4, Buenos Aires, noviembre de 2003.

Presentación 5

Introducción 10

Ciencias Naturales 20

Espacio-Tiempo 33

Elementalidad 47

Mecánica Cuántica 59

Entropía 77

Evolución 92

Simetría 101

Caos 112

Universo 119

Ciencia=Cultura 126

Finale 137

Glosario 139

*“Escribir te convierte en alguien que siempre se equivoca”*  
Philip Roth (Pastoral Americana)

# PRESENTACIÓN

Acompañamos aquí a no especialistas en una visita al saber científico contemporáneo. Para ello intentamos concretar la siempre presente inquietud de sistematizar el análisis de las ideas que están en la base del pensamiento científico de hoy para presentarlas a lectores interesados. A partir de estas premisas nació este conjunto de resúmenes de los temas que subyacen y definen la actividad científica actual. La idea central es hacerlo desde el punto de vista del científico activo. Es decir, no se lo hace desde la crítica, ni desde la filosofía ni a partir de una discusión histórica de la interrelación de la Ciencia con la sociedad. Comentamos y analizamos tópicos que, como dijimos, están en el quehacer cotidiano del científico, dando sustento al desarrollo tecnológico actual. Sin ninguna duda son temas que tienen que ver con el pensamiento universal ya que no son, o no deberían ser, patrimonio exclusivo de la Ciencia. Para poder presentarlos de manera accesible debemos cambiar nuestra ubicación profesional diaria porque necesitamos mirar estos conceptos con cierta perspectiva global. Este ejercicio sirve para limpiar los conceptos del lenguaje técnico, o de la jerga específica, que usamos en la tarea científica, con el objetivo de poder comunicarlos a una audiencia de no especialistas. Intentamos comentar conceptos básicos de la Ciencia sin recurrir, en la medida de lo posible, a un conocimiento previo de la herramienta matemática. No cabe duda, por otra parte, que no podemos, ni debemos, abandonar totalmente la lógica del pensamiento que subyace a la tarea del científico. Discutiremos, por ejemplo, al espacio-tiempo desde el punto de vista de la Ciencia dando las razones por las cuales debe ser considerado como un concepto objetivo. Llegar a ese nivel de abstracción requiere de una cierta rigurosidad en el pensamiento y de alguna manera deberemos transitarla. Vamos a tratar de guardar sólo lo esencial en lo formal de los razonamientos pero no lo abandonaremos del todo. En las presentaciones que siguen, cuando hablemos por ejemplo de la incerteza cuántica y del determinismo o del concepto de predicción en Física, que son los temas que seguramente más han conmovido a la filosofía a partir de la segunda mitad del siglo veinte, vamos a tener que recurrir al rigor

necesario para justificar y fundamentar las ideas que tratemos de transmitir. La intención es que estas páginas no sean una nueva o diferente expresión de divulgación científica en el sentido periodístico sino que mantengan dentro de lo posible el rigor científico al que estamos acostumbrados en el día a día de nuestra actividad.

Hablaremos del pensamiento científico y pretendemos que el lector vaya encontrando las relaciones que este tiene con su propia actividad. Queremos comentar las ideas actuales de la Ciencia y conseguir que la eventual conexión con el Arte y las Humanidades surja a posteriori, a partir de la discusión y digestión de las ideas presentadas. Cada uno recurrirá a sus experiencias personales para concretar la proyección de la Ciencia sobre ellas o viceversa. Si hablamos del tiempo, por ejemplo, para la Ciencia hay una cierta conceptualización y una pretensión de descripción objetiva mientras que para un músico probablemente el tiempo represente el eje de su concepción artística o de su sensibilidad.

Vamos a discutir, en primer lugar, cuáles son los elementos del pensamiento científico, por qué el pensamiento científico es riguroso y en qué medida nos puede llevar, asintóticamente, al conocimiento de saberes verdaderos sobre la Naturaleza, a un análisis objetivo de la realidad que nos rodea. Posteriormente vamos a tratar temas más específicos: por ejemplo el tiempo y el espacio-tiempo. Analizaremos también cómo la Ciencia concibe el Universo y su evolución y por qué razón los elementos del análisis científico contemporáneo han llevado a establecer la teoría del Big-Bang. Otro sujeto de análisis va a ser la relación entre el determinismo y la incerteza que le es propia a la Mecánica Cuántica, es decir, a la descripción dinámica del mundo microscópico. Otro análisis va a tener que ver con la visión actual sobre los fenómenos llamados caóticos y la fractalidad donde hay ideas relativamente nuevas. Hay también interés en los sistemas colectivos que son sistemas compuestos que reúnen muchísimos elementos, cuya estructura supera la manifestación de cada parte individual. También nos dedicaremos a presentar las ideas cen-

trales de la teoría de la evolución biológica. En la temática seleccionada no incluiremos explícitamente a la tecnología. Sin ninguna duda este es un tema en estrecha relación no sólo con la vida actual; basta recordar por ejemplo la presencia central de la TV, el CD, el DVD, las cámaras digitales, la realidad virtual, etc. Si bien todos estos elementos transforman las manifestaciones culturales del hombre, no vamos a tratarlos específicamente, sino que nos preocuparemos por el pensamiento científico mismo y por las ideas que transita fundamentalmente la Física. ¿Por qué razón insistimos en la Física? En primer lugar porque somos físicos, pero además porque hay valores objetivos y convincentes que ubican a la Física en el lugar de paradigma de las Ciencias Naturales. Pretendemos hacer una descripción adecuada, es decir llevada a un nivel de lenguaje que pueda entender quien no tiene a priori los elementos básicos ni las herramientas matemáticas que están detrás de las ideas que constituyen el saber científico actual. La pretensión final y el desafío, es que todos participemos en un debate abierto y permanente con criterio científico.

*Poeta, por ser claro no se es mejor poeta  
Por oscuro, poeta - no lo olvides - tampoco.*

Rafael Alberti

# INTRODUCCIÓN



Comenzamos con una reflexión sobre la importancia global del pensamiento científico. Parece una discusión imprescindible para ubicarnos sin ambigüedades frente al desafío que nos hemos propuesto.

Hasta hace unos cinco siglos, la vida cotidiana era prácticamente la misma en cualquier pueblo de la Tierra. No se disponía de agua corriente, ni de cloacas, ni de escuelas, ni de comunicaciones. La medicina, si se puede llamar de ese modo, consistía fundamentalmente en el uso mágico de hierbas. Esto era así en Madrid, Londres, Potosí o Santiago del Estero. En ninguna ciudad se vivía peor ni mejor que en las capitales europeas. La vida era dura, difícil y ciertamente corta en todas partes. Probablemente los nobles tenían algunas ventajas relativas, pero las comodidades que, injustamente, disponían ni remotamente se aproximaban a las que posee hoy la clase media de cualquier país. Nadie escuchaba a Bach cenando, como podemos hacerlo nosotros hoy. Pero hace 500 años los europeos redescubrieron el pensamiento científico que había surgido ya en la Jonia clásica. Allí se comenzaron a buscar en la propia Naturaleza las causas de todos los fenómenos observados y no atribuyéndolos a decisiones caprichosas de los dioses. Estas ideas se apagaron por mil años hasta el Renacimiento y a partir de entonces Europa se entera, por los viejos textos presocráticos, que la Naturaleza podía entenderse sobre la base de causas naturales. Había regularidades registrables y no todo era capricho divino. De esa manera comenzó la diferenciación entre Europa y el resto del mundo. Vale la pena mencionar que si bien en China se inventó la pólvora, no se comprendió la Química capaz de explicar la explosión... Como consecuencia, la velocidad del progreso de cada cultura diferenciada, estuvo definida por el conocimiento científico. Los pueblos que no lo alcanzaron siguieron el ritmo de evolución de los diez mil años anteriores. Esos pueblos no fueron marginados ni se aislaron de manera activa, simplemente siguieron caminando en cuanto los otros comenzaron a correr... Donde surgió, el conocimiento científico se fue acumulando con velocidad creciente y un descubrimiento trajo otro y así siguiendo. No todo fue suave, el avance sufrió trabas desde

la religión y las monarquías. Pero las fuerzas sociales se fueron deshaciendo de los obstáculos e instauraron la democracia. Como dijo Thomas Huxley: la historia de la Ciencia es una larga lucha contra el principio de autoridad, principio que asigna veracidad a una aseveración dependiendo de quién la diga. Libre entonces, el conocimiento científico, que es absolutamente democrático, se desbordó y produjo la revolución industrial. Finalmente, en el último siglo, el pensamiento científico aplicado fue determinante en la conformación del mundo moderno. Dio lugar a la evidente mejora de la calidad de vida a pesar de las desigualdades que aún existen. Le debemos la aparición del automóvil, del avión, de la computadora personal y de toda una avalancha de avances médicos, comodidades y entretenimientos. De la revolución industrial a la informática transcurrieron menos de 300 años. Antes de la Ciencia, en 300 años el mundo no había cambiado un ápice...

Hay pueblos que cambiaron en las últimas décadas pero no por desarrollo propio, sino por derrame de lo que se llama "cultura" occidental. En particular los aviones vuelan en sus cielos, la comunicación global los invade y aparecen conflictos graves porque estos pueblos ven lo que usan los turistas o muestra la televisión y no tienen manera de pagarlo o producirlo. Para aspirar a resolver estos conflictos es importante comprender y poseer el pensamiento científico.

El primer tópico que desarrollaremos trata sobre la Ciencia en general. Comenzaremos preguntando qué se entiende por Ciencia. Realmente, nuestra intención no apunta a una discusión filosófica sobre la definición de Ciencia, lo que nos interesa es transmitir el significado del quehacer científico.

En general se tiende a pensar que Ciencia es sinónimo de conocimiento organizado. Sin embargo, se observa de inmediato que esa idea incluye, por ejemplo, a la propia agenda ya que contiene conocimiento organizado: los teléfonos de amigos y conocidos ordenados alfabéticamente, etc. La lista de compras que se hace antes de ir al supermercado, también es conocimiento organizado, pero ciertamente no constituye Ciencia. Lo que deseamos destacar

respecto de la Ciencia es su condición de actividad del hombre y como tal que se trata de la búsqueda organizada del conocimiento. De modo que la organización que hablamos no lo es del conocimiento sino la organización es la de la búsqueda. En otras palabras, esa búsqueda organizada se llama Ciencia porque se realiza a través de un método: el método científico. Veamos entonces qué entendemos por hacer Ciencia, a través de esa búsqueda organizada. Esta búsqueda tiene varias etapas y varias posibilidades. Generalmente se dice que la Ciencia tal como la concebimos hoy empieza con Galileo y se continúa con Newton, ya que con ellos adquiere validez el método experimental. Debemos incluir en este nivel también al esfuerzo de la Ciencia observacional, porque hay muchos elementos surgidos de esa manera que constituyen conocimiento científico de hoy. En efecto, si bien no podemos experimentar con las fases de la luna o producir un eclipse para analizarlo, hay actividad científica también en la observación de los mismos, siempre que esa observación tenga método, es decir, siga protocolos precisos. Entonces decimos que hacer Ciencia implica el diseño y realización de experimentos, pero no cualesquiera, tienen que ser experimentos reproducibles, porque si los podemos reproducir les empezamos a reconocer objetividad, cualidad imprescindible. Una vez que disponemos de esas observaciones experimentales reproducibles hay una etapa de creación de la teoría del fenómeno en cuestión a partir de hipótesis razonables que lo modelen. Esta teoría debe ser verificable o contrastable con los experimentos o con esas observaciones ordenadas de eventos que no podemos manipular en el laboratorio porque se dan en la Naturaleza a escalas no humanas. En este momento vale la pena recordar a Arthur Conan Doyle quien pone en boca de Sherlock Holmes (Escándalo en Bohemia) la siguiente reflexión: “Todavía no tengo datos. Es un error garrafal teorizar antes de tener datos. Inadvertidamente, uno comienza a tergiversar los hechos para acomodarlos a sus teorías, en lugar de que la teoría sirva a los hechos”. Conocía el método científico...

Finalmente, está la tarea de comprobación de la teoría mediante muy

diferentes observaciones, tantas como sea posible. Este es nuestro esquema de tarea científica, del hacer científico. De él surge que la Ciencia no tiene permiso para conjeturar, para adivinar, para esperar que algo suceda como uno quiere que suceda, para desear que algo funcione de una determinada manera. No puede confiar, tampoco puede creer. Sin embargo, aclararemos, que por detrás de la Ciencia están los científicos que hacen Ciencia y los científicos conjeturan, adivinan, esperan, desean, confían y creen en su tarea cotidiana. Pero cuando pasan a través de todas esas sensaciones que los ayudan en su trabajo, terminan buscando y el resultado de esa búsqueda no les permite declarar que algo que encontraron con método científico es mejor que otra posibilidad. Simplemente es lo que es. Tienen que terminar describiendo lo que observan tal como lo encuentran sin ponerle el sesgo, las ganas para que suceda de la manera que quisiesen. Por lo tanto, el objetivo del científico debe restringirse a descubrir cómo ocurre en la Naturaleza para poder modelar su funcionamiento.

Es importante destacar que la Ciencia se estructura a partir del convencimiento de que no tenía sentido la búsqueda de la "verdad absoluta". Es decir, cuando empezaron a hacerse preguntas limitadas, cuando dejó de preguntarse qué es la materia, qué es el Universo o cómo funciona el Universo como un todo, para cuestionarse asuntos más limitados del tipo de cómo fluye el agua por un tubo, cómo cae una manzana o cómo funciona un dado mecanismo particular. Allí está el verdadero comienzo del avance científico que desemboca en nuestra Ciencia contemporánea. De modo que podemos decir que lo que hace la Ciencia es investigar fenómenos separables, limitados. Define un espacio de interés, un sujeto de análisis que puede aislar de otro de alguna manera. De modo que cuando esas interferencias mutuas entre diferentes sujetos sean despreciables o cuando se puede imaginar que esas interferencias van a ser importantes sólo en una segunda revisión del problema, se consigue atacar un asunto o un fenómeno limitado. Sin embargo, el estudio sistemático de estos fenómenos separables, puede conducir a una comprensión

global. Efectivamente, uno de nuestros objetivos, probablemente el objetivo final, será transmitir la concepción científica que tenemos sobre el Universo y su evolución. Es decir, tratar de comprender que el Universo llegó hasta hoy como producto de todos los mecanismos parciales que hemos logrado entender. Este resultado constituye ciertamente una comprensión global del Universo, pero surge de un estudio sistemático de fenómenos separados.

A partir de las ideas expuestas tiene sentido detenernos para elogiar la Ciencia y comprender que ella no juzga ni da directivas y por ello es realmente digna y humilde. Nos parece ciertamente muy relevante señalar esto último para insistir en su calidad implícita.

Digamos también que la Ciencia define ella misma una clasificación de acuerdo a su objeto de análisis. Por eso se habla en primer lugar de Ciencia básica, que es la búsqueda primera y se refiere al análisis de los hechos observables y de los fundamentos subyacentes a todo el comportamiento de la Naturaleza. En otras palabras, las leyes esenciales. Por ejemplo, cuáles son las interacciones fundamentales, cuál es la estructura mínima a partir de la cual podemos llegar a completar el conocimiento de la Naturaleza. Se resumiría en la palabra comprender. Pero también hay una Ciencia, igualmente válida, ya que el orden de presentación no quiere decir jerarquía, que es la Ciencia aplicada, la Ciencia que está siendo desarrollada en una búsqueda ordenada de un objetivo específico. Es decir, resolver el problema del catalizador correcto para transformar los hidrocarburos o qué tipo de diseño óptimo se puede lograr, desde el punto de vista de la termodinámica, de un motor eficiente. Todos los elementos para analizar estos problemas los tenemos dados por la Ciencia básica, pero hay que acomodarlos para resolver un problema específico. Finalmente llegará la aplicación sistemática de estas soluciones y esto es precisamente lo que constituye la Tecnología.

Con todas las aclaraciones que hicimos sobre la relevancia de la Ciencia, no debemos eludir la tarea de hablar conjuntamente de las dos actividades intelectuales supremas del hombre: Ciencia y Arte. Hagamos entonces algunos

comentarios generales. Tradicionalmente Ciencia y Arte son vistas, de alguna manera, como actividades dicotómicas. O se hace ciencia o se hace arte. El lugar común por Ciencia es decir que se trata de una actividad racional, objetiva, fría; en tanto que el Arte sería subjetivo, irracional, emotivo. Sin embargo esta separación no soporta el menor análisis serio. Inmediatamente suena muy superficial. La Ciencia está elaborada por científicos y los científicos para hacer Ciencia usan de su imaginación y de su inspiración en muchas oportunidades. Por el contrario hacer Arte surge frecuentemente como resultado del agregado, o del desagregado, de partes sobre bases racionales. En efecto, podría implicar una actividad verdaderamente penosa como puede ser llenar una pared del material base antes de empezar a concretar un mural o cualquier actividad similar. Entonces podemos ponernos de acuerdo en ver Arte y Ciencia como dos formas diferentes de creación. Recordemos que cuando hablamos de hacer Ciencia, dijimos que implicaba, entre otras actividades, crear teorías. El científico es también un creador. Por lo tanto podemos decir que Arte y Ciencia son actividades humanas complementarias. Aunque la Ciencia constituye lo que llamaríamos un libro cerrado para la mayoría de la sociedad, tiene una influencia decisiva no solamente en la tecnología que domina lo cotidiano, sino también en la generación de puntos de vista en nuestra ubicación respecto de la Naturaleza. De la misma manera, el Arte, que en cierta medida también puede ser un libro cerrado para muchos, contribuye, o debería, a entender al hombre y a apreciar nuestra existencia. Más aún, en palabras de Herbert Read, el Arte debería ser el principal instrumento de nuestra cognición de la realidad. Por lo tanto, Arte y Ciencia no son sujetos mutuamente excluyentes ni contradictorios, pero sí complementarios.

Tomemos un ejemplo, no por trivial, menos claro. Observemos una cascada de agua. La mirada científica se dirigirá quizás a la velocidad de las partículas de agua, al tamaño de las gotas, a su aprovechamiento como fuente de energía hidroeléctrica, etc. Para el Arte esa misma cascada será motivo de inspiración para un poema, inducirá la realización de un film o de una

obra plástica, etc. Son claramente dos opciones complementarias en el sentido estricto del término ya que sirven para completar o perfeccionar una cosa. Es importante remarcar que el concepto de complementariedad tiene presencia clave en la Ciencia contemporánea. Como veremos en su momento, Niels Bohr en su análisis de la Mecánica Cuántica lo pone en juego con toda claridad. Nos hace entender que descripciones complementarias de fenómenos, representan aspectos diferentes de la realidad. Un aspecto excluye al otro aunque cada uno contribuye a la comprensión del fenómeno como un todo. En la Física del átomo aprendemos que la imagen ondulatoria y la de partícula son complementarias. De la misma manera, la experiencia artística parece que evanesce cuando los fenómenos son explorados científicamente. Es claro que no se puede experimentar simultáneamente el contenido estético de una sonata y preocuparse de los procesos neuro-fisiológicos del cerebro ligados a la audición. Pero se puede cambiar a voluntad de una a otra experiencia. Convengamos también que aunque a alguien en particular le alcance con una u otra visión del problema, ambos aspectos son necesarios para tomar contacto total con la realidad de los fenómenos. Insistimos con otro ejemplo. La música puede considerarse en algún sentido irracional, ya que no hay manera objetiva de probar que un dado pasaje musical es correcto o no. Sin embargo, la estructura de la música tiene una fuerte relación con la Matemática. En efecto, basta recordar la presencia de simetrías, repeticiones en diferente clave, inversión tonal, etc. ¿Puede ser esta la razón por la cual muchos científicos se sienten atraídos por Bach y Ginastera?

Aceptada la complementariedad, parece también de interés coleccionar algunas diferencias sustanciales entre Ciencia y Arte, aunque no se deba hablar de un versus. En primer lugar debemos entender que existe el progreso científico pero no existe el progreso en el Arte. En efecto, la evolución del conocimiento científico puede ser evaluada. Por ejemplo, la teoría de la gravitación de Einstein es un paso adelante ya que hay un incremento del conocimiento del Universo respecto del que provee la teoría de la gravitación de

Newton. Por el contrario, debemos admitir que no hay ningún parámetro que permita decir que una escultura gótica es mejor que una románica. Puede sí haber un incremento de sofisticación, otros medios de expresión, otras posibilidades técnicas. Sólo eso. Esto último también se da en la Ciencia, pero aquí implica, o da lugar a un genuino aumento de comprensión de la Naturaleza. Otra diferenciación que merece destacarse se refiere al propio mecanismo de creación. La creación artística original permanece como la presentación más genuina de sus valores. Ciertamente es absurdo repetir un poema con nuestras propias palabras. En la Ciencia, por otro lado, lo importante de la creación es el contenido y en general sucede que éste se aclara en presentaciones posteriores. Por último digamos que la obra de Arte representa, en general, una entidad personal transmitida y reinterpretada por otros: la obra abierta. Contrariamente, una comprensión científica es una entidad impersonal que surge de la abstracción y objetivización de múltiples experiencias individuales.

Hagamos ahora una síntesis clasificatoria de las Ciencias con referencia a los respectivos campos de estudio, a fin de ubicarnos mejor frente a sus objetivos. La Ciencia Exacta por antonomasia es la Matemática. En su hacer todo está bien si no se contradicen las premisas. Es decir, si las premisas son verdaderas, las conclusiones son verdaderas. El criterio de validación lo provee, casi con exclusividad, la lógica. Sólo agreguemos que hay también ciertas estructuras matemáticas que son inducidas por hechos de la Naturaleza. Por ejemplo los números o el concepto de grupo, etc. Las mal llamadas Ciencias Exactas deberían conocerse con el nombre de Ciencias Naturales, cuyo objetivo es la descripción científica de la Naturaleza. De ellas la Física es el paradigma. El criterio de validación aquí es más complejo. Se deben contrastar sus resultados y predicciones con la observación experimental. Consecuentemente, la validez de sus aseveraciones en general está restringida al nivel o a la escala de que se trate. Por lo tanto el conocimiento que brinda siempre es perfectible. Sólo pretende una descripción irrefutable válida al



nivel conocido, garantizando la objetividad. La profundización del análisis, por aparición de nuevos medios y métodos puede dar lugar a modificaciones y mejoras de comprensión.

Antes de introducirnos en los diferentes tópicos que desarrollaremos en detalle, nos gustaría excusarnos frente a eventuales lectores expertos. Para ello no encontramos nada mejor que citar a Enrico Fermi (1901-1954), importantísimo físico italiano cuyas realizaciones científicas son incontables. Fermi gustaba decir: "Nunca se debe subestimar el placer que sentimos al oír algo que ya conocíamos."

## CIENCIAS NATURALES

La Física es la Ciencia natural que elegimos como punto de partida para introducirnos en el pensamiento científico. La Física, en una definición antigua, formaba parte, junto con la Química, de las ciencias de la materia inanimada. La Física se encargaba de los fenómenos naturales a gran escala mientras que la Química se interesaba en las relaciones entre los cuerpos puros y en las mezclas y combinaciones de lo que se llamaban sustancias químicas. Esta era la idea antigua porque desde el siglo dieciocho y sobre todo en el siglo diecinueve, lo que fue objeto de análisis de la Química, referente al comportamiento de las relaciones entre cuerpos puros desemboca en la Física Atómica. Es decir, en el conocimiento de la estructura atómica de la materia. De modo que el objeto de la Química se transforma en objeto de la Física y aquella división histórica deja de tener sentido. Sin embargo, nos interesa recordar que a pesar de que la Física era considerada una Ciencia de la materia inanimada, la palabra inglesa para designar al médico es "physician", (físico se dice physicist) y de alguna manera está ligada con otra acepción que tuvo la Física a lo largo de la historia, que fue la de Ciencia de curar el cuerpo.

Cuando evoluciona el conocimiento, la división entre Física y Química caduca y la Física se transforma de hecho en la Ciencia del conjunto de los fenómenos naturales.

Podríamos comenzar entonces hablando de los fenómenos naturales. Todos tenemos alguna imagen acerca de los fenómenos naturales y podemos partir de esa idea intuitiva o fenomenológica. Observemos que esta concepción está de acuerdo con la etimología de la palabra porque físico indica Naturaleza. En la actualidad la Física de alguna manera comprende a la Química; a la Mecánica, que formó parte en la historia de una actividad totalmente separada y que inclusive pertenecía a la Matemática; a la Astronomía; la Astrofísica. Hacer ahora una división entre las Ciencias naturales es un poco arbitrario. A propósito cabe recordar una discusión que se dio cuando el primer premio Nobel de Química fue otorgado a Svante Arrhenius (1859-

1927) quien desentrañó el comportamiento de las sustancias químicas cuando se disuelven y se forman los iones. En ese momento se discutía si le daban el premio Nobel de Física o el de Química porque efectivamente él era un fisicoquímico ya que estaba interesado justamente en problemas que se encontraban en la línea de transición. Estamos hablando del principio de siglo. Hoy parece que preocuparse mucho de esa división y de definiciones precisas en ese sentido no tiene mayor interés.

A partir de la presentación de las Ciencias de la Naturaleza nos preguntamos en primer lugar qué es la Naturaleza, cómo se la define, qué es un fenómeno natural. Todo esto habría que dejarlo en el cajón de la Filosofía y no mantenerlo como objeto de nuestra presente discusión. Sin embargo, hay algunos puntos particulares a los que queremos referirnos. Lo que es central comprender es que el hombre para tomar contacto con lo real, para conocerlo, ha diseñado el método científico. Este método que pasa por observar, medir y determinar cantidades físicas deberá desembocar en la teoría correspondiente. Entonces, lo que se conoce desde el punto de vista de la Ciencia de la Naturaleza llamada Física es precisamente el resultado de observaciones. Por supuesto, uno puede repreguntarse cómo concebir una Ciencia de la Naturaleza si la relación es con el hombre y a través del hombre y sus observaciones y medidas de lo real. Este es un viejo problema conceptual que en general los físicos esquivan y se lo dejan a los epistemólogos para que se dediquen a resolverlo o, por lo menos, a discutirlo. Otra pregunta que también suena relevante se refiere al problema de la unidad de saberes sobre la Naturaleza. Es decir, en qué medida los saberes que desentrañan diferentes científicos desde distintos puntos de vista, son unánimes o son únicos. Debido a que la Matemática provee la forma de describir las leyes de la Física, también cabe interrogarse sobre el papel de la Matemática en la Física. ¿Es este esencial, es constitutivo, o está en el ser de la Física? Todas esas son preguntas también de interés para los filósofos. Decimos que lo que generalmente hacen los físicos es no responder a priori todas estas preguntas sino responderlas de a

poco apoyándose sobre la actividad misma en Física, tal como la trabajamos hoy en el laboratorio.

Es importante preguntarse acerca de la objetividad del conocimiento que surge de un estudio científico. La Física opera a partir de observaciones con medidas y en este trabajo usa a la Matemática como herramienta fundamental. También sabemos que el valor de una ley física depende de cuan cerca están sus predicciones del resultado de las medidas, ya que ése es el criterio de validación de la Física. Ahora bien, esas medidas que convalidan los resultados de la Ciencia son concretadas a través de los sentidos. Efectivamente todas ellas terminan en la observación por la vista o el oído o una sensación táctil. Es decir, ¿parece? (y lo ponemos entre signos de interrogación para conectarlo con lo que discutiremos después) que la Física podría crecer sólo sobre la base de sensaciones. Históricamente fue así y por ello existe la Física ligada al ojo que se llama Óptica, la Física del oído que tiene el nombre de Acústica, la Física de las sensaciones térmicas que se conoce como Calor y Termodinámica. Todas ellas son partes de la Física. Están relacionando las diferentes áreas de interés físico con algunas de las peculiaridades del hombre. Daría la impresión de que en la Física hay un carácter antropomorfo que no podemos obviar. Esta conexión no se da solamente con el hombre o sus sensaciones sino también con sus necesidades prácticas. La Geodesia, ligada a la Geometría trata de la ubicación sobre la superficie de la tierra. Las maquinarias dieron lugar a la Mecánica, etc. Parece que se podría concluir (de nuevo con un gran signo de interrogación), que la Física en último análisis, tiene sólo que ver con las percepciones sensoriales, que son las que conducen a las medidas y con las necesidades del hombre. Todo esto está claramente incluido en el contexto del positivismo. Advertamos de inmediato que este punto de vista de la Física fuertemente ligado al hombre, nunca contribuyó a un avance genuino del conocimiento. Más aún, en la Física actual las percepciones sensoriales juegan un papel muy secundario. Por esa razón, los conceptos de la Física contemporánea son más complejos de adquirir, porque

escapan no solamente a las sensaciones del hombre sino a su propia escala. La escala del hombre es la escala del metro (medimos un metro sesenta, un metro ochenta). En el tiempo la escala es el segundo (tiempo entre pulsaciones), o si se quiere el año (vivimos setenta años), etc., etc. Los objetos de análisis de la Física contemporánea están en una escala completamente diferente. O inmensamente grande como lo es el Universo con el conjunto de galaxias que existe evolucionando desde hace 13.700 millones de años o lo inimaginablemente pequeño como son los los átomos o los constituyentes de los núcleos de los átomos. Recordemos que en un centímetro cabrían cien millones de átomos alineados. Es por ello que en la Física contemporánea las percepciones sensoriales juegan un papel definitivamente mucho menor. Tanto es así que ahora en lugar de hablar de tono y color empezamos a hablar del número de vibraciones o de longitud de onda para referirnos a la onda asociada al rojo, al amarillo, o al color que fuere. En lugar de hablar de temperatura como sensación a nivel táctil, estamos hablando de efectos que los cambios de temperatura producen y son observables, como los cambios de volumen que conducen a la idea de termómetro. La conclusión es que el desarrollo contemporáneo de la Física surge cuando conseguimos desprendernos, eliminar tanto como podemos, los elementos antropocéntricos. Sin embargo, volvamos a recordar que los resultados de las medidas son adquiridos en última instancia con nuestros sentidos: al leer un instrumento que nos dice cuánto mide alguna magnitud, cuál es la temperatura, cuánta corriente circula por un circuito eléctrico, etc.

La eliminación de características antropocéntricas va en la dirección de la unidad del conocimiento que provee la Física. Nos referimos a unidad en el sentido de validez para todos los hombres. De esta manera adquiere estructura y éste es el camino necesario hacia la objetivización del conocimiento científico. Este camino nos conduce a entender que si bien no se puede pensar en una Física sin físicos que miden, se trata de eliminar la individualidad de un físico particular. No se trata de la Física del señor Newton, es la Física que

hizo Newton y vale para todos los hombres. Se trata de producir un sistema de Física común a todos los hombres.

Revisamos brevemente el criterio de objetividad, que como decíamos está en la base de la Ciencia. ¿Qué significa independizar el conocimiento que se tiene de la Naturaleza del físico particular que hace la observación? Debemos decir que este análisis le corresponde sin duda a la Filosofía y es interesante comprobar que los científicos no le dan una respuesta única a esta cuestión. Ciertamente se pueden buscar ejemplos de físicos que se ubican globalmente en el subconjunto de lo que llamaríamos la objetividad fuerte. Otro subconjunto pertenece a otra división, que es muy difícil de determinar con precisión pero que podríamos llamar el grupo de la objetividad débil. La gente que pretende la concepción fuerte de la objetividad aboga por el realismo físico independiente totalmente del observador. En otras palabras, se pretende que puedan hacerse enunciados de principios y de leyes que rigen el comportamiento de los sistemas de la Naturaleza sin referencia ni siquiera implícita a la operatoria humana. Esto suena a pretensión un poco vana conectado con lo que comentábamos antes, ya que en definitiva los resultados de la medida van a ser obtenidos a través del sentido de la vista por ejemplo. A partir de aquí surge una posición un poco menos intransigente, por ello llamada objetividad débil. En este contexto, la definición de un dado concepto se refiere a una operación y esa operación va a tener por detrás una actividad humana y por ello comunicable. La objetividad queda definida cuando se producen enunciados válidos para un hombre cualquiera. Este es el camino de hoy, la Física contemporánea está construida sobre la noción de objetividad débil.

Digamos que hoy admitimos sin discusión que la Naturaleza y los fenómenos naturales existían mucho antes de que el homo sapiens se sentara a contemplarlos. Como reflexión final se nos ocurre decir que hay muchos científicos que desearían guardar o mantener a la Ciencia pura de toda Filosofía pero eso parece que es una esperanza vana. En muchas oportunidades dijimos que

no íbamos a entrar en los dominios de la Filosofía aunque vendría a ayudarnos por lo menos en ciertas definiciones, sobre todo en los problemas de la objetividad. Parece haber sido el caso.

Independientemente de la discusión anterior podemos decir que el aporte de la Ciencia al conocimiento es esencial y trascendente. La Ciencia basada en la objetividad (aunque débil en el sentido que hemos discutido) ciertamente permite que los fenómenos adquieran una definición racional, una descripción coherente con vocación de universalidad al independizarla del hombre particular que hace la observación o la teoría científica. Es importante subrayar este punto para darle el sentido correcto a la Ciencia y quitarle eventualmente algún dejo de debilidad que podría haber trascendido. La Ciencia si bien no se arroga la verdad “absoluta” ni pretende dar las respuestas definitivas a las “grandes” preguntas, permite acercarse a ellas asintóticamente. Constituye el conjunto de actividades que separando ámbitos de interés, obtienen resultados que siempre van a tener como fundamentación a la objetividad. La Ciencia funciona bien porque tiene incorporado el mecanismo de corrección de errores. Las Ciencias Naturales tienen límites de validez que definen sus ámbitos de aplicación. La Física establecida por Newton tiene validez a la escala de observación de su época. Luego llega la Física refinada de la Relatividad de Einstein o la de la Mecánica Cuántica de Schrödinger. Pero la Física de Newton no dejó de ser completamente válida. Al hilar un poco más fino se descubrió que ella no alcanzaba para describir ámbitos extremos como son velocidades comparables a la de la luz o tamaños atómicos. Sin embargo, reiteramos que cuando se describen fenómenos que están en la escala de la Física de Newton, la Física de Newton sigue siendo tan válida como lo era en el año 1680. En ese sentido la Física tiene una evolución estructurada. Hay un refinamiento en los conocimientos, no hay sustitución temporal.

La Ciencia hoy sigue, y seguirá, ejemplificando el ideal del conocimiento. Tanto es así que provee también un criterio de prestigio a los productores de bienes y una garantía de seriedad a los consumidores. De modo que la



cientificidad se torna hasta en argumento publicitario.

¿Sirve la Ciencia para el pensamiento como tal? La especificidad del trabajo de la Ciencia provee el control de sus útiles de pensamiento y la determinación de sus condiciones de validez. La estrategia científica enseña a aislar progresivamente ciertos sectores de la realidad y analizarlos cada vez más finamente. El pensamiento científico es tan preciso y articulado como para ofrecer contraejemplos, para servir de banco de prueba para ensayos y para dar testimonios de la fragilidad de conclusiones demasiado generales. En una palabra, actúa de “abogado del diablo”, gana el beneficio de la duda.

El avance científico debe comenzar (y quizá terminar) con imágenes, palabras e ideas, no sólo con números, símbolos y fórmulas, aún en la Física Teórica. El pasaje al lenguaje no debe pensarse como un simple deseo de comunicación. Si bien Galileo decía que el “Gran Libro de la Naturaleza” está escrito en lenguaje matemático, no debe entenderse mal. La narración es necesaria a la comprensión. No vulgarizar pero sí compartir el saber. Hay que decir y escribir la Ciencia. Hay que interpretarla. Es la recreación como en la música y el teatro. La integración de la Ciencia a la cultura está pendiente. Pero cuidado, a la táctica de la vulgarización, entendida como un suavizar las dificultades conceptuales de los avances, se debe preferir una retórica más provocativa poniendo en claro los problemas presentes. Es irónico que mientras la Ciencia intenta proveer una imagen coherente y simple de la Naturaleza, mucha gente encuentra al conocimiento científico inhumano y muy difícil de entender.

En este punto merece la pena incluir una breve reflexión sobre el concepto central de predicción. La Física en particular y las Ciencias Naturales en general son ciencias experimentales donde las predicciones teóricas deben ser validadas por el experimento. La palabra predicción tiene un papel importante a pesar de que su significado no es a priori evidente. Esto se debe a que ese significado cambió en el pasado y probablemente sigue cambiando. Originalmente, digamos para la Mecánica Clásica, la predicción tenía valor sí y

sólo sí daba lugar a un resultado único. En efecto, el estado mecánico de un sistema en un dado instante se puede expresar en términos de un vector posición función del tiempo. Consecuentemente se puede determinar o imponer esa posición y la velocidad correspondiente en un dado tiempo y medir a un tiempo posterior. Esa experiencia puede ser realizada tantas veces como se quiera con las mismas condiciones iniciales. Al cabo de un cierto tiempo fijo, el sistema mecánico clásico estará en todos los casos en el mismo estado final. Utilizando ahora el formalismo que provee la Mecánica Clásica, las ecuaciones de Newton, se puede predecir con exactitud el resultado de la experiencia anterior. Este es un problema matemáticamente bien definido. Claro que las dificultades matemáticas pueden ser sustanciales. Pero en cualquier caso la situación en ese ámbito es tal como para que Laplace (1749-1827) llegara a decir que un matemático infinitamente inteligente sería capaz de predecir exactamente el futuro con sólo observar el estado del Universo y poniendo en juego su conocimiento de las ecuaciones de movimiento de todos sus componentes. Este es el punto de vista clásico-determinista donde la noción de predicción tiene un sentido bien claro. Claro que no existen los matemáticos infinitamente inteligentes ni tampoco disponemos del experimento capaz de medir el estado inicial del Universo con total precisión.

En realidad lo que ocurre es que la aproximación Newton-Laplace puede aplicarse solamente a un conjunto pequeño de problemas. En consecuencia la Física cambió de filosofía e introdujo otro tipo de predicciones, probablemente más débiles, que son las predicciones probabilísticas. Este punto de vista produjo históricamente una revolución. En efecto, sobre esas ideas nació la Mecánica Estadística que permite el estudio de sistemas macroscópicos sobre la base de sus componentes elementales. Por ejemplo el comportamiento de los gases que implican estudiar el movimiento de mucho más de  $10^{20}$  moléculas. En un sistema compuesto de muchísimos cuerpos, (casi) todas las condiciones iniciales para su evolución temporal conducen al mismo comportamiento macroscópico. De modo que medir todo y calcular todo

además de imposible resulta inútil. En efecto, el agua hierve, en condiciones normales, a  $100^{\circ}C$  (casi) siempre. La probabilidad es tan grande como para que esta predicción haya sido verificada durante toda la historia del Universo. Por ello podemos eliminar prácticamente el casi que pusimos entre paréntesis.

Trabajar con predicciones que son intrínsecamente probabilísticas es inherente a la Mecánica Cuántica, la mecánica de la escala atómica, donde la interacción observador-sistema causa cambios incontrolables y detectables en el objeto de estudio. Medir con precisión una magnitud torna ilusorio el conocimiento simultáneo y preciso de otras. Un sistema cuántico, un electrón digamos, asume un estado si se lo deja solo. Pero si se trata de medir su posición, iluminándolo por ejemplo, se destruye su estado cuántico. Ciertamente el electrón estará en algún lado pero ese lugar no es predecible con exactitud sino con cierta probabilidad. La posición bien determinada en definitiva es un concepto clásico. En otras palabras, si se trata de forzar el uso de conceptos clásicos en el átomo, la respuesta que se obtiene es probabilística.

El balance de las consecuencias de esta situación es claramente positivo. Si bien hay un cierto debilitamiento de la predicción, se produjo un gran alargamiento del campo de acción de la Física y sus aplicaciones. En la actualidad y en relación con sistemas de complejidad creciente, venimos utilizando los conceptos probabilísticos en un contexto cada vez mayor.

Se ha discutido y se sigue discutiendo sobre qué es la Ciencia, desde el punto de vista filosófico. Debemos mencionar por ejemplo el libro de Thomas S. Kuhn (1922-1996) “La estructura de las revoluciones científicas”, citado innumerables veces desde los años 60, cuando fue escrito. Allí se introduce y se discute el concepto de paradigma en la Ciencia. La secuencia: crisis, revolución, nuevo paradigma como proceso de desarrollo de la Ciencia. Parecería que ese tipo de análisis es aplicable fundamentalmente a las Ciencias sociales, a las Ciencias donde el hombre es directo actor, donde ya la objetividad se hace más difícil de hallar o delimitar. No es cierto que el paradigma de Newton haya sido sustituido totalmente luego de una crisis y reemplazado por

el paradigma de Einstein. Hay ciertamente una revisión y modificación para aplicar la teoría científica a escalas diferentes. La Teoría de la Relatividad tiene un ámbito de aplicación donde no se pretende que la física de Newton sea válida pero entendemos que cuando describimos nuestro movimiento al caminar o el del reloj de péndulo, no debemos preocuparnos por la Teoría de la Relatividad de Einstein: si el tiempo o la simultaneidad depende del observador. Efectivamente la escala de velocidades en juego no justifica preocuparse por los efectos relativistas. Estos producen una corrección despreciable a esta escala. Lo mismo ocurre con el problema de la indeterminación, inherente a la descripción de los fenómenos a nivel atómico. Al describir el movimiento del reloj de péndulo no nos preocuparemos si podemos definir con total precisión y simultáneamente su posición y su velocidad. Puede ser que se empiece a definir otro paradigma, en los casos mencionados, pero lo que tenemos que decir es que este paradigma no revolucionó por destrucción del anterior, sino que lo completa para ser aplicado en otra escala.

Se podría continuar la discusión de principio acerca de qué es Ciencia o cómo definir a la Ciencia. Los principios levantados por los inductivistas, los racionalistas y los positivistas. Pero probablemente éste no es el problema central para nuestros objetivos. Queremos sí transmitir el funcionamiento de las Ciencias de la Naturaleza y particularmente de la Física, que nos está llevando a entender mejor nuestro entorno en todas sus escalas, desde lo inimaginablemente pequeño a lo increíblemente grande, incluyendo en ese camino a la Biología . Claro que no podemos olvidar que al hablar de fenómenos físicos, tenemos que hacerlo con objetividad. En todos los casos, cuando decimos objetividad recordamos que lo que estudiamos en la Física, las magnitudes físicas como su nombre lo indica, dependen de la medida. Ahora bien, hay situaciones, como en el caso atómico, donde la participación del (de la) observador(a) que mide es fundamental, no puede ser excluida del análisis, no se la puede ignorar. Lo que podemos evitar es referirnos a un(a) hombre(mujer) particular porque lo que debemos asegurar es que lo

que un(a) hombre(mujer) mide, lo puede medir otro(a), otro(a), otro(a), y los resultados dependerán de la presencia activa del(de la) hombre(mujer) pero no de un(a) hombre(mujer): es de todos(as) los(las) hombres(mujeres), de cualquier hombre(mujer). Entendemos entonces que el resultado con valor científico es objetivo porque vale para todos(as) los(las) hombres(mujeres). En las Ciencias Sociales la participación del observador en el fenómeno es evidente porque el que estudia es parte del objeto de estudio. Podemos dar el siguiente ejemplo: cuando estudiamos las interacciones entre cargas eléctricas resulta que cargas de diferente signo se atraen y de igual signo se repelen. Empezamos a estudiar entonces, qué sucede si tenemos un campo eléctrico en un lugar del espacio y colocamos una carga en su presencia, ese campo eléctrico interactúa sobre la carga y tratará de moverla por atracción o repulsión según sea el caso. Pero la carga, como tal, produce su propio campo eléctrico. Entonces nos preguntamos, si es que este campo modifica al que teníamos previamente. Si la carga es suficientemente pequeña y el campo externo es suficientemente grande, entonces podemos minimizar esa retroalimentación tanto como queramos. Por el contrario, en el caso atómico no lo podemos obviar definitivamente y en el caso de las Ciencias humanas no lo podemos obviar para nada.

Finalmente digamos que no debe quedar la falsa imagen de que los resultados científicos son continuamente discutibles y nunca se estabilizan. Si fuese así no existiría la tecnología que está basada obviamente en conceptos científicos bien establecidos. La Ciencia provee una garantía de validez general a las leyes, ya que fueron obtenidas a través de un proceso de objetivización. Si bien hay dependencia del hombre porque es el hombre el que hizo las observaciones y realizó los tests, los resultados adquieren generalidad al independizarse de un hombre en particular. Es por esta razón que los resultados de la Ciencia pasan a ser un patrimonio cultural de la humanidad. Se pretende haber descrito una realidad que es externa al hombre. Los dinosaurios estuvieron sobre la tierra hace 150 millones de años en tanto que el

hombre apareció hace 1 millón y medio. Sin embargo hay evidencias con valor científico de la presencia de aquellos, independientes del hombre. Avanzamos entonces hacia la comprensión científica de la Naturaleza.

## ESPACIO-TIEMPO

El espacio-tiempo constituye el escenario donde ocurren los fenómenos de la Naturaleza. Se trata de la base de toda descripción física.

Hablar hoy del espacio-tiempo, desde el punto de vista científico, nos obliga a tomar como referencia el comienzo del siglo XX que marcó un cambio conceptual revolucionario y fundamental en las ideas que acompañaban al hombre hasta ese momento.

La fecha clave que determina el triunfo de esta revolución conceptual es 1919 cuando Arthur Eddington (1882-1944) se propuso llevar a cabo un experimento para estudiar el cielo durante el eclipse solar que ocurrió el 19 de mayo de ese año. Para ello había conseguido, a pesar de la situación de crisis en Inglaterra y en toda Europa, un apoyo económico de unas mil libras esterlinas para poder realizar la experiencia. Su propuesta era verificar las ideas contenidas en la Teoría General de la Relatividad de Albert Einstein (1879-1955) que había sido presentada en su forma final en 1915. La experiencia consistía en estudiar imágenes del cielo, detrás del sol durante el eclipse, tomando fotografías en dos puntos cercanos al ecuador para aumentar la precisión. Uno de los puntos elegidos fue la isla del Príncipe cerca de la costa occidental africana, y el otro Sobral en Brasil. Cuando finalmente se pudieron estudiar las imágenes, se consiguió confirmar que la Teoría de la Relatividad era correcta. Es decir, la observación experimental coincidía con sus predicciones. Ese hecho constituye un hito fundamental en la evolución de las ideas físicas y filosóficas, ya que a partir de esta observación, la noción de tiempo absoluto que había acompañado a la humanidad por más de cinco mil años, comenzaba a desaparecer, debía desaparecer.

Este preámbulo nos invita a encarar una breve descripción de la Teoría de la Relatividad. Detrás de las ideas de la relatividad está implícito el hecho de que el espacio y el tiempo dejan de ser entidades independientes. Desaparecen como magnitudes físicas individuales para conformar una nueva entidad: el espacio-tiempo. El matemático Hermann Minkowsky (1864-1909), creador de una geometría ligada a los requerimientos de la relatividad en lo referente a



tratar conjuntamente espacio y tiempo escribió en 1909: “a partir de ahora el espacio en sí y el tiempo en sí se hunden por completo en las sombras y sólo algo que es como una unión de ambos conserva una nueva existencia propia”.

La confirmación posterior de la Relatividad se fue desarrollando durante más de 60 años, en los más diversos ámbitos. Su impacto, tanto desde el punto de vista científico como desde el punto de vista filosófico, fue muy rápido. Las ideas de la Relatividad deben ser consideradas como un verdadero cambio trascendente, tal como lo fue la introducción de la perspectiva en el Arte o como lo fue el descubrimiento del nuevo mundo con la verificación de que la Tierra no era plana. Con la comprobación de la Relatividad, lo que cae, tal como lo decía Einstein, es la idea de movimiento absoluto, y por supuesto del tiempo absoluto, porque son erróneas, no están de acuerdo con el experimento.

Para comprender estas ideas no basta con relatar solamente el devenir histórico de los episodios en torno de la verificación de la Teoría de la Relatividad. Debemos discutir el concepto mismo de espacio-tiempo. Para esto tenemos que rastrear, inevitablemente, en las imágenes más básicas que cada uno tiene acerca del espacio y del tiempo. Antes de entrar en la discusión del concepto científico del espacio-tiempo, es necesario sin duda preguntarse por la manera en que tenemos incorporadas estas ideas. Es decir, cuál es el mecanismo para su objetivación y cómo pueden ser contrastadas esas ideas frente a hechos experimentales.

La idea del espacio-tiempo tenemos que ir a buscarla en las relaciones de ubicación y de secuencia que están presentes casi permanentemente en nuestro pensamiento. Nuestra percepción del mundo externo, a través de nuestros sentidos, es lo que nos permite conformar las ideas, abstraer y generar los primeros elementos conceptuales. Posteriormente, una vez que éstos se adquieren, la mente en un proceso de concatenación lógica es capaz de generar ideas más complejas. Cuando se hace un análisis interno de los conceptos, puede fácilmente verificarse que cuanto más universal es un con-

cepto, más frecuentemente aparece un nuestro pensamiento. Y cuanto más indirecta es su relación con la experiencia, es decir cuanto más elaborado es el concepto, más difícil es comprender su significado. Se tienen ciertos conceptos elementales con los cuales se elaboran conceptos complejos y esta estructura es absolutamente similar a la que se usa en el análisis científico de un dado problema. Estudiar el espacio y el tiempo desde el punto de vista científico implica explicar, comprender y universalizar los fenómenos conectados al espacio-tiempo que cada uno tiene internalizado. En este sentido, la estructura lógica que va a seguir la Ciencia tiene que responder y apoyarse en las que cada uno adquiere en forma elemental para luego universalizarlas. Este proceso es particularmente cierto en relación con las ideas del dónde, el cuándo, el por qué.

Vamos a comenzar por discutir la idea de espacio. Es decir, el concepto que está en la base del dónde. Si se trata de buscar entre las experiencias sensoriales primarias alguna que nos ligue a la idea de espacio, nos convencemos que realmente no existe. Cuando hablamos de espacio, nos referimos a la relación más directa vinculada con el orden de los objetos que nos rodean y con los cuales tomamos contacto directo de manera visual o de manera táctil. El espacio se entiende entonces como un lugar en el cual podemos ordenar los objetos. Resulta claro que para hablar de espacio se necesita primero incorporar y aceptar la idea de objeto material, que es un concepto previo. Esto se puede entender fácilmente si se intenta precisar la idea o el significado de cerca, de juntos o de al lado de. En efecto, la forma de hacerlo es recurrir a los objetos. En la búsqueda de comprender qué es el espacio y cuáles son las leyes que están presentes en su estructura, la idea de cuerpos materiales es el elemento básico. Las leyes que rigen las relaciones posibles entre cuerpos materiales, es lo que nos va a enseñar cuál es la estructura del espacio. Estas ideas constituyen precisamente la “Ciencia” que el hombre fundó 400 años antes de Cristo, y que llamó Geometría. Recordemos que Geometría, etimológicamente significa medida de la tierra y tiene precisamente

a la estructura del espacio mismo como objeto de estudio. En realidad, la preocupación de entender a la Geometría en relación a los objetos, es decir pensarla como una Ciencia experimental, no siempre estuvo presente. La Geometría nació con la preocupación de explicar cuál es la estructura del espacio, dar leyes, introducir la idea de punto, de plano, de recta y determinar qué relaciones hay entre estas entidades. Luego, esta disciplina se despegó del análisis experimental para constituirse en una Ciencia lógica. Como vamos a discutir inmediatamente, el precio que pagó por despegarse de la experiencia y no responder a las observaciones, es que durante 2000 años evolucionó en una dirección que poco tenía que ver con la realidad que quería describir.

La idea primaria de espacio que se puede tener, siempre en relación a los objetos materiales, es que se trata de aquello que está entre los cuerpos y que llena el lugar entre ellos. Es decir, entendemos por espacio lo que se encuentra entre los cuerpos o más allá de los cuerpos. Esa es la imagen que se tiene internalizada a nivel más o menos intuitivo o primario. Es lo que llamaríamos el concepto pre-científico del espacio y tendemos a darle valor de existencia real. De esta manera muy directa comenzamos a admitir que el espacio tiene existencia de igual calidad a la de los objetos. A pesar de que al espacio no se lo puede percibir en una experiencia directa, como comentamos antes, se tiende a darle existencia propia, una existencia independiente. Desde aquí en más entonces todos los razonamientos se pueden hacer a partir de concebir al espacio como el hueco que llena aquello que resta entre los objetos. Admitimos que los razonamientos y las imágenes que podemos construir de este espacio son afirmaciones verdaderas, lo cual no es evidente. Le damos contenido objetivo, como si existiese realmente. A partir de este a priori del espacio que tenemos construido en la esfera del pensamiento, surgen las entidades de punto, recta y plano.

Mencionamos de inmediato que la idea de punto no es trivial. La idea de punto lleva a admitir que uno es capaz de referirse a un lugar en el espacio que no ocupa espacio. La idea de recta en cuanto una asociación de puntos

que se extiende indefinidamente, tampoco es trivial ya que incluye la noción de indefinido o infinito. Lo mismo vale, por supuesto, para el concepto de plano. Estas ideas no son para nada intuitivas en cuanto a su posibilidad de ligarlas a la experiencia cotidiana. Son ideas que se van conformando sobre la base del concepto pre-científico que tenemos del espacio. La sensación de que el espacio pensado es el espacio real que ya tenemos incorporado, tiene dadas sus propiedades en el marco de la teoría de la Geometría de Euclides (de Alejandría) (325 a.c.- 265 a.c.). Esta teoría permitió conformar afirmaciones que, consideradas verdaderas, reinaron hasta más o menos el siglo XVIII cuando aparecen cuestionamientos, dando lugar a las llamadas Geometrías No Euclidianas. Entra en crisis una idea del espacio que había permanecido vigente por más de 2000 años. La Geometría de Euclides pretendía, como todas las geometrías, dar o identificar las reglas que definen la estructura del espacio donde nos movemos, donde vivimos, donde residen los objetos. Los cinco axiomas sobre los cuales Euclides basó su geometría son:

- 1 - Por dos puntos se puede trazar una recta.
- 2 - Un segmento puede prolongarse al infinito.
- 3 - Un punto y una distancia determinan un círculo.
- 4 - Todos los ángulos rectos son iguales.
- 5 - Por un punto exterior a una recta se puede trazar una y sólo una paralela.

Los primeros postulados son más o menos evidentes. Un axioma que finalmente estará en la base de una teoría tiene que tener evidencia experimental, un sostén que sea aceptado fácilmente por cualquier persona que pretenda analizar el mismo problema. Vale comentar que el último axioma de la geometría de Euclides, el quinto, no fue escrito de la manera expresada arriba. Esta versión modifica y adapta mejor la idea subyacente a los

análisis axiomáticos que propuso Proclus Diadochus (411-485). En realidad, este axioma indujo a la geometría a seguir un camino demasiado estrecho. Lo interesante es que el quinto axioma ni siquiera lo convencía al propio Euclides. Tanto es así que las primeras 28 proposiciones que concluye a partir de los axiomas, no hacen uso del quinto. En realidad, el problema del quinto axioma es el problema de las paralelas. La idea tradicional de las paralelas nos indica que dos rectas paralelas sólo se cortan en el infinito. De modo que la idea de paralelas está mezclada con la idea de infinito y esto, desde el punto de vista experimental no es una cuestión que se pueda verificar. El resto de los axiomas es fácilmente comprensible y se podrían imaginar mecanismos experimentales simples que los confirmen. Volviendo al quinto axioma, podemos decir que a lo largo de la historia hubo muchas discusiones sobre su validez. El primer paso adelante importante ocurre recién alrededor de 1700 cuando Giovanni Saccheri (1667-1733) trató de probar el postulado por el método del absurdo y consiguió abrir un camino para el análisis más profundo. Posteriormente Johann Carl F. Gauss (1777-1855) en 1792, cuando tenía sólo 15 años, trabajó mucho en el problema. Sus resultados, aunque no definitivos, se conectan con algunos posteriores de János Bolyai (1802-1860). Este matemático, en 1823, llegó a decir: “he descubierto cosas tan maravillosas que estoy asombrado, he creado un extraño nuevo mundo, veo a Gauss, este joven geómetra, como un genio de primer orden”. Estos avances, junto a los producidos por Nikolai Lobachevsky (1792-1856) en 1829, condujeron al enunciado alternativo del postulado:

- 5 - Por un punto exterior a una recta existen al menos dos paralelas.

y así nace la Geometría Hiperbólica. Posteriormente G.F. Bernhard Riemann (1826-1866) en 1854 reformula totalmente la Geometría al introducir el concepto de curvatura y discutir en detalle lo que se llama Geometría Esférica. Como su nombre lo indica, esta Geometría está definida sobre una esfera, donde no existen las paralelas. Podemos resumir la situación recordando que en la Geometría Euclídea, los ángulos interiores de un triángulo suman 180

grados y por un punto exterior a una recta pasa una única paralela. En la Hiperbólica la suma es menor a 180 grados y por un punto exterior pasan infinitas paralelas a una dada. Finalmente en la Geometría Esférica la suma es mayor a 180 grados y no existen las paralelas.

Volvemos a la discusión del espacio como hueco entre los objetos. Pensando por ejemplo que la recta es la menor distancia entre puntos, nos podemos preguntar qué significa medir la distancia entre puntos. Si el espacio se entiende como el hueco que hay entre los objetos, ese hueco se podría llenar, en principio, colocando por ejemplo cuerpos estándar (cubos). Es decir, tenemos los dos objetos y hay algo que queda libre entre ellos que podemos llenar con una sucesión de cubos. Si contamos cuántos cubos colocamos, ese número nos dará una medida de la distancia que los separa. Entonces si conseguimos colocar la menor cantidad de cubos posible, tendremos la distancia mínima. Este proceso va a conformar el comienzo de la idea de una recta ya que la estructura después puede prolongarse agregando cubos en una u otra dirección. La pregunta inmediata es si ese espacio será euclídeo. A pesar de que la Geometría Euclídea todavía se utiliza y se va a seguir utilizando, no es la buena geometría. Tampoco lo va a ser ni la geometría esférica ni la hiperbólica. Se encuentra que la buena geometría es una más compleja que tiene que ver con la relatividad. Lo que ocurre es que el apartamiento de la Geometría de Euclides de la Geometría Real es ciertamente muy pequeño. Cuando comparamos la Geometría Real, que es la que encontramos como Geometría de la Física, con la Geometría de Euclides, vemos que son prácticamente indistinguibles a la escala en que nosotros nos movemos. Entonces podemos seguir operando con la Geometría Euclídea aunque debemos cambiar filosóficamente porque debemos convencernos de que la Geometría de Euclides no es nada más que una aproximación a la descripción correcta. Es una simplificación de la realidad.

El mecanismo de conformación de la idea de espacio que acabamos de esbozar, es similar al que se pone en marcha cuando nos referimos al tiempo,

el cuando. La idea de tiempo tiene que ver con un orden sucesivo, con una secuencia. Nuestras experiencias están ordenadas una luego de la otra. Este orden secuencial es la idea más elemental de tiempo. Es decir, si realizamos una experiencia en un determinado momento como puede ser el análisis de un movimiento o alguna percepción, se está experimentando lo que es el ahora, en este instante. Digamos que se está tomando contacto con el mundo externo, con los objetos, en un dado instante. Pero, a partir de la memoria, se pueden recordar experiencias anteriores y armar de esa manera una secuencia donde hay experiencias previas, está el presente y habrá experiencias posteriores. Estas marcas finalmente pueden ser integradas en una secuencia. El ahora es el ahora y el futuro todavía no lo experimentamos pero una vez que juntamos con nuestra memoria de experiencias anteriores, podemos referirnos a lo anterior y en el pasado identificar un ahora, entre comillas, que tuvo experiencias anteriores y experiencias posteriores y construir de esa manera una secuencia temporal. Esa serie de sucesos está rotulada, tiene hitos, eventos de referencia, y entre esos eventos hay lapsos vacíos de los que nosotros tomamos conciencia y que nos fabrican la noción que tenemos del tiempo como un transcurrir. La sucesión de que hablamos se refiere a acontecimientos públicos que pueden ser presenciados por todos y en los que todos participamos o podemos participar. Siempre se puede hablar por oposición, de un tiempo privado o tiempo propio de cada individuo. Sin embargo, nos estamos refiriendo al tiempo que imponen las leyes de la Naturaleza, que es en principio una forma impersonal de evolución implacable, determinista, exacta y que conlleva a la irreversibilidad. Esta es la base de lo que podríamos llamar serie temporal que es a su vez la base de la idea de tiempo. Se percibe como si el tiempo fuese un continuo que fluye ordenando esta secuencia de experiencias o toda las secuencias de experiencias. Además tiene carácter unidimensional y de alguna manera es la variable que ordena el cambio. Para medir el tiempo se hace lo mismo que se hizo con el espacio. Con el espacio, tomamos dos objetos y llenamos el hueco entre ellos con los

cubos que constituyeron una unidad de distancia. Con el tiempo repetimos la construcción y podemos imaginar un experimento como por ejemplo golpear rítmicamente la mano y formar de ese modo una serie temporal. Alguno de esos elementos servirá para identificar una unidad temporal. En realidad, luego se aprende a hacerlo de una manera más compleja y más inteligente. Se buscó una correspondencia entre nuestras experiencias y algún mecanismo objetivo que siga la misma secuencia como por ejemplo el movimiento de un péndulo. Concretamos una relación entre nuestra secuencia temporal y la de un objeto que está batiendo como es el péndulo. Entonces, el objeto sigue una secuencia temporal similar a la que internamente tenemos y podemos decir que se dispone de esta relación como mecanismo para medir el tiempo. Galileo cuando hacía sus experimentos necesitaba medir el tiempo para describir las leyes de caída de los cuerpos y lo hacía con su propio pulso, ese era su reloj. No existía una forma de medir con cierta precisión tiempos cortos. Recién es Christiaan Huygens (1629-1695) el que introduce el péndulo como aparato para la medida del tiempo. Se genera la posibilidad de análisis de los fenómenos experimentales que se suceden en el tiempo.

Pasamos ahora a recorrer los conceptos de la Teoría de la Relatividad a partir del análisis de qué entendemos por relatividad en relación con las ideas de referencia. Cuando decimos que algo está situado a la derecha o a la izquierda, no transmitimos información ya que la respuesta es un concepto relativo a nuestra ubicación. La misma situación se presenta con la condición de arriba y abajo. Es un concepto relativo. En este último caso debemos recordar que antes de Colón, no había dudas al respecto ya que la Tierra era considerada plana. Más aún, preguntar dónde se encuentra un objeto y no decir nada más carece de sentido. Es imprescindible en todos los casos agregar la información respecto de. También podemos preguntarnos si el movimiento entendido como cambio de posición cuando transcurre el tiempo, es un concepto absoluto. Es nuevamente una pregunta sin respuesta porque está mal formulada. Más aún, no podemos siquiera asegurar sin más



que una trayectoria es cerrada o abierta. También nos podríamos preguntar si es posible hablar de reposo. Estamos conscientes de que la aplicación de fuerzas en general causa movimiento (en realidad cambios del estado de movimiento). Supongamos entonces que sobre un cuerpo no actúan fuerzas. Será que es posible observarlo en reposo, en lo que llamaríamos el laboratorio en reposo. En general, las propiedades del movimiento observadas en otro laboratorio que se mueve respecto del original, difieren del reposo. Sin embargo, si el movimiento de un laboratorio respecto de otro es uniforme (con velocidad constante) allí ocurrirá lo mismo que si estuviera en reposo. La idea intuitiva que tenemos del reposo parece perderse definitivamente. Esta es una propiedad asombrosa de los laboratorios que se mueven unos respecto de otros con movimiento rectilíneo y uniforme. Cada miembro de este conjunto de laboratorios o sistemas de referencia se llama sistema inercial. Su importancia reside en el hecho que ellos no influyen en la conducta física de los cuerpos en movimiento. En ellos las leyes del movimiento toman la forma más simple. Hace su aparición una de las más importantes leyes de la Naturaleza. Es el Principio de Relatividad del Movimiento: El movimiento descrito en cualquier sistema inercial está regido por las mismas leyes.

La discusión de espacio y de tiempo cambia cuando se incorpora el análisis del movimiento de los cuerpos. Al estudiar el movimiento se toma al espacio como base de descripción, pues los cuerpos al moverse cambian de posición en ese espacio y lo hacen durante el transcurso del tiempo. Aparece entonces la idea clara de espacio y de tiempo, dando lugar al escenario donde ocurren estos procesos de cambio. Cuando se describen estas experiencias, se lo hace a partir de la idea de espacio y de tiempo heredada de la cultura griega: un espacio plano tal como se conocía desde Euclides. En ese espacio se ubican los objetos y se los acompaña de un reloj que marca el tiempo definiendo una secuencia absoluta común a cualquiera de los observadores posibles. Con esos elementos se describen los movimientos de los cuerpos. Así, primero Galileo Galilei (1564-1642) y luego Isaac Newton (1643-1727) establecen las leyes

físicas de la Mecánica. De esas leyes queremos recordar la de aditividad de las velocidades. Esta enseña cómo se suman las velocidades de móviles que se mueven a su vez respecto de otros móviles. Recordamos el caso del bote que recorre un río mientras el pasajero camina sobre el bote. La persona que observa desde la orilla va a percibir que el pasajero del bote se está moviendo con una velocidad que es la suma de la velocidad del bote respecto de la orilla más la velocidad con que aquél se desplaza sobre el bote. Esto es evidente pues la distancia total recorrida por el pasajero vista por el observador desde tierra, es la suma de la distancia que recorrió el bote más la que el pasajero caminó sobre el bote, todo ello en el mismo lapso de tiempo. Pero cuidado, esta conclusión surge de presuponer que el tiempo que transcurre para el hombre que está en el bote es exactamente el mismo que el del observador en tierra. Es decir, que hay un tiempo absoluto y que rige la evolución en el Universo para todos. Esta idea sobrevivió hasta fines del siglo XIX, cuando aparece un conflicto en el estudio del comportamiento de la luz.

Tradicionalmente la luz era considerada como un fenómeno de propagación instantánea. Recién alrededor de 1700 los científicos se dieron cuenta de que un rayo luminoso tardaba un cierto tiempo en llegar de la fuente al objeto iluminado. Comenzó entonces la preocupación por describir con mayor precisión el fenómeno luminoso y determinar cómo está constituida la luz, sobre qué medio se mueve, qué características tiene, etc. A fin de encontrar respuestas a estos interrogantes se realizaron una serie de experimentos. Uno de ellos, de Albert Michelson (1852-1931) y Edward Morley (1838-1923), de fines del siglo XIX, indagaba acerca del soporte sobre el cual la luz se movía. Buscaba caracterizar el llamado éter. El resultado fue sorprendente, la luz se movía con la misma velocidad en cualquier sistema de referencia inercial. A diferencia de lo que pasa cuando un hombre camina en un bote, donde su velocidad cambia si se la mide desde el bote o desde la orilla. Para el que observa en el bote o para el que observa en tierra, la velocidad es ciertamente diferente. A la luz no le ocurre esto. El resultado experimental fue que su ve-

locidad de propagación es la misma, cualquiera sea el sistema de referencia o el estado de movimiento de la fuente. Esta fue precisamente la conclusión de los experimentos. El análisis teórico de los resultados de Michelson y Morley realizado por Albert Einstein (1879-1955) en 1905 le permitió interpretar a esa experiencia como una demostración de que la velocidad de la luz es constante, independientemente del observador. La consecuencia inmediata de esta propiedad es la no existencia del éter. De existir este éter, el movimiento relativo de los observadores respecto del mismo cambiaría la velocidad resultante de la luz. Debido a esta propiedad de la luz, las leyes de movimiento y de la Física en general, deben ser modificadas. Ellas son diferentes a las expresadas por las leyes de Newton. Ya no se puede mantener que las velocidades se suman simplemente y como consecuencia trascendente surge la ley fundamental: el tiempo no es absoluto. En efecto, un tiempo absoluto, igual para todo observador, no es compatible con la constancia de la velocidad de la luz. Pero atención, debemos percibir que la constancia de la velocidad de la luz es un hecho experimental, un hecho que se observa, en tanto que la idea errónea de tiempo absoluto era una imaginación, una creencia, un preconcepto. Esa es la diferencia fundamental que emana del uso del método científico. A partir de Einstein se desarrolla entonces una nueva concepción del tiempo que inevitablemente se mezcla con el espacio pues depende de cómo se mueva el observador.

La construcción de la Teoría de la Relatividad (Restringida o Especial) que se refiere a lo que ocurre entre sistemas inerciales surge de postular la universalidad de las leyes físicas.

Al ser la velocidad de la luz constante e independiente del observador, entonces una de las nociones que se debe revisar es la simultaneidad. La observación de dos eventos que ocurren simultáneamente, como por ejemplo la llegada al unísono de dos objetos en caída libre a la tierra, es válida para un dado observador. Seguramente habrá otro observador, en movimiento relativo respecto del anterior, que detectará que uno de los objetos llega a tierra

después que el otro. No verá la llegada simultánea pues esta simultaneidad es relativa al observador: no es universal porque no hay un tiempo absoluto. La experiencia es muy simple: imaginemos un vagón (muy) largo donde exactamente en el punto medio hay una fuente de luz que se enciende y emite rayos en todas direcciones, especialmente hacia la parte trasera y delantera del vagón. Como hemos entendido a partir de Einstein, la velocidad de la luz es la misma si se dirige hacia la parte de adelante o hacia la de atrás del vagón. Debido a que la fuente está ubicada justamente en el medio del vagón, va a tardar lo mismo en llegar a los dos extremos. Cuando la luz llega supongamos que excita un sensor fotoeléctrico que, por ejemplo, abre las puertas del vagón. Entonces un observador que se encuentra parado en el medio del vagón va a ver que las dos puertas se abren simultáneamente. Sin embargo, otro observador, esta vez ubicado sobre tierra, fuera del vagón, verá sin duda que se enciende la luz y ésta empieza a viajar hacia atrás y adelante con la misma velocidad; pero como el tren se mueve, la luz llegará antes a la puerta trasera ya que deberá recorrer menor distancia a la misma velocidad. Por ello el observador externo detectará que la puerta del frente se abre después que la trasera y no de manera simultánea.

## **ELEMENTALIDAD**

Con una licencia poética vamos a recurrir a una “lupa metafísica” para observar cada vez más profundamente dentro de la materia, cada vez a distancias más pequeñas, para entender así la evolución del concepto de elementalidad. Posteriormente discutiremos los mecanismos físicos de los que disponemos para efectivamente “ver” la constitución íntima de la materia.

La materia se manifiesta cotidianamente bajo diferentes realizaciones, diferentes calidades, diferentes formas, diferentes tamaños. Cuán monótono sería nuestro entorno en el caso contrario... Sin embargo, si realizamos un análisis más detallado del mundo material que nos rodea, encontramos la presencia de cualidades recurrentes. La caracterización de esas cualidades es fuertemente dependiente de la profundidad a que hemos llegado en nuestra observación, es decir, hasta qué mínimas dimensiones hemos conseguido explorar el interior de la materia. Este es el origen de la “idea” (hasta en el sentido platónico) de “partícula elemental”. Idea en evolución. Cada vez que consigamos explorar dimensiones menores en el interior de la materia estamos evolucionado en nuestro camino hacia la elementalidad, esperando obtener así una comprensión mayor de lo primordial. Decimos entonces que adquiere la condición de elemental aquella parte sustancial que subyace a toda la materia. Estos objetos elementales dependerán de cuán potente es esa lupa metafísica con la que estamos “observando”. Entonces, si las vacas, los hombres o las sillas son observadas con esa lupa cada vez más poderosa, encontraremos una estructura común a todos esos entes u objetos y en general a toda la materia, una estructura recurrente. Ya a escalas microscópicas, inicialmente se hablará en términos de moléculas pero luego aparecerán otras unidades más elementales. Se trata precisamente de los elementos químicos que son identificables con los átomos.

Traigamos ahora algunos recuerdos de esta “idea” de partícula elemental. Estamos culturalmente compelidos a mencionar a Leucipo y Demócrito y la idea de átomos indivisibles constituyendo la cualidad última de la materia. Además estaba Anaxágoras, quien entendía que las últimas instancias eran

semillas infinitamente divisibles en semillas. Queremos recordar también a Epicuro que hablaba de partes mínimas confinadas” permanentemente. Esta es una terminología absolutamente contemporánea, ya que el confinamiento es una propiedad característica de varias de las partículas elementales de hoy. Recordemos también a Anaximandro, Pitágoras y Platón, entre otros, cuya preocupación era expresar lo subyacente a toda la materia en términos de números y simetrías. Aquí nuevamente se toma contacto estrecho con lo contemporáneo ya que hoy entendemos a las interacciones entre las partículas elementales sobre la base de consideraciones de simetría. También mencionamos a Newton, quien se refería a la idea de elemental hablando de dureza incomparable, posiblemente para indicar indestructibilidad o imposibilidad de división posterior. La preocupación de los pensadores mencionados se ha repetido y se repite continuamente, pero dejamos en ellos el resumen de los recuerdos.

Desde un punto de vista más formal, ¿qué imaginamos cuando hablamos de partícula? Si nos referimos a la noción clásica (cotidiana), entendemos a una partícula como un ente cuyas dimensiones son despreciables frente al resto de las dimensiones en juego en el problema, un objeto “físicamente” puntual que puede caracterizarse dando su posición y su velocidad simultáneamente. De esta manera se puede predecir, vía la mecánica clásica, su posición y velocidad en un instante posterior. Así, la partícula clásica es individualizable y puede ser seguida en su trayectoria espacio-temporal. Esta es la imagen que nuestros prejuicios cotidianos nos imponen frente a la enunciación: partícula. Es el prejuicio clásico.

Sin embargo, cuando llegamos al mundo cuántico, al mundo de los átomos y moléculas, nos encontramos con el dilema de precisar, en función de nuestro lenguaje de diseño macroscópico, qué son los objetos cuánticos básicos. Como veremos, el principio de incerteza de Heisenberg (1901-1976) enseña que posición y velocidad de un objeto cuántico no pueden conocerse exactamente en forma simultánea. Por ello debemos lidiar con objetos que se

comportan a veces como un ente confinado tal como una partícula y a veces como una onda desparramada en una gran región del espacio. La descripción dinámica de ellos implica la teoría ondulatoria de Schrödinger. Recordemos aquí el habitual discurso de la dualidad onda-partícula que sólo expresa nuestro condicionamiento a un prejuicio: ¿esos objetos son ondas o son partículas? La respuesta es: no son ondas ni son partículas. Deberíamos eliminar el prejuicio e introducir un nuevo concepto: la “partinda” o la “ondícula”, nombres de pronunciación desagradable y que en cierta forma aún contienen el prejuicio original.

Lo cotidiano es tan marcante en nuestra conceptualización como para que, en el lenguaje del conocimiento científico, hayamos elegido vivir desprejuiciadamente con el prejuicio de retener la terminología partícula para los objetos cuánticos básicos. Robamos así a la Física clásica la palabra partícula, sabiendo lo diferente de su significado cuántico y la mantenemos para referirnos a los átomos y luego para las partes de los átomos: electrones y núcleos. Fuimos aún más lejos (más profundo) y mantuvimos esa palabra (o esa idea) para hablar de los componentes de los núcleos atómicos: los protones y neutrones. Pero debemos percibir que no sólo .evolucionamos con la idea de “partícula elemental” al ir del mundo clásico al mundo cuántico sino que en este último ámbito nos sumergimos a distancias cada vez menores y ya estamos en el nivel de elementalidad de electrones y nucleones (partículas nucleares).

A partir de los átomos se construye la tabla periódica de los elementos, la tabla de Dimitriy Mendeleev (1834-1907) que nos indica que con un centenar de objetos, de entidades “elementales” a esa escala, los átomos, podemos entender toda la materia en el Universo. No solamente la Geología, lo que ocurre en la tierra, sino también lo que ocurre en la luna, en las estrellas, en las galaxias, etc. Ahora bien, esos átomos que tomaron su nombre semánticamente de la idea de indivisibilidad de Demócrito, y de Leucipo, sabemos en la actualidad, a partir de experimentos, que no son entes indivisibles, sino



que poseen constituyentes. Tenemos entonces un problema lingüístico a pesar del cual podemos mantener la palabra átomo pro teniendo conciencia, recordando que esos átomos tienen partes a pesar del significado intrínseco de la palabra. Ellos están estructurados en términos de un núcleo central muchísimo más pequeño que el tamaño del átomo y un conjunto de electrones en su entorno. Por eso decimos que la materia, a pesar de que parece continua para nuestras sensaciones inmediatas, a nivel microscópico está realmente casi vacía. Todos los núcleos de los átomos de nuestro cuerpo se podrían ubicar, si hipotéticamente fuera posible colocarlos a todos en contacto, dentro de un cubo de 0,004 cm (cuatro milésimas de centímetro!) de arista. Cada átomo tiene un núcleo de tamaño muy pequeño, cuatro o cinco órdenes de magnitud menor que el tamaño del átomo, donde está concentrada su masa, rodeado por electrones que garantizan que cada átomo sea eléctricamente neutro. Efectivamente, los electrones tienen carga eléctrica negativa y los protones, que son parte del núcleo, tienen carga positiva. De modo que el átomo, que posee igual cantidad de electrones que de protones, es eléctricamente neutro. Por esta razón, la materia es estable. Si no fuera neutra, empezaría a despedazarse porque los átomos reaccionarían mucho con cualquier campo eléctrico y/o magnético que hubiese en su entorno.

Los electrones, dos mil veces menores en masa que el núcleo más elemental (el del átomo de hidrógeno) son los que definen las propiedades químicas de los átomos.

El núcleo atómico a su vez posee estructura. Es decir, es un objeto compuesto de constituyentes aún más elementales que se llaman genéricamente nucleones. Estos nucleones son por un lado los protones, que poseen carga eléctrica positiva y los neutrones. Estos últimos deben su nombre al hecho de ser eléctricamente neutros, ya que no poseen carga eléctrica. Los neutrones aseguran la estabilidad del núcleo atómico al proveer fuerzas atractivas de cohesión que contrarrestan la repulsión eléctrica entre protones. En efecto, los protones que tienen carga positiva se repelen por interacción eléctrica ya que

poseen cargas de igual signo, y entonces hay necesidad de poner en juego otra interacción para mantenerlos unidos. La Naturaleza dispone de las fuerzas nucleares que son mucho más fuertes que las eléctricas, aunque de mucho menor alcance, pero no son suficientes para definir un núcleo si sólo hubiese protones presentes. Por ello los núcleos cuentan con otras partículas, los neutrones, que sólo participan de las fuerzas atractivas nucleares y contribuyen a estabilizar los núcleos. Por ejemplo, el uranio, que es uno de los elementos más pesados, tiene 92 protones, propiedad que da origen al número 92 que el uranio ocupa en la tabla periódica de los elementos (Tabla de Mendeleev). Sin embargo se presentan diferentes calidades de uranio, diferentes isótopos como se los llama, dependiendo ahora del número de neutrones del núcleo respectivo. Existen así por ejemplo el uranio 238 y el uranio 235. La diferencia entre 238 o 235 y 92 es precisamente el número de neutrones que posee cada isótopo de uranio, para conformar un núcleo más estable en el primer caso y menos estable en el segundo.

Disminuyendo las distancias de observación en el interior de la materia, gracias a que disponemos de “lupas” cada vez más potentes, es decir de mayores energías para observar, aprendimos que en los núcleos hay partículas componentes: protones y neutrones. Recientemente, hace unos treinta años, aprendimos que estos protones y neutrones, que como dijimos llamamos genéricamente nucleones, tienen a su vez componentes. Podemos “mirar” adentro de cada una de las partículas que constituyen el núcleo y ver que a su vez están compuestas de otros objetos aún más elementales, también muy densamente empaquetados y que son llamados quarks.

A partir del desarrollo teórico y del análisis experimental surgió también el concepto de antipartícula. De nuevo un abuso de lenguaje para referirnos a la necesidad, impuesta por los requerimientos simultáneos de la Teoría de la Relatividad y la Mecánica Cuántica que en la Naturaleza estén presentes entes completamente similares a las partículas, con casi todas sus características idénticas a excepción de algunos rótulos (números cuánticos en la

jerga) como la carga eléctrica, el número bariónico o el número leptónico según corresponda, etc. En relación con el electrón, existe el antielectrón, o positrón, que es idéntico al electrón excepto por poseer carga eléctrica positiva y número leptónico (otro rótulo que lo caracteriza) opuesto. En relación con el protón, aparece el antiprotón con carga negativa y número bariónico (otro rótulo) opuesto, etc.

Recordemos entonces cómo hemos ido de la materia macroscópica a sus constituyentes últimos en el sentido de nuestro conocimiento de hoy. Inicialmente llegamos a las moléculas, luego a los átomos y dentro de los átomos a los electrones y los núcleos. Estos últimos, a su vez, se presentan como una colección de protones y neutrones y cada protón y cada neutrón tienen también estructura ya que poseen en su interior partes llamadas quarks. En los nucleones, además de los quarks existen otras partículas, los gluones, que proveen la fuerza que mantiene esos quarks unidos para constituir los nucleones. Este es el nivel de elementalidad al que hemos llegado hoy. El rótulo calificativo de partículas elementales hoy lo detentan, por un lado los electrones que están alrededor de los núcleos para formar los átomos, conectados por fotones, y por otro las partículas que hay dentro de los nucleones que forman los núcleos: los quarks y los mediadores de la interacción entre ellos y que los cohesionan, que se llaman gluones.

Nos podríamos preguntar si hemos llegado al final del camino hacia el interior de la materia, desarmando esta especie de muñeca rusa o si ese proceso va a seguir. No disponemos hoy de ninguna indicación experimental que autorice a decir que vimos la última capa o que por el contrario vamos a ver una siguiente.

Concluimos entonces que la Física ha permitido evolucionar con el concepto de elementalidad y sabemos que los quarks y los electrones son hoy los constituyentes últimos de la materia.

Esta discusión va a continuar en el futuro porque vamos a estudiar cómo se llega a esta información, cuántos tipos de quarks existen, cómo se unen,

cómo son sus interacciones, cómo mutan unos en otros.

Es importante señalar que los componentes de los nucleones: los quarks y los gluones considerados como “partículas elementales”, precisan para su conceptualización de un nuevo desprendimiento de prejuicios. Efectivamente, debemos dejar de lado la presunción de que una partícula es aislable y se manifiesta (si tiene carga eléctrica) en una experiencia del tipo de Millikan. Hace falta introducir el concepto de confinamiento (recordemos a Epicuro) para explicar la propiedad de los quarks y gluones de no poder dejar de formar parte de un protón o de un neutrón. Es decir, a este nivel de elementalidad existen esas nuevas fuerzas transmitidas por los gluones, que no permiten la separación de los constituyentes nucleónicos a distancias macroscópicas. En otras palabras, los quarks no se pueden liberar, al menos bajo las condiciones experimentales actuales (podrían, a lo mejor, ser llamados calipsones). La situación nucleón-constituyentes confinados es en algún sentido similar a la de un imán-polos norte y sur: si dividimos un imán obtenemos dos imanes.

Analícemos la colección completa de partículas elementales de hoy. Comenzamos por los fermiones que son los ladrillos básicos propiamente dichos. Con ellos y poniendo en juego las interacciones apropiadas, se fabrican los nucleones, los núcleos, los átomos... Todos los fermiones, se caracterizan, en relación con sus propiedades bajo rotaciones, por un rótulo llamado impulso angular de espín, que en este caso toma el valor  $1/2$ . Por ello deben satisfacer propiedades estadísticas precisas conocidas como de Fermi-Dirac. De aquí proviene su nombre y la necesidad de que verifiquen el Principio de Exclusión de Pauli: dos fermiones idénticos no pueden ocupar simultáneamente el mismo estado cuántico. Este principio aplicado a los electrones atómicos permite entender la Tabla Periódica de los Elementos. A los fermiones se los agrupa en generaciones - de nuevo lo histórico se filtra culturalmente - de sucesiva aparición y de características similares aunque con algunas propiedades intrínsecas distinguibles como las masas y el nombre. La primera generación es la materia prima de todo lo que rodea nuestra vida cotidiana,

a nuestra escala. Está constituida por un par de quarks y un par de leptones. Para construir protones y neutrones bastaría, en un análisis preliminar, con los quarks de esa primera generación:  $u$  y  $d$ . Sin embargo, en condiciones de análisis muy sofisticadas recogemos información sobre la presencia material de los otros tipos (o “sabores” en la jerga) de quarks correspondientes a las generaciones siguientes: el  $c$  y el  $s$ ; el  $t$  y el  $b$ . El sabor  $t$ , recientemente observado experimentalmente era esperado por múltiples razones (simetría, coherencia teórica, ...); así como a partir de Mendeleev se esperó la aparición de varios elementos químicos. Los leptones de la primera generación son el electrón y el correspondiente neutrino electrónico. En las siguientes se ubican el muón y su neutrino y el tau y su neutrino respectivamente. Los neutrinos son los personajes que pasan más desapercibidos, ya que no tienen carga eléctrica, sus masas son (casi) nulas y sólo participan de un tipo de interacciones: las débiles.

La solución de diversos problemas teóricos ligados a las interacciones entre quarks y la evidencia experimental, exige la presencia de un nuevo rótulo - número cuántico - que desemboca en la distinción de tres tipos de quarks dentro de cada tipo. En otras palabras, cada sabor de quark se presenta con uno de tres posibles valores de una nueva cualidad (color.<sup>en</sup> la jerga).

Se podría pensar en la presencia de otras generaciones además de las tres mencionadas. Sin embargo, hay determinaciones experimentales recientes que muestran que, bajo condiciones muy generales, sólo se presentan esas tres. Otra extrapolación en la evolución de la elementalidad nos llevaría en principio a un nivel posterior de componentes de las actuales componentes. Estemos advertidos y atentos a esa posibilidad.

Muchos de los comportamientos observados en la Naturaleza son emergentes. Es decir, ellos no estaban presentes en las partes separadas, sólo surgen como consecuencia de la, a veces intrincada, interacción entre muchos de esos componentes. Sin embargo debemos insistir en que mientras el todo puede no ser la simple suma de las partes separadas, su comportamiento

puede, al menos en principio, ser entendido a partir del de las partes más el conocimiento de cómo esas partes interactúan entre sí.

Entonces este camino reduccionista que hemos recorrido es parte integrante de la Ciencia ya que es lícito preguntarse frente a un objeto, de qué está constituido. Pero este reduccionismo descendente, analítico, define sólo una primera fase. Hace falta la segunda fase, la de síntesis. Remontar desde los componentes a los compuestos. Dar cuenta de las propiedades del conjunto a partir de las propiedades individuales. Para ello es central comenzar a estudiar las interacciones fundamentales con la esperanza de llegar a la materia macroscópica. Una advertencia es apropiada: podríamos haber vivido en un Universo en el que no alcanzaran unas pocas leyes sencillas para entenderlo. Que las leyes aplicables a la Tierra no valieran en Marte o en una galaxia lejana. Pero las evidencias experimentales, no las ideas preconcebidas, demuestran lo contrario. Tuvimos la suerte de vivir en un Universo en el que los fenómenos se pueden reducir a un número de leyes naturales relativamente sencillas.

Pasemos entonces a las interacciones. Aquí aparecen los bosones intermedios. Este calificativo viene de su condición de portadores de las interacciones. El fotón, de masa nula lleva la fuerza electromagnética, es el cuanto del campo electromagnético. Los “debilones”  $W$  y  $Z$  son los mediadores de la interacción débil, siendo sus masas del orden de 80 y 90 veces la masa del protón respectivamente. Los ocho gluones,  $g$ , sin masa, son los intermediarios de la interacción fuerte entre los quarks. Finalmente, el gravitón  $G$  sería el mensajero de la interacción gravitatoria. Todas estas partículas poseen propiedades estadísticas de Bose-Einstein, debido a que su espín es entero y de allí que se los nombre bosones.

La presencia de estos mediadores nos indica que a las fuerzas fundamentales de la Naturaleza las entendemos, hoy, transportadas a su vez por “partículas elementales”. Su aparición surge de condiciones de invariancia impuestas a la teoría: la validez de diversas operaciones de simetría en la

estructura teórica impone la presencia de esas partículas mediadoras de las interacciones y de las interacciones mismas. La simetría dicta la fuerza entre los componentes últimos de la materia: Pitágoras reapareció...

Hay un último personaje que resuelve problemas cruciales: el bosón de Higgs. Esta partícula desencadena el mecanismo de adquisición de masa, de inercia, por parte de los fermiones y fundamentalmente de los bosones W y Z, portadores de la interacción débil, sin que la simetría sea violada. Este es un punto clave en nuestra comprensión actual de las fuerzas fundamentales. Sólo los bosones intermediarios débiles son masivos a fin de garantizar el cortísimo alcance de estas interacciones. El resto de las fuerzas son de largo alcance: pueden no disminuir (o tal vez crecer) con la separación como es el caso de las fuerzas fuertes entre quarks, o decrecen muy lentamente con la distancia como la electromagnética y la gravitatoria. Aquí la masa cero del portador correspondiente: fotón, gluón y gravitón ( $\gamma$ ,  $g$  o  $G$ ) es apropiada ya que la masa del intermediario es inversamente proporcional al alcance de la fuerza.

En el caso electromagnético existe una variante, la de las interacciones moleculares (tipo Van der Waals), fuerzas efectivas que si bien se originan en cargas, son el resultado de una superposición que conspira para dar lugar a un comportamiento de menor alcance. La interacción fuerte entre quarks y gluones da lugar al confinamiento pero produce también una fuerza efectiva relativa a un sistema de quarks y gluones que es la fuerza nuclear entre nucleones: la interacción que liga protones y neutrones para formar el núcleo atómico.

A partir de aquí deberíamos intentar un análisis de las estructuras teóricas que formalizan la descripción de las interacciones fundamentales. Esas estructuras han sido desentrañadas y hoy hablamos de un modelo estándar de las interacciones fundamentales basado en la Teoría Cuántica de Campos. Es así que luego de sesenta años de desarrollo, la Teoría Cuántica de Campos, que nació como producto de aquella unión ya mencionada de la

Teoría de la Relatividad con la Mecánica Cuántica, es reconocida hoy como la base teórica para las micropartículas. Es importante señalar también que sus ideas físicas, sus resultados y su metodología, juegan un papel igual o más importante en otras especialidades como son la Astrofísica, la Cosmología, la Física Nuclear o la Física de la Materia Condensada.

La simetría brinda el marco de referencia para la simplificación de la estructura lógica de la teoría y posibilita el tratamiento unificado de las diferentes interacciones. Sí, la simetría, que de una primaria necesidad cultural estética aparece en la base de nuestro entendimiento actual de las fuerzas de la Naturaleza: la simetría determina la dinámica. El largo camino teórico pasa hoy por la teoría de campos de gauge donde la presencia de interacciones mediadas por los bosones intermedarios (de gauge) es una suerte de necesidad para preservar propiedades precisas de simetría de la estructura teórica subyacente. Casi como esa compulsión que sufrimos al ver un cuadro colgado torcido que nos lleva a ejercer la fuerza necesaria para enderezarlo y restaurar, en ese caso, la simetría axial.

El camino que conduce a entender a la simetría como base de las interacciones fue indicado por el propio Einstein quien llamó la atención sobre la necesidad de invertir la tendencia tradicional de considerar que los principios de invariancia debían derivarse de las leyes de movimiento y reconocer que lo natural es obtener las leyes de la Naturaleza y comprobar su validez empírica por medio de leyes de simetría.

Este proceso de formalización, como es obvio, está en evolución y continuará evolucionando. Un proceso que hoy está desplazando al concepto de partícula elemental del sitio central, del sitio de honor, para colocar allí al concepto primero de Simetría Fundamental.



# MECÁNICA CUÁNTICA

Vamos ahora a dedicarnos al análisis del problema dinámico, el problema de la comprensión de la materia en términos de un modelo de funcionamiento que dé cuenta de la información experimental que hemos conseguido de su estructura íntima. Es decir, nuestro interés es discutir las ideas que hay subyacentes a la disciplina que se llama Mecánica Cuántica, que es la mecánica que hubo que inventar, la teoría que hubo que crear, para comprender y describir los fenómenos físicos a esta escala de elementalidad de la que estamos hablando. ¿Por qué hubo que inventarla? ¿Por qué la mecánica de Newton tiene que ser ajustada, modificada, cuando las distancias en juego son muy pequeñas? Se presenta una situación similar a la que ya vimos cuando encontramos que la mecánica newtoniana tenía dificultades para explicar los fenómenos físicos ligados a velocidades cercanas a la de la luz. En ese contexto fue Einstein quien resolvió el problema con la Teoría de la Relatividad.

La escala atómica (del orden de  $0,00000001$  cm) define el problema de interés de la Mecánica Cuántica formalizada por Erwin Schrödinger (1887-1961) y Werner Heisenberg (1901-1976). El acceso a la información de la estructura atómica está centralmente ligado a lo que llamamos espectros atómicos.

Un espectro es el resultado del análisis de la radiación que emiten los átomos cuando son excitados de alguna manera. Por ejemplo, los átomos que conforman un gas en un tubo cuando conectamos un extremo a diferente potencial (tensión) que el otro de modo que hay una diferencia energética generada, son excitados por esa energía. Los átomos reaccionan emitiendo luz o también radiación no visible, que se puede analizar. El análisis de la luz que proviene de la excitación de átomos es lo que constituye el estudio de los espectros. Newton fue quien comenzó a estudiarlos con un poco más de detalle y se dio cuenta de que la luz del sol, que a priori es ciertamente bastante blanca, cuando atraviesa un prisma, un objeto de cristal diseñado de manera apropiada, genera un espectro, una separación de sus componentes de diferentes colores. Este proceso se debe a que cada color que constituye

la luz blanca, que es la mezcla que recibimos del sol, se comporta de manera diferente durante el pasaje a través del prisma. Un componente se dispersa más, otro se dispersa menos, etc. El que se dispersa menos es el rojo, un poco más lo hace el naranja, un poco más el amarillo y el componente que sufre mayor dispersión es el violeta. Tenemos el espectro que vemos en el arco iris producido en ese caso por las gotas de lluvia que actúan de prismas. Es interesante notar que esta observación abre la posibilidad de hacer una identificación, un registro de los elementos. En efecto, a partir de su uso sistemático podemos hacer un catastro observando la “impresión digital”, de cada uno de los diferentes átomos ya que cada tipo de átomo produce su propio espectro.

Inversamente, si la luz blanca antes de llegar al prisma pasa a través de un gas de cualquier elemento, el espectro que presentaba originalmente todos los colores: rojo, naranja, amarillo, etc., presenta ahora líneas oscuras en algunas posiciones. Hay colores que desaparecen. Lo que ocurre es que a ese gas le “gusta” particularmente alguna radiación de un color dado y la absorbe. Pero lo que absorbe un elemento es diferente de lo que absorbe otro diferente o un tercero. Por eso las imágenes del espectro de la luz blanca que pasa a través de diferentes elementos, tienen diferentes faltantes. Esos faltantes nos informan de qué elemento se trata. Entonces, podemos determinar qué elementos estamos interponiendo en el camino de la luz con sólo conocer qué líneas oscuras aparecen, qué colores particulares desaparecen. Esa es la impresión digital del elemento. El elemento tiene ciertamente comportamiento complementario, en el sentido que si se lo excita efectivamente produce exactamente las mismas líneas y la misma impresión digital pero ahora brillante. Por eso también podemos hacer un registro a partir de la emisión, a diferencia del caso anterior de absorción.

El análisis de estos espectros de la radiación de luz o radiación electromagnética en general, condujo a la necesidad de entender mejor el proceso mismo de la radiación. En principio a la radiación se la define en términos

ondulatorios, al hablar por ejemplo de las ondas de luz, porque muchos de los efectos de la luz se comprenden si ese fenómeno se comporta como una onda. Es decir, es de carácter periódico en el tiempo y en el espacio. Similar en algún sentido a una onda en la superficie lisa del agua, producida al arrojar un cuerpo. Allí hay una periodicidad de máximos y mínimos que se reitera en el tiempo y tiene también una reiteración espacial. Sin embargo, para entender otros fenómenos como la radiación llamada de cuerpo negro, es decir cómo emite energía un cuerpo que se calienta, necesitamos otra explicación. Esta explicación es la que hace falta también para comprender otro fenómeno llamado efecto fotoeléctrico que consiste en el arranque de electrones de un metal por parte de radiaciones luminosas, efecto utilizado en las células fotoeléctricas. Necesitamos otra interpretación. Debemos admitir que la radiación es emitida por el cuerpo caliente o por los electrones y es transportada en el espacio y en el tiempo no en forma continua distribuida en toda la onda, sino como pequeños paquetes o gránulos, como si en la onda luminosa hubiese concentraciones de energía. Esas concentraciones de energía pueden ser asimiladas a una masa de modo que la radiación transporta energía empaquetada en partículas y con una cierta secuencia. Estos paquetes, proyectiles de luz, que conforman esas concentraciones de energía son llamados fotones.

La energía que tiene un fotón es proporcional a la frecuencia de la luz correspondiente. La frecuencia de la radiación está ligada al color. Bajas frecuencias implican el rojo. El naranja corresponde a frecuencias mayores, el amarillo a una frecuencia aún mayor, el violeta todavía a mayores frecuencias, en tanto que el ultravioleta supera la frecuencia visible, la que se puede captar con el ojo. Entonces, los paquetes de energía que lleva la luz, tienen una cantidad de energía que depende del color. Para una dada frecuencia, un color rojo digamos, los paquetes de luz tienen una cierta energía. ¿Qué sucede cuando se observa un rojo más intenso que otro? En ese caso hay muchos más paquetes de igual energía constituyendo la luz cuando se compara con

el número presente en la más tenue. La luz nos llega en paquetes y hay una única cantidad de energía en cada uno de los paquetes pero la cantidad total de energía se aumenta si recibimos muchos paquetes. La intensidad es proporcional al número de paquetes, en tanto que el color (la frecuencia) depende de qué paquete se trate.

Merece la pena mencionar el saber popular, o conocimiento vulgar al respecto. En efecto, en los días nublados el bronceado de la piel es mayor al exponerse a la radiación del sol porque en los días nublados se filtra menos la componente ultravioleta de la radiación solar. Llegan más fotones correspondientes al ultravioleta que es de frecuencia mayor y por lo tanto tienen más energía que los fotones de color visible.

Debemos llamar la atención acerca de que un gránulo particular de luz tiene una energía que es tremendamente pequeña porque si bien la frecuencia puede ser muy alta, la constante de proporcionalidad que relaciona frecuencia con energía es un número muy pequeño llamado constante de Planck ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{segundo}$ ). Es un número del orden de seis dividido por un uno seguido de treinta y cuatro ceros, en unidades de energía por tiempo. Entonces, al recibir radiación estamos recibiendo un número inmenso de fotones. En muchos aspectos no es necesario preocuparse de la estructura en forma de paquetes ya que recibimos tantos fotones que es inútil saber qué sucede con uno o con dos o con cuatro de ellos. Estamos expuestos a la acción integrada de ese número inmenso. Esa diferenciación en paquetes se pierde porque recibimos tantos fotones que la individualización carece de sentido. Por eso insistimos en remarcar el carácter continuo con que se manifiesta la materia frente a nuestras sensaciones, a pesar de que está estructurada, a nivel microscópico, a partir de gránulos u objetos separados.

El más simple de los átomos es el hidrógeno que tiene sólo un electrón y un protón, es decir, su núcleo es un único protón y tiene un electrón ligado a aquél de modo que se garantiza la neutralidad eléctrica del átomo. Una carga positiva y una negativa, de modo que todo funciona muy bien. El

modelo más elemental para un átomo, que surge al tratar de explicar la presencia de las líneas espectrales características que individualizan a cada tipo de átomo, es el modelo de Niels Bohr (1885-1962). En este modelo el electrón se mueve alrededor del protón como un planeta alrededor del sol y es lo más elemental de imaginar. Si este electrón alrededor del protón se comportara como la Física Clásica enseña, el átomo no podría existir estable. Aquí surge el primer problema con que se enfrenta la Física Clásica y que manifiesta la necesidad de la nueva mecánica: la Mecánica Cuántica. Un electrón es una carga eléctrica que para que esté moviéndose, girando, alrededor del protón tiene que tener aceleración porque la velocidad, si bien puede ser constante en magnitud no lo es en dirección. De modo que para girar alrededor del protón, al haber aceleración, debe existir alguna fuerza que lo está solicitando hacia adentro. En resumen, el electrón sufre fuerzas y está acelerado. Si hay aceleración, el electrón, que es una carga eléctrica, necesariamente emite radiación electromagnética. Entonces, en este modelo planetario, el electrón estaría emitiendo radiación continuamente, en todas las frecuencias y eso no está de acuerdo con el hecho de que vemos sólo algunas líneas características del hidrógeno, y nada más que algunas, no luz blanca como la del sol. Además al radiar perdería energía y consecuentemente su trayectoria iría disminuyendo de radio hasta terminar cayendo al núcleo definido por el protón. Este es el primer problema a resolver. Bohr lo ataca de una forma ad hoc, postulando que si el electrón ocupa ciertas órbitas perfectamente definidas y caracterizadas por un número entero  $n$ , entonces no irradia energía tal como lo exige la Física Clásica.

Entonces, ¿cómo funciona el átomo? ¿qué ocurre si iluminamos un átomo de hidrógeno? Cuando incide luz sobre el átomo efectivamente le llega un paquete de energía, el fotón. Este proyectil fotón choca contra el átomo y afecta al más liviano, al más débil de los componentes, que es el electrón, ya que es dos mil veces más liviano que el protón. De modo que cuando se ilumina un átomo, el que percibe fundamentalmente la iluminación es el electrón. Es el

más pequeño, el que menos se puede defender, el menos inerte. El electrón recibe al fotón, lo absorbe ganando energía y se va más lejos del protón. Es decir, adquiere la energía extra que le trae la luz en forma de paquete y se excita, se aleja del protón. Pero al electrón le gusta quedarse lo más cerca posible del protón ya que de esa manera disminuye su energía y su situación es más estable. Por ello trata de volver a su situación inicial, a su estado fundamental. Cuando regresa a su lugar inicial le sobra energía, tiene que emitirla. La ubica en un paquete, un fotón, y la despide. Los procesos que hay en el caso más simple del átomo de hidrógeno y que se repite en todos los más de cien átomos diferentes que existen en la Naturaleza, funcionan así: los electrones absorben ciertos fotones particulares y sólo esos, realizando transiciones a una situación excitada definida por una de las órbitas particulares que mencionamos, pero al desexcitarse, porque quieren volver al estado fundamental, el natural, el de menor energía, emiten fotones. Este proceso se realiza claramente en saltos discretos bien determinados, porque recibió una cantidad fija de energía que lo llevó de un estado a otra situación más alejada del protón, ambos caracterizados por números enteros. Esa cantidad fija es la que le transmitió el fotón incidente. Cuando vuelve al estado inicial emite un fotón que corresponde también a una cantidad fija de energía, no cualquier valor. Por eso decimos que las transiciones de los átomos que dan lugar a la absorción o a la emisión de luz son por saltos cuantificados. Si el paquete de energía fotón correspondiese a una energía diferente de la de esos saltos cuánticos, el electrón ni se entera de que le llega. Puede ocurrir que iluminemos al electrón con una frecuencia  $f$  diferente, tal que  $E = h.f$  no corresponda a un salto de los que les gustan al electrón y entonces el electrón deja pasar al fotón, no absorbe la energía. Solamente absorbe si el fotón que llega tiene el correcto valor de energía para ir a la situación excitada permitida. Estas líneas que caracterizan al átomo y definen el espectro correspondiente dependen de las cantidades de esos saltos particulares permitidos. Es decir se genera una estructura representable con escalones.

La situación energética es más o menos la siguiente: la energía, cuando el electrón está más cerca del núcleo corresponde al estado fundamental, cuando se excita porque absorbe justamente este paquete o fotón  $h.f$ , puede saltar un escalón y luego volver al estado de partida emitiendo exactamente la diferencia de energía entre esos estados que vuelve a ser  $h.f$ . Si le mandamos justamente un paquete correspondiente al segundo escalón es capaz de saltar del segundo al tercero si  $f$  es tal que  $h.f$  es la diferencia exacta entre esos niveles. Luego cuando regresa al estado de partida emitirá el fotón correspondiente. Esas energías están directamente relacionadas con órbitas. En efecto, mayor energía significa que el electrón está en una órbita más lejana respecto del núcleo, del protón en el caso del hidrógeno.

De esta manera se estructura el espectro de energía del átomo y consecuentemente el espectro de radiación, o de absorción, correspondiente. Los espectros son nada más que el resultado de las transiciones. La predicción de los resultados experimentales a partir de esta imagen o modelo es la correcta. Pero no perdamos de vista que hemos tenido que introducir una hipótesis ad hoc ciertamente fuerte: hay que admitir que el electrón en esas órbitas particulares caracterizadas por números enteros, en esos estados energéticos, no emite radiación. Esto contradice la Física Clásica ya que como dijimos, en esas órbitas está sufriendo aceleraciones y consecuentemente debería radiar. Clásicamente además, el electrón, carga eléctrica orbitando alrededor de la carga positiva del núcleo atómico, debería ir cayendo hacia el núcleo en una trayectoria espiral ya que iría perdiendo continuamente energía. A medida que va cayendo va emitiendo luz de todas las frecuencias, precisamente lo que no se observa. Lo que sí se observa es un espectro de líneas correspondiente a algunas frecuencias particulares. Por lo tanto hay que suponer que el electrón no se cae hacia el núcleo sino que en ausencia de absorción o emisión de fotones característicos cuya energía corresponde al salto entre órbitas, se queda siempre en una de ellas. Podemos decir entonces que hay órbitas estables en donde al electrón le "gusta" quedarse y donde no emite radiación a pesar de



que está acelerado, contradiciendo por lo tanto a la Física Clásica.

Esta situación que hemos descrito condujo a la formulación de lo que llamamos Mecánica Cuántica, la mecánica especial para el mundo atómico y que es el objetivo de la discusión que sigue.

Según vimos, la situación general es la siguiente: a partir de Einstein que fue el que estudió el efecto fotoeléctrico, el arranque de electrones de un metal por iluminación, surge el concepto de fotón. Por ese análisis a Einstein se le entregó el premio Nobel. Este descubrimiento lo hizo también en 1905, simultáneo a la Relatividad y a otra contribución importante referida a la comprensión del llamado movimiento Browniano. Su premio Nobel premia haber entendido que la luz a veces actúa en forma ondulatoria, como en los fenómenos de polarización de la luz, de interferencia y difracción de rayos luminosos, pero a veces actúa diversamente comportándose como un conjunto de partículas, en términos de fotones. Esta descripción complementaria de la luz como un conjunto de paquetes de energía es importante para entender otros comportamientos de la luz. De modo que la luz actúa en forma asimilable a un fenómeno ondulatorio, pero también lo hace complementariamente en forma de partículas.

Al físico francés Louis de Broglie (1892-1987) se le ocurrió proponer, unos años más tarde, que esa complementariedad de comportamientos que presenta la luz, también se presentaba en el caso de las partículas microscópicas. Las partículas tradicionales, como son los protones y los electrones, podrían actuar también como ondas. Efectivamente, se puede definir, a partir de la propuesta de de Broglie, una longitud de onda, como la correspondiente a la luz, asociada ahora a las partículas y hacer experimentos ondulatorios enteramente equivalentes a los que se hacen con la luz, pero con “partículas”. Las comillas se hacen imprescindibles por cuanto empezamos a tener entonces problemas semánticos con la palabra partícula. Efectivamente, se puede producir difracción o interferencia de electrones, o de otras partículas cuánticas. A partir de de Broglie nos encontramos con que así como la luz a

veces se comporta como onda y a veces como partícula, lo que usualmente relacionamos con la imagen de partícula, de pequeña bolita, es decir los constituyentes de la materia: protones y electrones, pueden actuar también como ondas.

¿Cómo las partículas manifiestan difracción, el fenómeno típico de las ondas luminosas? La difracción ocurre cuando iluminamos rendijas suficientemente pequeñas ya que luego de la rendija no vemos su sombra geométrica sino iluminación donde esperamos oscuridad. Si iluminamos con una fuente luminosa una rendija, en principio deberíamos obtener sobre una pantalla sólo iluminación en la región que corresponde a la imagen geométrica de la abertura. Si achicamos suficientemente la rendija encontramos que sobre la pantalla aparecen zonas brillantes y oscuras a ambos lados del eje. Este fenómeno ocurre porque la luz se comporta en forma ondulatoria. Todos los puntos de la rendija alcanzados por la onda incidente emiten a su vez ondas. Estas ondas se superponen unas con otras, interfieren y en algún lugar producen zonas más brillantes y en otras partes dan zonas oscuras. Ese es el fenómeno de difracción de la luz.

Encontramos entonces que la luz y las partículas tienen un comportamiento dual. Los objetos cuánticos, como se los usa llamar, se comportan alternativamente como ondas y como partículas. Según cómo se observe o según qué tipo de experimento hagamos, la luz se manifiesta como si estuviese constituida de partes separadas, concentradas o como si la energía estuviese distribuida, desparramada, al igual que en una onda. De aquí surge la necesidad de escribir una ecuación o mejor una teoría para las ondas de materia. Esto lo realizó Schrödinger quien formuló la Mecánica Ondulatoria. Esta es una versión de la Mecánica Cuántica donde las soluciones ondulatorias ligadas a la materia tienen que ser interpretadas.

Precisamente esta interpretación tiene que ver con el concepto de probabilidad de presencia y con el principio de incerteza. Este último a su vez se conecta con el concepto contemporáneo de determinismo.

Hasta aquí hemos tratado la presentación fenomenológica de los fenómenos cuánticos, vamos ahora hacia una discusión más formal.

Retomemos el análisis que hicimos oportunamente sobre teoría y experimento, sobre el método científico, para recordar que, en general, los experimentos físicos y los resultados que surgen de hacer un experimento ordenado, consensuado, con método, son descriptos usando el lenguaje cotidiano. Sin embargo, cuando queremos pasar de la mera descripción de lo que se observa, a clasificar esas diferentes observaciones, sintetizar los resultados, tratar de establecer si hay relaciones de causa-efecto en las observaciones en función de lo que preparamos para observar, nos encontramos con la necesidad de crear una teoría. Cuando vamos a construir una teoría, es probable que el lenguaje cotidiano no alcance. Necesitamos aceptar ciertas generalizaciones del lenguaje particular y admitirlas si es que no es posible basarse en conocimiento científico previo. Las mantenemos hasta que constatemos que, por haber admitido esas generalizaciones, somos conducidos a contradicciones con nuevos datos experimentales. En ese caso debemos abandonarlas. Ese es el funcionamiento de la actividad científica. Continuamos realizando experimentos y en algún momento el experimento nos va a “decir”: cuidado, es necesaria una revisión, porque has generalizado el lenguaje para construir tu teoría de manera un poco exagerada.

Traigamos un ejemplo de este procedimiento que se explica con lo que ya comprendimos. En principio, a partir de las observaciones de los siglos XV en adelante, se podría pensar que las señales luminosas se propagaban con velocidad infinita. Sin embargo, este lenguaje es inapropiado porque debido a experimentos diversos y en particular al de Michelson y Morley que comentamos, sabemos que la velocidad de la luz es finita y su valor es el máximo posible. Ahora tenemos una interpretación correcta de los hechos en términos de una modificación teórica que condujo a la Teoría de la Relatividad. Sin embargo, esta teoría tiene presencia protagónica en cierto rango de problemas, en ciertas escalas, en particular si las velocidades en juego son

suficientemente grandes como para poder compararse con la velocidad de la luz. De manera tal que los conceptos clásicos estaban incluidos al pensar que la velocidad de la luz era infinita. Ellos están ligados al lenguaje ordinario y siguen siendo aplicables siempre que  $c$ , la velocidad de la luz, pueda ser considerada tan grande, respecto de las velocidades en juego en el problema, de modo que pueda imaginarse como infinita a los efectos prácticos. Además, se deberá garantizar que la gravitación y la presencia de masas sea despreciable, ya que cuando las masas son suficientemente grandes las rectas son atraídas por las masas y la Geometría no es euclídea. Entonces si las masas no son suficientemente grandes y si la velocidad puede considerarse infinita respecto a las velocidades en juego, seguimos manteniendo el lenguaje ordinario, que es el de la Física Clásica. Cuando no es el caso, tenemos que usar la Relatividad.

Sin embargo, la Relatividad todavía cumple con un requerimiento tradicional en el sentido de que cualquier conocimiento científico permitía una división clara y total entre sujeto y objeto, entre observador y hecho observado. Vamos a ver que el paso que sigue, que está ligado al entendimiento de los espectros, a la física del átomo, trae la primera diferenciación grande respecto de la manera de pensar tradicional. La Mecánica Cuántica implica que también el concepto de observación requiere una revisión profunda. Es decir, especificar quién es el observador y qué es lo observado, cómo interactúan ambos personajes y si existe coincidencia espacio-temporal entre ellos.

Volvamos a la Física del átomo que hemos llamado Mecánica Cuántica por convención. Se llama cuántica porque hay cuantos, cuantos de energía, saltos cuánticos, en cantidades fijas. Es un comportamiento discreto de la materia a pequeña escala. Esa revisión del concepto de observación y de coincidencia es debida a la interacción observador-objeto, que ahora va a ser esencial porque causa cambios incontrolables y detectables. Estas modificaciones son suficientemente grandes como para que sean medibles en el sistema bajo consideración. Y esto es claro debido a los cambios discontinuos

característicos de los procesos atómicos. Los saltos cuánticos en el proceso de interacción de la luz con la materia, por ejemplo, pueden hacer cambiar la posición o la velocidad del electrón de manera sustancial. El sistema recibe en el proceso de observación, un proyectil fotón que le hace cambiar su estado. En efecto, para observar al sistema cuántico tenemos que iluminarlo, mandarle luz, que es absolutamente controlable en principio pero suficientemente energética como para que cuando la detectamos nos retorne para decir que el electrón estaba en el nivel o en el estado de energía con  $n = 1$ ,  $n = 2$ ,  $n = 3$ , o el que fuere.

Percibimos un objeto porque lo iluminamos y lo que vemos es la reflexión, el rebote, de la luz en el objeto. De esa manera se rearma en el proceso de observación la forma del objeto que se está mirando. El color lo detectamos por el tipo de radiación que es absorbida, entonces lo que nos llega al ojo es la luz blanca sin las componentes que absorbió el material. Si vemos un color rojo es porque el material absorbió los azules. Un cartel rojo está hecho de papel con una pintura que cuando le llega la luz absorbe los azules, entonces de la blanca recibimos por reflexión lo que resta que es rojo o el complementario que corresponda. Ahora bien, la misma idea es aplicable al “mirar” un átomo. Necesitamos iluminarlo y el proceso de iluminación, a escala atómica, tiene influencia no despreciable en ningún caso.

Modificamos al sistema cuando lo observamos. Esto no ocurre con la observación de un vaso o una jarra, digamos. Si iluminamos la jarra, ella no cambia, está siempre en el mismo lugar, porque los paquetes de energía luminosa que le llegan son muy pequeños comparados con su propia masa de modo que no alcanzan a moverla, simplemente rebotan como una pelota minúscula arrojada contra una pared. En la Mecánica Cuántica, que es el ámbito de la Física de la escala atómica, no podemos dejar de tomar en cuenta la interacción que como observadores tenemos con el objeto observado. Porque como observadores, para observar, tenemos que de alguna manera iluminar. Iluminar quiere decir mandarle luz, pero ya hemos aprendido que

si a un átomo le mandamos luz y esa luz lleva paquetes de energía que poseen justamente las propiedades que le “gustan” al electrón para excitarse, el electrón que estaba en un estado, dejó de estar en ese estado cuántico y pasó a estar en otro estado cuántico más excitado.

No tenemos control sobre la devolución que hace el átomo de la luz con la que iluminamos. Por eso la lámpara ilumina blanco ya que el material es compuesto y los electrones de vez en cuando saltan, uno ahora, salta otro luego, etc. Sin ninguna coherencia. Devuelven la energía, sin ponerse de acuerdo uno con otro. Aprovechamos para mencionar la diferencia de este caso general con lo que sucede en un láser. Un láser es una luz especial, resultado de un mecanismo colectivo que permite conseguir que todos los electrones se pongan de acuerdo para devolver la energía con la que se los excitó en forma coherente.

Insistimos sobre el proceso de observación. ¿Qué quiere decir el proceso de observación? Llegó luz, un objeto absorbió los colores que le faltan al que vemos y solamente la luz que se reflejó, que recibimos, tiene la frecuencia correspondiente. Lo que hay que rescatar conceptualmente es que la luz no modifica el objeto observado si el proceso de observación se refiere a entes macroscópicos. Apagamos la luz y mañana volvemos a encenderla y vamos a volver a ver el mismo objeto, del mismo color. Lo importante entonces es que macroscópicamente el observador es pasivo.

El caso cuántico es en algún sentido asimilable a arrojar cloro o dar un martillazo a un objeto para “verlo”, después de observarlo ya no queda igual. Lo que sucede es que debido a esos cambios, concluimos que medir una magnitud en general torna ilusorio el conocimiento de otra y ese es el problema central. El problema que trae aparejado la Mecánica Cuántica es la imposibilidad de medir simultáneamente ciertas magnitudes físicas. Este hecho conduce a lo que se llaman relaciones de incerteza, cuantitativamente ligadas al hecho de que en muchos casos es imposible determinar con total exactitud valores simultáneos de dos variables físicas, que se dicen conjugadas. En general, para

conocer el comportamiento mecánico-clásico de un sistema es imprescindible ese conocimiento simultáneo. Desde el punto de vista de la Física Clásica, podemos predecir la trayectoria de un móvil cualquiera, de un automóvil o de una bola de billar, porque valen las leyes de la Mecánica de Newton y porque sabemos las condiciones iniciales. Dónde estaba inicialmente y con qué velocidad se movía. Si en un dado instante detectamos dónde está y con qué velocidad se mueve, podemos predecir dónde va a llegar en el instante siguiente a partir de las ecuaciones de la Mecánica de Newton. Podemos determinar la trayectoria porque tenemos la posibilidad de conocer, instante a instante cuáles son su posición y su velocidad simultáneamente. Así podemos determinar la próxima posición y la próxima velocidad. El problema de la Mecánica Cuántica es que para determinar posición y velocidad de una partícula tenemos que iluminarla, arrojarle paquetes de energía y los fotones modifican el sistema cuántico de modo que es imposible la determinación exacta de los valores simultáneos de las dos variables. A esas variables las necesitamos conocer simultáneamente porque en caso contrario no podemos predecir dónde va a estar el sistema en el instante posterior. Hay una ley de la Naturaleza que define el límite en la precisión de la determinación simultánea de estas magnitudes. Insistimos en que se trata de una ley de la Naturaleza que se encuentra en un pie de igualdad con otras que ya hemos discutido. En efecto hay otra ley de la Naturaleza que está en el núcleo de la teoría de la Relatividad que dice: no existe velocidad de señal mayor a la velocidad de la luz  $c$  y como vimos tiene consecuencias que son impresionantes. Ahora estamos en presencia de otra ley de la Naturaleza que nos dice que a nivel atómico hay un límite en la precisión de la determinación simultánea de pares de variables como son la posición y la velocidad de una partícula. Este es el contenido de las relaciones de incerteza de Heisenberg. Esta ley está absolutamente ligada a lo que venimos discutiendo acerca de que tanto la luz como la materia tienen comportamiento ondulatorio y comportamiento de partícula que son complementarios.

Si queremos saber qué velocidad tiene el electrón en un momento dado y afinamos mucho la precisión, intentando determinar muchas cifras significativas en la medida, empezamos a no saber dónde exactamente está ubicado. No podemos decir que está acá allí o allá. Si por el contrario queremos saber dónde está con absoluta precisión, no sabremos con qué velocidad se mueve. No podemos conocer las dos magnitudes con extrema precisión al mismo tiempo. Por lo tanto no podremos hablar de trayectoria ya que no está definida.

Retomemos por un momento el panorama histórico. Hacia fines del siglo XIX la luz se entendía por su comportamiento ondulatorio y era explicada en términos de lo que siertamente es, radiación electromagnética. Por otra parte, a los objetos materiales se los ponía en coincidencia con un comportamiento corpuscular. De manera tal que lo que se entendía es que con el transcurso del tiempo, la luz, como fenómeno ondulatorio, se manifiesta de manera continua porque la onda está definida en todo instante de tiempo y en toda posición en el espacio. En tanto que la descripción corpuscular implica que hay una característica discreta, localizada, para la partícula porque la partícula sale de un lugar y llega a otro lugar, es decir, cuando evoluciona temporalmente ya no está más en la posición previa. Esa es la diferenciación. De modo tal que un comportamiento ondulatorio, da lugar a este tipo de experimento ideal: una onda luminosa llega a una pantalla que tiene dos orificios y genera una figura de interferencia. Los frentes de onda, máximos y mínimos de la onda, van llegando y alcanzan los orificios. Cada orificio se transforma en fuente de una onda esférica. Lo mismo ocurre cuando sobre una superficie plana de agua tiramos dos piedras que caen simultáneamente. Se van a formar dos ondas circulares que cuando las recogemos en una pantalla dan lugar a una intensidad que va a tener máximos y mínimos. Donde se suman las dos ondas nos proveerá un máximo, donde se restan nos dará un mínimo, no iluminación.

Por otra parte, para las partículas los eventos son individuales, discretos.



En este caso, un experimento del tipo de la difracción ondulatoria implica que las partículas llegarán a los orificios, podrán interactuar con el orificio o pasar de largo. En general es difícil que pasen exactamente de largo, chocarán entonces con un borde y se cambiará su dirección de modo que sobre la pantalla recibiremos partículas dispersadas.

Al formalizar la Mecánica Cuántica, este dualismo onda-partícula no dicotomiza al universo de entidades físicas. En efecto, cualquier magnitud microscópica presenta ambos aspectos pero en diferentes situaciones. Aquí está la complementariedad. Cualquier entidad, luz (radiación) o electrones (materia), tiene comportamiento de onda, en la propagación, y comportamiento de partícula, al ser detectada. Ambas imágenes por sí solas son incompletas. De allí que, como dijimos anteriormente, habría que introducir los nuevos términos “partícula” u “onda” que aunque suenen exóticos, parecerían más apropiados.

Sobre la base de las ideas y conceptos discutidos arriba se ha conseguido sistematizar la fenomenología atómica. En particular, entendemos la presencia de átomos específicos y estables. La característica ondulatoria de los electrones se refleja en la presencia de ondas confinadas que miden su probabilidad de presencia en un dado lugar del espacio. Ese confinamiento espacial define el tamaño del átomo. Es importante subrayar que sólo aparecen algunas de las posibles ondas confinadas. Esta situación es similar al caso de una cuerda de violín, digamos. Esta cuerda posee sus dos extremos fijos y por ello mantiene sólo algunas vibraciones. Aquéllas que corresponden a longitudes de onda que son múltiplo par de la longitud de la cuerda. El violinista con su dedo define uno de los extremos de la cuerda y consecuentemente las frecuencias de vibración correspondientes.

El átomo se mantiene estable a menos que perturbaciones de algún tipo le entreguen suficiente energía a los electrones como para que puedan cambiar el modo de vibración. La agitación térmica a la temperatura ambiente en general no alcanza para desencadenar el proceso y por ello, por ejemplo, un

trozo de hierro se presenta “al rojo” sólo si se lo calienta suficientemente. Cuando cesa la perturbación, el electrón vuelve a la situación original, la correspondiente a la menor energía posible.

Por otra parte, la variedad de elementos existentes, los que figuran en la tabla de Mendeleev, surge como consecuencia del Principio de Exclusión de Pauli. Este principio establece que no más de dos electrones de un átomo pueden vibrar de la misma manera. Uno lo hará en una situación de espín y el otro en la opuesta. El principio de Pauli provee la ley de “llenado” de los átomos al incrementar los electrones hasta completar el número de ellos que definen a cada elemento. Por ejemplo, el Neón (*Ne*) posee 10 electrones y es diferente del Sodio (*Na*) que tiene 11. El *Ne* implica entonces, debido al principio de Pauli, exactamente a 5 modos de vibración y por ello es químicamente inactivo, un gas noble. En tanto que el *Na*, al tener 11 electrones posee 1 que vibra diferente, está aislado y es químicamente activo por que ese electrón puede ser capturado con cierta facilidad por otro átomo.

Terminamos con un reconocimiento profundo a la Mecánica Cuántica ya que está en la base de los desarrollos modernos de la Química, la Biología Molecular y la Electrónica. A través de estas disciplinas, constituye la fundamentación del desarrollo tecnológico que ha transformado nuestro mundo y nuestra vida cotidiana.

# ENTROPÍA

El concepto de entropía, que analizaremos con algún detalle, se conecta con una gran cantidad de nociones de la Física.

Todos los procesos deben verificar la conservación de la energía. Sin embargo resulta obvio que hay muchos procesos que, aún conservando la energía, nunca ocurren. Nunca se produce espontáneamente el salto de una piedra desde el piso hacia arriba.

Esta observación desencadena un análisis imprescindible. Para comenzar recordemos que cuando discutimos el espacio-tiempo, en ningún momento hablamos de una dirección privilegiada del tiempo. El tiempo servía para determinar la secuencia de sucesos, el ordenamiento que llamamos temporal, pero no mencionamos que en los procesos naturales, por lo menos en forma aparente, hay una dirección preferida o privilegiada para el transcurso del tiempo. Sin embargo, deberíamos decirlo ya que los eventos ocurren como si hubiese una flecha del tiempo que los dirige en un cierto sentido determinado. Queremos entonces referirnos a la observación experimental de la existencia de una flecha del tiempo y hacer un análisis del asunto en el marco científico. Precisamente la propiedad direccional del devenir temporal está en la esencia del concepto de entropía. Otro aspecto de la entropía se relaciona con el orden, el desorden y las simetrías en la Naturaleza y cómo las describe la Física. En este sentido la entropía también tiene valor como una medida del desorden, una manera de especificar cuantitativamente el desorden de un sistema.

Entropía es la magnitud física que nunca decrece cuando ocurre un proceso natural. Ella puede permanecer constante sólo si el sistema está en equilibrio.

A todos nos resulta evidente que el tiempo tiene una dirección privilegiada. Tenemos absoluta conciencia de que se nace y se muere y de que los eventos ocurren siempre en un único sentido temporal. Sin embargo, cuando se estudia el comportamiento de la Naturaleza en el ámbito microscópico, se observa que las leyes que describen los procesos naturales no implican

necesariamente un sentido preferido del tiempo. En efecto, analicemos la Mecánica, el marco donde se estudia el movimiento de los cuerpos. Por ejemplo, en la caída de los cuerpos, todos los procesos son reversibles. Quiere decir que cualquiera sea el movimiento cuya evolución a lo largo del tiempo está dada por la Mecánica, no implica una dirección temporal privilegiada. Es decir, todos los procesos descritos por la Mecánica, si implican un determinado movimiento, también pueden dar lugar al movimiento inverso. Esto es, no hay razones para que se prefiera uno de los dos movimientos, el movimiento que ocurre en una dirección o en la dirección inversa. A modo de ejemplo consideremos la trayectoria de una piedra lanzada que viaja bajo la acción de la gravedad. Su trayectoria va a describir una curva parabólica. Es decir, la piedra es lanzada con una velocidad inicial y sigue una trayectoria asimilable a un arco de parábola, hasta caer a tierra. Supongamos que la evolución real sea de izquierda a derecha. El tiempo allí transcurre como en el reloj normal, hacia el futuro. Lo que predice la Mecánica es que si se lanza la piedra desde el punto de llegada en sentido inverso y con una velocidad que es exactamente la velocidad de llegada a tierra, pero con sentido invertido, la piedra va a recorrer hacia la izquierda exactamente la misma curva que recorrió mientras avanzaba. Estos dos procesos, el proceso directo y el proceso inverso, son perfectamente posibles en la descripción que provee la Mecánica de Newton. Es más, si se filma este proceso y se pasa la película al revés, es decir se invierte el sentido en que transcurre el tiempo, no se va a poder distinguir si se está viendo efectivamente una película invertida o si está viendo el movimiento inverso del proyectil ya que el proyectil va a seguir exactamente el mismo recorrido. En otras palabras, si mostramos la filmación de un proyectil que va viajando en una dirección y pasamos la película en el sentido normal o en el sentido inverso, no nos podemos dar cuenta de cuál es el sentido real del movimiento. En los procesos mecánicos como éste que mencionamos, hay una perfecta simetría entre la evolución hacia el futuro y la evolución hacia el pasado. Consecuentemente, no se puede distinguir cuál

es la dirección del devenir temporal. Las leyes de la Mecánica son simétricas frente al intercambio del sentido del tiempo: futuro por pasado ( $t$  por  $-t$ ). Si se ve la película pasada al revés, los procesos son absolutamente naturales, no se va a observar nada que informe la inversión realizada al pasaje de la película.

La situación descrita se relaciona con los procesos elementales que describe la Mecánica, ya que en los procesos que tienen que ver con los cuerpos macroscópicos y en particular con los procesos termodinámicos, la situación es completamente diferente.

A este respecto analicemos qué son los procesos termodinámicos. Esencialmente son procesos que implican intercambio de calor. Los procesos termodinámicos en general no pueden ocurrir en sentido inverso. Es decir, ocurren sólo en una dirección privilegiada. Son procesos irreversibles. Imaginemos tener un recipiente con agua caliente y uno con agua fría y se realiza el proceso de mezcla del contenido de estos dos recipientes. El resultado será un recipiente donde se tendrá agua tibia. La vuelta atrás de este proceso es imposible. Si disponemos de una película que tiene como situación inicial a un recipiente con agua caliente y un recipiente con agua fría que luego son mezclados para obtener un recipiente con agua tibia, nos vamos a dar cuenta inmediatamente si la película es pasada al revés. Ciertamente nadie observó nunca que de un recipiente con agua tibia se puedan separar de manera espontánea uno con agua caliente y uno con agua fría. Los procesos como éste tienen un sentido perfectamente definido en la evolución con el tiempo. Otro ejemplo es el contacto térmico. Si se ponen en contacto dos cuerpos a diferentes temperaturas, al cabo de un cierto tiempo los dos cuerpos van a adquirir la misma temperatura. De manera natural, calor pasó del cuerpo caliente al cuerpo frío para equilibrar las temperaturas. El proceso nunca ocurre espontáneamente en el sentido inverso. Siempre hay un flujo de calor del cuerpo más caliente al cuerpo frío y nunca este proceso ocurre al revés. Otro ejemplo interesante es la expansión de un gas. Imaginemos tener un recipiente que contiene gas en

una parte separada de otra parte que está inicialmente vacía. En un determinado instante se conectan los dos recipientes. Al cabo de un cierto tiempo encontraremos el gas distribuido uniformemente en las dos partes. En este caso, si filmásemos este proceso sabríamos exactamente en qué sentido único debemos pasar la película si queremos presenciar el evento que realmente ocurrió. Si la pasásemos al revés, sería absolutamente antinatural ver que las componentes del gas, las moléculas que están en la parte inicialmente vacía del recipiente pasen a la parte inicialmente llena para llegar exactamente a la situación inicial. En los procesos termodinámicos el tiempo tiene un sentido perfectamente establecido. En general, cuando se tiene un sistema macroscópico, un sistema compuesto de muchísimas moléculas, como puede ser una masa de agua, un ser vivo, un gas, un cuerpo sólido, etc. y lo dejamos abandonado a su propio albedrío siempre evoluciona en un único sentido. Ese sentido lleva al equilibrio térmico. Quiere decir que la evolución espontánea ocurre en una dirección tal que lleva a un estado final en el cual todas las partes tienen la misma temperatura y la misma presión. Los fenómenos termodinámicos acompañados de procesos de aproximación al equilibrio térmico, son irreversibles. Porque, como vimos, una vez que se llega al equilibrio, en que todas las partes adquieren la misma temperatura y la misma presión, el proceso no vuelve nunca para atrás en forma espontánea. Es decir, cuando la evolución ocurre hacia el equilibrio térmico, igual temperatura en todas las partes o igual presión, esos procesos son irreversibles. Otro ejemplo típico es la transformación de energía cinética en calor. Cuando un cuerpo que se está desplazando sobre otro se frena, el movimiento desaparece porque se desarrolla un proceso en el cual la energía que tenía en el movimiento se transforma en calor. Esta situación se da cuando un automóvil frena. En ese caso las ruedas se calientan en el proceso de transformación de energía cinética en calor debido al roce de las ruedas con el suelo. Este fenómeno es el que da lugar al humo que surge de las ruedas en el aterrizaje de los aviones. En los procesos donde hay transformación de energía cinética en calor hay

marcha al equilibrio y necesariamente hay irreversibilidad.

Se podría preguntar si existen los procesos macroscópicos reversibles. La respuesta es no. Puede haber cuasi-reversibilidad, se puede idealizar un proceso termodinámico que involucre cuerpos macroscópicos y que sea cuasi-reversible, pero no presentará reversibilidad absoluta. Para aproximarse tanto como se quiera a la reversibilidad en los procesos macroscópicos hay dos pautas a seguir. Por un lado, se tiene que evitar que haya transferencia de calor, ya que cuando la hay, existe tendencia al equilibrio térmico (como vimos en el caso en que el cuerpo caliente transfiere calor al frío). A su vez, si hay equilibrio térmico estamos en presencia de un proceso irreversible porque no se puede volver espontáneamente para atrás excepto que separemos las dos partes, calentemos una de ellas y enfriemos la otra desde afuera del sistema. No existe el proceso inverso sin intervención externa. Si dejamos evolucionar al sistema, lo va a hacer de manera irreversible. Entonces hay que mantener la aislación térmica como primera condición para la eventual reversibilidad. Pero además es necesario que estos procesos que se parezcan a uno reversible, ocurran de una manera extremadamente lenta. Obviamente no puede evitarse que haya transferencias de calor ya que por mejor que sea la botella térmica que uno fabrica, al cabo de cierto tiempo el agua se enfría. Tampoco se pueden realizar procesos que lleven tiempo infinito para concretarse. Todos los procesos transcurren en un tiempo finito. Por ello es que no existen en la realidad macroscópica procesos reversibles.

Si tenemos un sistema aislado que está en equilibrio térmico, sus partes internas están también en equilibrio térmico y por ello entonces no puede ocurrir ningún cambio macroscópico visible en el sistema. Es decir, una vez que el sistema llegó al equilibrio térmico el sistema no evoluciona más, el sistema queda inerte. En un sistema en equilibrio térmico no ocurren más procesos macroscópicos que sean visibles. Una vez que un sistema llegó al equilibrio térmico, es imposible extraer energía útil, trabajo mecánico, de ese sistema. Esto tiene que ver con lo que decíamos antes, porque para extraer



trabajo de un sistema tiene que haber movimiento mecánico y para esto último hay que transformar alguna energía en energía cinética, la energía del movimiento. Si el sistema está en equilibrio térmico este proceso es imposible.

Los hechos que acabamos de señalar constituyen una síntesis muy elemental del contenido del segundo principio de la Termodinámica que precisamente enuncia la observación experimental siguiente: a partir de cuerpos en equilibrio térmico es imposible realizar trabajo mecánico alguno. Si queremos extraer trabajo de un sistema necesitamos que tenga contacto con dos fuentes que no estén equilibradas térmicamente. Es decir, que estén a distinta temperatura. Si disponemos solamente de fuentes que están todas a la misma temperatura, es imposible sacar energía de ellas y hacer un trabajo. Por ejemplo, en la máquina a vapor lo que se hace es calentar el agua y generar vapor que se hace ingresar en una cámara donde hay un pistón que puede ser expandido. La presión del vapor expande el pistón y después se lo libera. La expansión del pistón es usada como acción mecánica para mover por ejemplo una rueda. Eso es básicamente la idea de un motor a vapor, similar a la de los motores a explosión. Pero para poder hacer funcionar ese sistema fue necesario calentar agua y tener dos fuentes a temperaturas diferentes, una es la fuente de la caldera de la máquina y otra es el exterior, el aire que está a temperatura diferente. Si tuviésemos todo el sistema a la misma temperatura ese proceso no puede ocurrir ya que estaría en equilibrio térmico y no se puede producir trabajo a partir de una única fuente térmica.

El enunciado del segundo principio de la Termodinámica tiene una historia que comienza a principios del siglo diecinueve. Fundamentalmente con Sadi Carnot (1796-1832), ingeniero francés, especialista en máquinas térmicas. Carnot observó que cuando se usaba energía para generar un trabajo siempre había una cantidad de calor que no podía ser utilizada totalmente en producirlo y se disipaba. Digamos que si se dispone de una cantidad de energía nunca puede utilizarse toda esa energía en trabajo útil, siempre hay una cantidad de calor residual, inútil, que se pierde. Posteriormente hubo

una contribución importante de Rudolf Clausius (1822-1888) al introducir la noción idealizada de procesos reversibles. También debemos mencionar el aporte de William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907) que introdujo el concepto de temperatura absoluta, la temperatura a la cual la presión en cualquier gas se anula. Quien dio estructura formal al segundo principio tal como nos llega hasta hoy fue Clausius, físico alemán que se convenció de que el calor y el trabajo eran una misma entidad. Hasta Clausius, se tenía un concepto equivocado del calor, no se lo sabía identificar. Se imaginaba la existencia de un fluido particular que se llamaba calórico, que tenía que ver con todos estos procesos de intercambios energéticos. Se creía que el calor se conservaba en el Universo, de modo que era un fluido que podía pasar de un cuerpo a otro pero que se conservaba en forma integral, como lo es la carga eléctrica. Clausius fue quien estableció que en realidad calor y trabajo no eran más que formas diferentes de energía. A partir de esta convicción, enunció el segundo principio de la Termodinámica con precisión. En su enunciado dice que el calor no puede pasar en forma espontánea de una fuente fría a una caliente. El calor puede pasar sólo de una fuente caliente a una fría. Le dio a esta ley una forma matemática, en 1865, cuando introdujo el concepto de entropía. Desde el punto de vista etimológico, esta palabra precisamente hace referencia a una dirección y contiene esta idea. La magnitud física entropía cuantifica los cambios que ocurren en sistemas donde hay intercambio de calor. La propuesta de Clausius nace de pensar que si se tiene un proceso termodinámico en el cual hay un intercambio de calor con una determinada fuente a una cierta temperatura es decir, de una fuente térmica uno extrae una cierta cantidad de calor, entonces hay un intercambio de entropía. Ocurre un cambio de entropía en el sistema que debe ser mayor o igual que la cantidad de calor involucrada en el intercambio dividida por la temperatura de la fuente. Esta observación provee otra forma de enunciar la segunda ley de la Termodinámica: si los procesos son reversibles el cambio de entropía tiene que ser igual a esta cantidad y si no, en general es mayor.

Es decir, en todo proceso irreversible hay mayor aumento de entropía que la cantidad de calor intercambiado dividida por la temperatura de la fuente. De este modo surge una direccionalidad para los procesos ya que solamente ocurren aquellos que verifican esa desigualdad.

El concepto de entropía se introdujo inicialmente en el marco de la Termodinámica para caracterizar la propiedad de los procesos termodinámicos de tener una dirección preferida. Los procesos en la Naturaleza, que tienen carácter termodinámico, no ocurren en cualquier sentido, ocurren siempre en el caracterizado por el incremento de la magnitud que Clausius introdujo y llamó entropía.

Como ya mencionamos, en los procesos termodinámicos si se pasa la película al revés, nos damos cuenta. A diferencia de lo que ocurre en la mecánica, hay una dirección natural en los procesos ya que no son reversibles.

Si consideramos un sistema aislado y lo dejamos evolucionar, lo hace en una dirección tal que la entropía queda igual (caso excepcional de un proceso ideal reversible) o crece, pero nunca disminuye. Esta es una forma cuantitativa de poner de manifiesto las observaciones hechas en relación con el segundo principio de la Termodinámica. En otras palabras, la dirección de todos los procesos espontáneos es tal que la entropía crece durante su evolución.

Nos deberíamos preguntar entonces por qué hay irreversibilidad ya que en la Mecánica nos encontramos que los procesos son reversibles. Como dijimos, si uno mira un proceso mecánico no hay dirección preferida de tiempo, es imposible darse cuenta en qué dirección evoluciona el tiempo. Pero en los sistemas termodinámicos existe una dirección preferida y no hay posibilidad de equivocación. ¿Dónde se origina esta irreversibilidad a nivel macroscópico o por qué hay incompatibilidad con la reversibilidad de las leyes fundamentales de la Mecánica?

La pregunta comienza a contestarse si entendemos que los sistemas macroscópicos están compuestos por partes. Por ejemplo un gas está compuesto por

moléculas o un líquido, un fluido en general, está compuesto por moléculas. Esas moléculas se mueven y la evolución temporal del movimiento de cada una de las componentes sigue las leyes de la Mecánica. Sin embargo, a pesar de que la Mecánica es reversible, el comportamiento resultante del sistema macroscópico es irreversible. ¿Dónde se origina esta diferencia? ¿Por qué la simetría frente a cambios de la dirección del tiempo se pierde al pasar de una molécula al conjunto de moléculas? La simetría estaba en la Mecánica y por ello está en las partes componentes de un sistema macroscópico, pero por qué no está en el sistema macroscópico como un todo.

Preguntamos primero si es cierto que la Mecánica es estrictamente reversible. La respuesta es no. La mecánica no es estrictamente reversible. En el mundo microscópico, en el mundo de lo muy pequeño, hay ciertas fuerzas entre las partículas, los componentes elementales de la materia, que no son estrictamente reversibles, que violan la reversibilidad. Sin embargo, la violación es tan pequeña que de ninguna manera puede explicar la irreversibilidad que uno observa en los cuerpos macroscópicos y que es normal ya que es imposible observar procesos macroscópicos reversibles. En efecto, todos los procesos son irreversibles. Si se cae una silla, por más que uno se quede esperando toda el día o toda la vida, no se va a levantar sola. Cuando hay procesos macroscópicos uno se da cuenta siempre que la película está pasada en el buen sentido o no. ¿Cuál es entonces la Naturaleza de la irreversibilidad macroscópica, dónde se origina? En principio estas dos irreversibilidades que hemos mencionado, la irreversibilidad a nivel microscópico y la irreversibilidad macroscópica son de Naturaleza diferente.

Para ir a detalles un poco más finos mencionemos que se puede hacer también una descripción microscópica de los procesos termodinámicos, aquellos donde hay intercambio de calor. La Termodinámica usa los conceptos de presión, temperatura y calor a nivel macroscópicos. Son conceptos que aparecen en forma específica en los sistemas macroscópicos. Si uno tiene una bolita o una partícula muy pequeña, no puede hablar de temperatura. No tiene sen-

tido el concepto de temperatura de un átomo aislado. Ni se puede hablar de la presión de un átomo ni del calor en un átomo. Sólo tiene sentido hablar de presión, temperatura y calor cuando se tiene una masa enorme de átomos en conjunto. Ahora sí se puede hablar de que la entidad global tiene propiedades termodinámicas. Sin embargo se puede hacer una teoría microscópica de la termodinámica interpretando estos conceptos macroscópicos a partir de sus componentes. La presión de la cubierta del auto, la presión en un recipiente, la presión sanguínea, no es más que el efecto conjunto del choque de las partículas del gas o del fluido contra las paredes. Cuando se tiene un gas en un recipiente, se trata de una cantidad enorme de moléculas en movimiento, del orden de  $10^{20}$  moléculas. Un uno seguido de veinte ceros. Esas moléculas están en un movimiento continuo y cada vez que una de ellas choca ocurre lo mismo que cuando se arroja una pelota contra la pared o contra la mano. Se percibe la acción que tiende a empujar la mano para atrás. Las moléculas que chocan si bien son muy muy livianas, cuando son muchísimas dan lugar a una acción conjunta que es lo que llamamos presión. Presión es el efecto de los choques de las moléculas contra la pared del recipiente.

La temperatura tiene también una interpretación microscópica cuando un fluido es visto en términos de sus componentes. La temperatura tiene que ver con la energía cinética, con la velocidad con que se mueven las partículas dentro del fluido. Si calentamos un gas y medimos con un termómetro que su temperatura aumentó, lo que ocurre realidad es que las moléculas se están moviendo en promedio mucho más rápido que antes. Al moverse con mayor velocidad adquirieron consecuentemente mayor energía cinética o de movimiento.

El calor es intercambio de energía. Si calentamos un gas en un recipiente cerrado, el resultado es un aumento de la temperatura. Al entregarle calor aumentó la energía cinética de las moléculas, las moléculas se mueven más rápido. El calor desde el punto de vista microscópico puede ser pensado entonces como la agitación térmica de las moléculas. Una masa de gas

más caliente es aquella en la cual las partículas, las moléculas, los componentes, tienen mayor agitación térmica que en una más fría. Por el contrario, cuando se enfría se mueven más lentamente. Esta es sencillamente la visión microscópica del calor.

¿Cómo se entiende entonces que un sólido tiene una cierta temperatura? ¿Por qué nos quemamos cuando tocamos una masa de hierro que ha sido calentada al fuego? En un cuerpo sólido los átomos están organizados en una estructura más o menos ordenada, en los sólidos cristalinos muy ordenada. Hay sólidos más desordenados que se llaman sólidos amorfos y son un poco más complejos para su visualización. Imaginemos una estructura cristalina, los átomos están organizados de una manera ordenada, ubicados en vértices de una red espacial. Esos átomos, si bien están en una estructura ordenada, no están mantenidos de manera completamente rígida ya que pueden vibrar alrededor de sus posiciones de equilibrio. Pueden moverse unos respecto de otros, si bien no pueden desplazarse libremente por todo el sólido. Calentar un sólido implica que estas vibraciones aumentan, es decir, hay mayor agitación térmica aunque esa agitación térmica pueda ocurrir alrededor de ciertas posiciones. Si se calienta suficientemente se funde porque sus átomos vibran tanto como para que se empiecen a escapar de las posiciones que tenían asignadas en la red cristalina que mencionamos. Ese es el proceso de fusión. Si lo seguimos calentando, el sólido se transforma en una masa líquida. Se empiezan a mover sus partes prácticamente sin posición definida pero siempre uno cerca de otro. Si lo calentamos aún más, el movimiento de agitación cada vez mayor es tal que las componentes comienzan a separarse tanto como para ocupar todo el espacio que se les deje libre, pasan a la fase gaseosa. En los sólidos metálicos, que son los que se calientan y enfrían rápidamente, además del movimiento de los núcleos de los átomos que son los que realmente respetan posiciones en la red cristalina, los electrones se mueven como en un gas y son los conductores del calor. En los metales la homogeneización de la temperatura ocurre muy rápido porque los electrones se pueden mover

con total libertad entre la red y son los que llevan la información de que todo el sistema tiene que adquirir la agitación térmica.

Con las ideas mencionadas se puede entender el ejemplo que sigue. Imaginemos un cuerpo cristalino que se desplaza. Lleva una cierta energía cinética y se desliza sobre otro. Si no lo empujamos continuamente, al cabo de un cierto tiempo se detiene. Inicialmente el cuerpo tenía una dada energía cinética. Todas sus partes se estaban moviendo de manera acorde en una dirección y al final se detuvo. El proceso es irreversible, ya que nunca vamos a ver que ese cuerpo empiece a moverse espontáneamente en alguna dirección. Sin ayuda externa no va a aparecer movimiento nuevamente. ¿Qué sucedió con la energía que tenía? Al impulsarlo le impartimos una cierta energía cinética, todas sus partes se movieron en una dirección. ¿Qué ocurrió en el proceso de frenado? Por efecto del roce, la energía cinética del cuerpo se fue transformando en calor. Finalmente toda la energía cinética terminó transformándose en calor y el cuerpo se detuvo porque consumió toda la energía cinética debida al movimiento. Hubo una transformación de esa energía cinética en calor. ¿Qué ocurrió microscópicamente? Inicialmente teníamos el cuerpo que se estaba moviendo en forma organizada en una dirección. Cada una de sus moléculas se movía en esa dirección. Así se comprende el desplazamiento de los cuerpos. Todas sus partículas se mueven en una misma dirección, de manera coherente. Al cabo de cierto tiempo esa energía, la energía de movimiento que tenía, se transformó en calor. Se transformó en agitación térmica de los componentes. La energía cinética que estaba organizada inicialmente porque todas las partes se movían en la misma dirección, se transformó en un movimiento desordenado que es lo que interpretamos como calor en esta visión microscópica de la termodinámica.

Un proceso como el descrito es lo que se llama un proceso de degradación de la energía. La energía se degrada porque al principio está organizada de una manera bien definida y se transforma, se reparte en muy diferentes movimientos individuales de una manera desorganizada. En los procesos ir-

reversibles, donde siempre se manifiesta un aumento de la entropía, hay degradación de la energía.

La irreversibilidad en el ejemplo y a nivel microscópico también se puede entender. Inicialmente, el sólido al moverse, con todas sus moléculas haciéndolo por lo tanto de manera coherente, estaba en un estado interno excepcional. Al detenerse por la fricción, la agitación térmica de las moléculas da lugar a un sinnúmero de posibles estados microscópicos. Estos se corresponden con las diferentes maneras de repartir la energía cinética original entre las moléculas agitadas térmicamente. Decimos entonces que la irreversibilidad a nivel macroscópico tiene origen probabilístico. A fin de conceptualizar esta afirmación, pensemos en el ejemplo de la expansión libre de un gas en un recipiente que consta de dos partes iguales  $A$  y  $B$ . La probabilidad de que una dada molécula esté en la parte  $A$  del recipiente es ciertamente  $P_1 = 1/2 = 0,5$ . Ahora bien, la probabilidad de que 2 moléculas dadas estén en  $A$  es  $P_2 = 1/2, 1/2 = 0,25$  y la probabilidad de que  $n$  moléculas dadas estén en  $A$  es por lo tanto  $P_n = 1/2, 1/2, \dots, 1/2$  ( $n$  veces). Para tener idea de la realidad hay que pensar en números  $n$  de moléculas del orden de  $10^{20}$ . Consecuentemente, la probabilidad de que esa cantidad de moléculas dadas estén en  $A$  es del orden de  $10^{-19}$ . Este es un número tan pequeño que es imposible imaginarlo. En otras palabras, una vez que el sistema llega al estado final en que las moléculas están homogéneamente repartidas entre  $A$  y  $B$ , el tiempo que puede tardar el sistema en repetir el estado inicial (todas en  $A$ ), que será inversamente proporcional a la probabilidad de esa situación, es mucho, pero mucho mayor que la edad del Universo!

Una vez digerido este ejemplo estamos en condiciones de entender que la entropía nos permite cuantificar el desorden de un sistema, o en otras palabras, la falta de información que tenemos sobre él. Es claro que cuanto mayor sea el número de posibilidades a priori que posee un sistema, mayor la falta de información a priori que poseemos, mayor será su entropía (en este caso llamada de información). Es decir, cuantos más sean los estados



microscópicos de un sistema que dan lugar a la misma situación macroscópica, mayor será la entropía, pues ignoramos más acerca de él. El equilibrio entonces se entiende como la situación en que el sistema visita los estados microscópicos más probables, que son los más numerosos y maximizan el valor de la entropía.

Por otra parte debemos señalar que la entropía de un sistema puede eventualmente decrecer durante algún proceso parcial y no provocar una violación de la ley termodinámica. En efecto, esto es normal siempre que la entropía del entorno del sistema aumente al menos en la misma cantidad en que disminuyó la del sistema. Esta situación puede muy bien detectarse en el fenómeno de la vida y sus procesos característicos como son el crecimiento, la reproducción y la evolución. Las células individualmente y los organismos vivos en general sufren procesos mucho más complejos que los que ocurren en sistemas inanimados. Todo organismo vivo es un sistema abierto, es decir, absorbe (y emite) continuamente energía del entorno para poder mantener un grado suficiente de orden y de integración de sus estructuras. Todos estos procesos son claramente irreversibles. Consecuentemente, los organismos vivos nunca están en un estado de equilibrio. La energía disponible por estos organismos en la Tierra es obtenida fundamentalmente por fotosíntesis cuya fuente es el Sol. Las transformaciones energéticas en el Sol proveen gran cantidad de entropía. Una (pequeña) parte de ella es usada para generar y preservar la vida en la Tierra. La entropía provista por el Sol disminuye un poco en el proceso vital, pero la entropía total del Sol más la de los organismos vivientes siempre aumenta.

Concluimos entonces diciendo que naturalmente la entropía crece y por ende la energía se degrada. ¿Terminará el Universo muriendo de inactividad?

## EVOLUCIÓN

La Biología es la Ciencia que estudia el fenómeno que llamamos vida. Por lo tanto se interesa de entidades muy complejas y de gran diversidad. Es una Ciencia experimental que utiliza muy distintos instrumentos de análisis y que también recurre al formalismo matemático. Podemos, para comenzar, preguntarnos qué es la vida, qué es un ser viviente. Pero la Biología no intenta respuestas filosóficas a estas preguntas ni busca encontrar la esencia de la vida. Se contenta con enumerar el conjunto de propiedades y funciones que distinguen un ser vivo de algo que no lo es. Concluye entonces que un ser vivo es una entidad limitada en el espacio y en el tiempo caracterizada por una organización, subyacente en su patrimonio genético; por la posibilidad de metabolizar materia en energía; por ser capaz de reproducirse y finalmente por tener la capacidad de evolucionar.

La posibilidad que tiene un ser vivo de metabolizar materia en energía, le permite mantener esa organización que lo distingue y además le asegura las propiedades de reproducirse y de evolucionar. Debido a que la energía se conserva, la usual expresión que refiere al consumo de energía para la vida debería ser reemplazada por la de degradación de la energía. Queremos de esta manera resaltar que el proceso metabólico transforma energía de alta calidad en energía de baja calidad o degradada. Recordemos que al introducir el concepto de entropía ya habíamos discutido en detalle este aspecto de las transformaciones energéticas. Toda maquinaria, sea orgánica o inorgánica funciona tomando de su entorno una cantidad de energía de buena calidad y restituye a ese ambiente energía de inferior calidad, degradada. Por ejemplo, el motor de un auto utiliza gasolina transformándola en movimiento, en gases de escape y sobre todo en calor, que es la energía de peor calidad.

También habíamos discutido la relación directa entre la calidad de la energía y la cantidad de información que tiene asociada. De modo que los seres vivos se alimentan de la información que posee la energía que consumen, dejando constante la cantidad pero degradándola. Por la relación directa entre información y entropía, concluimos que en el metabolismo se produce

un incremento de la entropía o pérdida de la información. Por esta razón los seres vivos han sido definidos alguna vez como informívoros.

Todo ente viviente, tal como acabamos de especificar, está constituido de células, desde una a un número inmenso. La célula, una especie de recipiente de materia orgánica semi fluida aislada pero en comunicación con el entorno, es el elemento constitutivo central que permite la existencia de vida. Es la estructura fundamental. A pesar de esto, existen elementos típicos y característicos de la presencia de vida, que se observan a nivel de los constituyentes moleculares de las células. Las moléculas orgánicas grandes llamadas por ello macromoléculas, moléculas largas más que grandes en realidad, están formadas por un encadenamiento bastante lineal de unidades elementales. Es el caso de las proteínas, los ácidos nucleicos, los azúcares y los lípidos. Los elementos constitutivos en esos casos se denominan aminoácidos, nucleótidos, azúcares y grasas monoméricas respectivamente. El gran avance de la Biología a nivel molecular surge de observar que la composición de estas cadenas, la secuencia en que aparecen a lo largo de ella los constituyentes, diversifica y especializa a cada macromolécula. Es equivalente al caso de las palabras que surgen de diferentes posicionamientos de las letras del abecedario.

Las proteínas constituyen los componentes químicos esenciales para los seres vivientes. Determinan las estructuras y dan lugar a las funciones vitales. La estructura de cada proteína, cuyos diferentes papeles en el funcionamiento de la vida las distingue, es especificada por el patrimonio genético de cada individuo viviente. Cada cadena de esas macromoléculas está especificada por una porción de ese patrimonio genético que se denomina "gen". Un gen es una dada secuencia de ADN, ácido desoxirribonucleico. Esa secuencia determina específicamente la síntesis de una determinada cadena proteica. El ADN es a su vez una macromolécula constituida por una serie de miles, millones o miles de millones de sólo cuatro tipos de nucleótidos: adenina (A), guanina (G), citosina (C) y timina (T). El ADN, presente en cada cromosoma de cada célula, puede entenderse subdividido en porciones de diferentes longitudes,

que son precisamente los genes. Se estima que el número de genes en un humano es del orden de 50.000. A partir de las diferentes combinaciones de los cuatro nucleótidos A, G, C y T en grupos de tres de ellos codificado en cada gen, determina sin ambigüedad la sucesión de aminoácidos presentes en la cadena protéica. Con grupos de tres nucleótidos se pueden definir 64 tipos diversos de las llamadas tripletas y son más que suficientes para especificar los 20 tipos de aminoácidos existentes. De hecho existen aminoácidos que pueden ser codificados por más de una tripleta. Es una especie de protección o reaseguro contra eventuales alteraciones. Esta correspondencia que hemos descrito constituye el código genético que fue descifrado en los años 60 por Francis Crick (1916-2004) y James Watson (1928-) y constituye un avance inconmensurable en la comprensión científica del mecanismo de transmisión de la vida.

Todos los fenómenos biológicos adquieren sentido, desde un punto de vista científico, si se los encuadra dentro de una perspectiva evolucionista. Desde ella, la comprensión de la impresionante variedad de fenómenos biológicos adquiere unidad. Es la única visión de la biología que permite este análisis y lleva a establecer que una de las cualidades, que como dijimos distinguen un ser vivo, es precisamente su capacidad de evolucionar. La teoría de la evolución forma parte hoy de la Ciencia y nadie la niega. De manera que entendemos que todos los seres vivos que habitan la Tierra son descendientes de un pequeño grupo de organismos cuya existencia se remonta a hace miles de millones de años.

Por detrás de las aseveraciones anteriores está la evidencia que demuestra que todo ser viviente desciende de otro ser viviente. Luego de un eventual comienzo azaroso del fenómeno vital, se generó una cadena de eventos sin solución de continuidad que garantiza por ello a la vida. Está claro también que a lo largo de ese tiempo tan prolongado, los seres vivos han sufrido continuos cambios, este es precisamente el significado de la evolución.

La teoría de la evolución a la que adherimos contemporáneamente es na-

da más que la versión modernizada de la teoría de la evolución por variaciones y selección natural que gestó Charles Darwin (1809-1882).

La evolución trabaja a nivel de los genes. De hecho, la presencia de ojos de un dado color en un individuo, la diferencia entre una vaca y un caballo o las diferencias entre variedades de manzanas tiene su origen en los genes. La evolución depende de la manera en que los genes son copiados y transferidos de una generación a la próxima, lo que reconocemos como herencia. Lo importante de comprender es que el proceso de copiado y transferencia si bien es bastante confiable no es perfecto. El heredero se parece ciertamente a sus progenitores y a los miembros de su especie (reconocemos a los hijos de elefantes como elefantes) pero presenta diferencias. En cada generación aparecen continuamente individuos con características nuevas que lo diferencian. Este hecho se debe a que continuamente se presentan mutaciones en alguno de los genes. Además, está siempre presente la competencia entre individuos, lo que asegura una selección natural entre ellos, selección que se producirá entre las numerosas variaciones que surgen en cada generación.

La teoría de la evolución basa su sustento científico en su capacidad de dar cuenta de varios hechos experimentales. En primer lugar es capaz de explicar la variedad de los seres vivos y su ubicación geográfica. Es decir, explica los millones de especies diferentes que viven en los más diversos ambientes naturales. Se usa decir que cada organismo vivo se encuentra en su propio nicho ecológico. Este varía tremendamente en cuanto a condiciones climáticas; altura; tierra, aire o agua; día y noche, etc, etc. En resumen, la teoría de la evolución puede dar cuenta de la diversidad de manifestaciones de vida sobre la base de la aparición continua de variaciones en las sucesivas generaciones y la diferente adaptabilidad de cada individuo a las condiciones en que le toca vivir, cómo se adapta al ambiente. En segundo lugar, la teoría explica esa adaptación a las condiciones circundantes, proceso que se conoce como especialización, la que deberá darse en la justa medida. En efecto, esta propiedad deberá ser capaz de soportar cambios de alguna intensidad para

no transformarse en una condición negativa para la supervivencia que llevaría a la extinción de la especie correspondiente. En tercer lugar, la teoría permite comprender que la adaptación a nuevas condiciones del ambiente da lugar naturalmente a la innovación biológica. Más aún, permite entender las eventuales discontinuidades dentro del comportamiento continuo de la evolución de los seres vivos. Estas discontinuidades, cuando acompañadas por una adecuada adaptación a las condiciones externas, da lugar a la innovación. Como ejemplo de esta acción valga recordar la aparición de alas en los insectos. Hemos comprendido que sin continuidad no se puede pensar en el mantenimiento de la vida, pero sin la posibilidad de innovación, sólo tendríamos vida elemental tal como en su inicio. Finalmente, un aspecto importante de la evolución es su carácter irreversible, de modo que ella también define o acompaña la flecha del tiempo ligada al incremento de entropía que ya discutimos.

Estamos en condiciones ahora de hacer un breve resumen del conocimiento científico del que disponemos hoy sobre el proceso evolutivo. De una manera general podemos formalizar estos saberes en los siguientes términos:

- Todos los seres vivos actuales descienden de los seres vivos primordiales a través de una cadena ininterrumpida de generaciones de otros seres vivos.
- Las características biológicas de los individuos de cada especie, en cada momento evolutivo, son prácticamente idénticas y están codificadas en sus correspondientes patrimonios genéticos.
- No todos los individuos de una dada especie tienen el mismo éxito reproductivo debido a las particularidades de cada patrimonio genético particular. El éxito reproductivo diferenciado entre varios individuos se dice que constituye una selección natural cuando se debe a la acción selectiva del ambiente.

- En general, los individuos de una dada generación pueden ser diferentes a los de las generaciones precedentes. Esta diversidad puede estar ausente o puede fluctuar dejando entonces la situación sin cambios o con cambios que pueden ser de grandes proporciones y acumulables. Como consecuencia, en sucesivas generaciones los individuos de una dada especie pueden adquirir características biológicas diferentes y también dar lugar a diferentes especies.
- Las variaciones genéticas son generadas fundamentalmente por mutaciones que son eventos, en general, casuales.

Vale la pena insistir sobre el valor científico de la teoría de la evolución. De hecho, como ya lo hemos comentado antes, la evolución como teoría ensambla hechos observados, principios físicos y científicos en general, predicciones y conclusiones absolutamente comprobables. Nadie duda hoy de la validez de los aspectos centrales de la teoría, aunque existan algunos aspectos claramente provisionarios. En general, las dudas son levantadas desde que las conclusiones surgen de observaciones más que de experimentos. Estos a veces implicarían larguísimos tiempos o serían impracticables. Sin embargo debemos recordar lo que discutimos en la introducción cuando hablamos de observaciones con método como base del conocimiento científico. Este es el caso. La teoría neodarwiniana de la evolución biológica está de acuerdo con todas las observaciones y permite predecir y explicar siempre nuevos fenómenos.

Otra duda que podemos plantear se refiere a las causas que promovieron y promueven la evolución biológica y aseguran la continuidad de los seres vivientes. Podríamos preguntarnos qué causas fuerzan a los organismos vivos a superar las continuas pruebas que le impone el medio ambiente para sobrevivir. La respuesta es simplemente nada. Sucede porque sucede. Podría ocurrir una superposición de mutaciones que lleve a la desaparición de una o todas las especies o puede muy bien continuar la secuencia de generaciones.



Es importante tener claro que la Naturaleza no razona, no actúa como nuestro cerebro. Ninguno de los organismos vivos fue proyectado. Los seres vivos de hoy son el resultado de una sucesión de eventos evolutivos fortuitos. Fue así porque se dieron las circunstancias concurrentes de la necesidad de conservación de organismos capaces de sobrevivir por un lado y la aparición de nuevas variedades biológicas a partir de la presencia de errores en la transmisión del patrimonio genético por otro. Consecuentemente, en Biología, no siempre lo que aparece beneficioso a la luz de nuestro razonamiento, lo es desde el punto de vista de la evolución. La vida como tal se defiende. No permite fácilmente alterar su equilibrio. Todo sistema vivo tiende a resistir los cambios bruscos. La introducción forzada de nuevos elementos produce generalmente como reacción una vuelta atrás a las condiciones iniciales. Esta observación hace que sea aventurado afirmar, por ejemplo, que las técnicas de intervención biológica, la producción de transgénicos, conducen necesariamente a desastres ecológicos. Si bien no se puede excluir que la manipulación genética produzca modificaciones ambientales desproporcionadas, no se trata de una eventualidad muy probable. Los sistemas biológicos tienden fundamentalmente a la conservación y no al cambio. Reaccionan tratando de anular los efectos perturbadores.

Una interesante observación se refiere a los vectores de enfermedades como son las bacterias, los virus o los parásitos en general. Debemos tener claro que éstos no tienen como objetivo producir problemas a los seres vivos o menos aún destruirlos. Estos parásitos no tienen ninguna intención de destruir al organismo que lo hospeda y lo alimenta. Los virus alcanzan con el tiempo condiciones de menor virulencia a fin de convivir y coevolucionar con el sujeto vivo en el que residen. Esta observación permitiría prever, por ejemplo, que el virus HIV mismo se tornará menos virulento en el corto plazo.

Finalmente debemos decir que el envejecimiento y la muerte no son necesarios desde el punto de vista evolutivo. Simplemente suceden porque la Naturaleza se desinteresa de lo que sucede a los individuos después de su

reproducción. Por ello comienzan a desaparecer los mecanismos biológicos de reparación ligados a la selección. Se muere por casualidad, como todo lo que ocurrió desde la aparición de la vida en el planeta. Sólo nuestra imaginación produce eventos que parecen suceder desafiando al azar.

Todo esto lo expuesto permite concluir sin duda que la teoría de la evolución no es simplemente una teoría en el sentido literario del termino, sino una teoría científica ya que posee a la observacion experimental como claro criterio de validación.

## SIMETRÍA

Las consideraciones de simetría siempre proveyeron a la Ciencia de herramientas poderosas y muy útiles. Más aún, como ya adelantamos, la simetría se ha transformado hoy en la base de la formulación teórica de las leyes físicas que rigen las interacciones fundamentales de la Naturaleza. En lugar de centrar la discusión sobre las “partículas elementales” y sus interacciones, hoy deberíamos referirnos en primer lugar a las “simetrías fundamentales”.

La presencia de simetrías implica la imposibilidad de observación de ciertas magnitudes y correspondientemente garantiza leyes de conservación (magnitudes físicas que no cambian con el decurso del tiempo) y reglas de selección (que prohíben la realización de ciertos procesos). En consecuencia, cuando un, a priori, “no-observable” se torna realmente observable, estamos en presencia de la violación, el no cumplimiento estricto, de la correspondiente simetría, lo que llamamos una asimetría. Como correlato de los avances en las técnicas experimentales se va mejorando sensiblemente la capacidad de observación y por ello se incrementa la posibilidad de detectar asimetrías.

Revisamos entonces el estado actual de las diferentes simetrías y asimetrías encontradas en la Naturaleza.

La palabra simetría la heredamos del término griego *summetria*, compuesto de *sum*=con, junto y de *metron*=medida. De modo que el significado original de simetría se relaciona con una relación de conmensurabilidad. Platón en el *Timeo* dice “aquella conexión que con los elementos que conecta produce la mayor unidad posible y al mismo tiempo genera una proporción (= simetría) que es la más bella”. Esta frase nos indica que simetría estaba, desde sus orígenes, ligada al concepto de armonía, unidad y belleza. Luego del Renacimiento surge una nueva concepción de simetría no ya ligada a las proporciones sino a las relaciones de igualdad entre elementos opuestos. Por ello, para la experiencia más simple, simetría, además de sinónimo de armonía, se refiere a la simetría bilateral, o derecha-izquierda y traduce la presencia de un plano de simetría, detectable en los seres vivos y en sus realizaciones. Sin embargo, por detrás de esta observación, pre-científica si se quiere, se puede

percibir además del carácter puramente geométrico, la presencia de alguna dinámica a través de la participación de fuerzas. En efecto, en la observación de simetrías hay direcciones privilegiadas como la que brinda el eventual movimiento del objeto o la mera atracción gravitatoria. Más aún, la simetría se plantea como necesidad interior o psicológica y consecuentemente da lugar como ya dijimos a fuerzas “inducidas” como lo es la acción compulsiva que la mayoría de nosotros llevamos a cabo cuando enderezamos un cuadro que cuelga torcido en la pared.

A poco de andar podemos distinguir entre simetrías geométricas y simetrías físicas. Las primeras se refieren a las simetrías de las formas de los objetos en el espacio, en tanto que el calificativo de físicas singulariza a aquéllas que tienen que ver con las leyes de la Naturaleza.

Una simetría geométrica en el espacio, o mejor, una transformación de simetría espacial de un objeto geométrico es, matemáticamente hablando, una isometría que lleva al objeto a una situación indistinguible de sí mismo, de modo que el objeto posee una invariancia. Es decir, una operación que deja al objeto invariante cuando partes componentes iguales son intercambiadas según una regla dada.

El conjunto de transformaciones de simetría como las rotaciones, traslaciones o reflexiones conforma en cada caso una estructura matemática llamada grupo, con toda las implicaciones que esta identificación conlleva. La definición de simetrías en términos de grupos permite imaginar las operaciones no solamente sobre figuras matemáticas sino también sobre objetos abstractos como son las expresiones matemáticas, en particular aquellas de las leyes físicas.

Por ello, se habla de la presencia de simetrías de las leyes de la Naturaleza, implicando que podemos hacer algo (una operación) a una ley física, o a nuestra representación formal de la ley, sin que se provoquen cambios en la forma de la ley. Es decir, sus efectos no conducen a alteraciones de la forma matemática que expresa un dado comportamiento de la Naturaleza.

Más formalmente, una transformación de simetría de una ley física es un cambio de las variables dinámicas y/o de las coordenadas en términos de las cuales se expresa la ley, de modo que las ecuaciones correspondientes conservan la forma cuando expresadas en las nuevas variables y coordenadas. Así surge la propiedad de covariancia de las leyes físicas.

El análisis teórico de las simetrías en la Física, podría partir de clasificarlas ahora en espacio-temporales e internas. Las primeras se corresponden con transformaciones que operan sobre las coordenadas espacio-temporales -diferentes situaciones de observación-, en tanto que las internas afectan sólo a las variables dinámicas o a los operadores -diferentes cualidades de los observables-. En general, estas últimas no tienen conexión con el espacio-tiempo y son denominadas globales (la misma en cualquier punto). Cuando a los parámetros que identifican la transformación interna se los hace depender del espacio-tiempo, el caso llamado local, la simetría se denomina de “gauge”. El hecho notable es que para garantizar la simetría local de gauge de una ley física es imprescindible introducir campos de fuerza adicionales, los que generarán naturalmente interacciones. Ese mecanismo permite formalizar coherentemente las interacciones fundamentales presentes en la Naturaleza.

Para llegar a una comprensión física de las simetrías y asimetrías, con el correspondiente análisis de sus consecuencias, vamos a comenzar recordando conceptos básicos ligados a las partículas y a sus interacciones.

Partiremos del innegable “punto de partida” que nos provee Newton al decir: “Las partículas más pequeñas de la materia pueden adherirse por atracciones fuertes para componer partículas mayores con una “virtud” más débil” (y así siguiendo...).

En la época de Newton la única “virtud” conocida era la gravitacional, la que adquirió precisamente con él, carácter universal. Esta universalidad incluye también, gracias a Einstein y su ecuación  $E = mc^2$ , a la energía (la luz). Las otras “virtudes” que hoy conocemos con el nombre genérico de cargas, son la fuerte, la electromagnética y la débil. Ellas no presentan la

universalidad de la gravitatoria ya que poseen gran selectividad. En particular, con referencia a las interacciones fuertes, toda la materia es clasificable en quarks que la sufren y leptones que no la sienten. La electromagnética nos permite distinguir entre materia eléctricamente cargada y neutra. Finalmente la interacción débil separa básicamente la izquierda de la derecha.

Esta selectividad hace natural la introducción del concepto de carga que mencionamos, para rotular y cuantificar "virtudes". Como características de las partículas podemos decir entonces que poseen carga fuerte, electromagnética y débil. Este concepto de carga tiene además importancia desde el punto de vista dinámico ya que las diferentes fuerzas físicas están determinadas por la magnitud de esas cargas.

En otro orden de cosas, la presencia de una simetría está directamente ligada a una ley de conservación, es decir, algo que no cambia cuando evoluciona en el tiempo. Y una tercera propiedad que emerge de la presencia de una simetría es, como dijimos, la no observabilidad. De hecho, en la base de todos los principios de simetría subyace la suposición de que es imposible observar ciertas cantidades básicas, que a veces son llamadas no-observables. Hay ciertamente muchos ejemplos, de los cuales mencionamos sólo la indistinguibilidad (no observabilidad de diferencias) de las partículas idénticas ligada a la simetría de permutación entre ellas o la condición de no-observable de la velocidad absoluta relacionada con la simetría Lorentz de la Relatividad. Esta propiedad de no observabilidad nos indica de inmediato que en muchos casos las asimetrías son necesarias a fin de comprender la observación empírica, cuando se da, de los no-observables correspondientes, garantizados por invariancias.

La formulación explícita de estos argumentos se debe a Pierre Curie (1859-1906) . Ellos pueden resumirse diciendo que un dado fenómeno puede ocurrir no por la presencia sino por la ausencia de ciertas simetrías. Curie decía: "la asimetría es quien crea el fenómeno".

Más aún, los elementos de simetría de las causas deben encontrarse en los

efectos, aunque no vale la aseveración inversa. El principio de Curie, como se conoce a la afirmación anterior, tiene implicaciones importantes. Por un lado provee reglas de selección ya que si la situación de partida tiene dadas simetrías, sólo algunos fenómenos ocurrirán. Por otra parte genera criterios de falsación para las teorías físicas ya que si el principio se viola, habría indicación de que algo en la teoría está errado.

Otro aspecto de la presencia cotidiana de la simetría que ya discutimos oportunamente al tratar la entropía, está en el hecho de que la descripción simétrica bajo inversión temporal presente en la dinámica microscópica (de átomos, etc.) conduce a una evolución temporal asimétrica de los sistemas macroscópicos. Origina la presencia de irreversibilidad.

Podemos ahora coleccionar un conjunto de preguntas que nos ayudan a repensar los conceptos claves ligados a las simetrías. Comenzamos preguntando a qué están asociadas las simetrías y nos encontramos con que ellas pueden ser de las ecuaciones que rigen el movimiento, de las condiciones de contorno que especifican dónde y desde cuándo evolucionan o de las soluciones de esas ecuaciones. Luego podemos preguntarnos a qué escala se presentan. Allí responderíamos a escala microscópica o macroscópica, a bajas o altas energías, a bajas o altas temperaturas, etc.. La pregunta a qué nivel de descripción física están presentes, tiene como respuestas el clásico o el cuántico. En tanto que si preguntamos sobre su calidad responderemos exacta, aproximada o rota. En este último caso podremos diferenciar entre la ruptura explícita, simetría anómala y la ruptura espontánea o simetría latente.

Analizamos un poco más estas últimas posibilidades mencionadas. La ruptura explícita surge de la presencia en el sistema de una parte manifiestamente no invariante. La ruptura anómala se presenta cuando ciertas simetrías de la teoría a nivel clásico, no mantienen su presencia cuando la teoría es cuantificada, es decir se la adapta al nivel atómico. De esa manera aparecen las llamadas anomalías que tienen consecuencias nefastas, impidiendo la realización del proceso formal que da sentido a las teorías microscópicas.



Finalmente se puede estar en presencia de una ruptura espontánea, o como preferimos decir, que la simetría se manifieste en forma latente, cuando las soluciones físicas poseen menor simetría que las ecuaciones de movimiento. Esta situación está caracterizada por su aparición espontánea y la pérdida de la simetría no es total ya que ella queda escondida, o latente, en las ecuaciones. En efecto, las varias soluciones no simétricas están conectadas entre ellas mediante la operación de simetría. En algún sentido, la simetría latente es una manifestación platónica por cuanto la realidad observada en este caso refleja de manera imperfecta a una “realidad” más simétrica representada por las ecuaciones.

Vamos a concentrarnos ahora en las simetrías físicas ligadas a operaciones discretas. Comenzaremos recordando la paridad  $P$ , o reflexión espacial, que establece que el espacio no tiene orientación intrínseca y que comunmente se menciona como simetría izquierda-derecha. En efecto, existiendo  $P$  como simetría, no son observables ni la derecha ni la izquierda absolutas: el metro patrón mide un metro si lo medimos de izquierda a derecha o de derecha a izquierda. También Alicia es igual a ambos lados del espejo.

Ligada a la presencia de antimateria surge la simetría  $C$  de conjugación de la carga. Debido a esta simetría, “antifísicos” de “antiplanetas” realizando experiencias iguales a los físicos en nuestro planeta deben deducir iguales leyes. La antimanzana del antiárbol también le produce un chichón a antiNewton. Por ello, si no hay contacto materia-antimateria resulta a priori imposible saber de qué estamos hechos.

Parece de interés ahondar brevemente sobre este punto recordando que la Mecánica Cuántica junto a la Relatividad nos hicieron el regalo de la antimateria: correspondiente a cada partícula existe una antipartícula. Como ya dijimos, las antipartículas poseen igual masa, igual vida media pero cargas opuestas a las partículas.

Finalmente mencionamos la validez de un teorema fundamental, el teorema  $CPT$  que establece que bajo condiciones muy generales de simetría (lla-

mada de Lorentz-Poincaré), dentro del marco de la Mecánica Cuántica Relativista, la simetría producto de las tres operaciones discretas mencionadas, CPT, que convierte evidentemente estados iniciales de partículas entrantes en estados finales de antipartículas salientes, es exacta. En otras palabras, si un sistema pasa de un estado inicial a uno final y recordamos que C transforma una partícula en una antipartícula, P se corresponde con la inversión de la parte espacial del impulso y T implica el intercambio de los estados inicial y final con la correspondiente inversión del sentido de los vectores de impulso y espín que caracterizan al estado, concluimos que partículas entrantes son absolutamente equivalentes a antipartículas salientes.

Sobre la base de los conceptos introducidos nos referiremos ahora a la problemática de la materia y la antimateria que puede parafrasearse en la pregunta de por qué estamos aquí. En principio los filósofos analizan y ponderan el proyecto humano y su destino. Los científicos simplemente quieren saber por qué todo tiene composición material. Debemos percibir que, en efecto, esta no es una pregunta trivial ya que a priori no hay buenas razones para que exista materia.

En efecto, la bien conocida, y a veces vituperada, ecuación de Einstein  $E = mc^2$ , debe leerse diciendo que energía es igual a materia más antimateria. En efecto, allí aparece la energía que no tiene rótulos de carga en tanto, como ya dijimos, la materia está caracterizada por esas cargas que la identifican como “virtudes” a la Newton. Consecuentemente, a partir del Big Bang debemos esperar que en el Universo el número de partículas sea igual al número de antipartículas.

Los ingredientes de la “sopa primordial” eran 56 % de quarks-antiquarks, 16 % de gluones-antigluones, 9 % de partículas tipo electrón y positrón (leptones cargados), 9 % de W y Z, 5 % de neutrinos-antineutrinos, 2 % de fotones, 2 % de gravitones y 1 % de bosones de Higgs. El balance materia-antimateria perfecto. Sin embargo, hoy estamos rodeados solamente de materia y la antimateria aparece sólo producida en los laboratorios. Vale entonces

la pregunta de por qué quedó más materia o lo que es equivalente, ¿por qué existimos? Una respuesta factible (a lo físico) parece surgir de la existencia de violaciones de la simetría fundamental CP. La Naturaleza presenta una asimetría CP y por ello podemos decir que el mundo hecho de materia es diferente del mundo hecho de antimateria y entonces sobrevivió en lugar de aniquilarse.

La falta de antimateria está comprobada a partir de datos de masas galácticas, de la nucleosíntesis primordial (cantidad de deuterio y de helio) y de la radiación de microondas de fondo. Esta información permite concluir que hubo una asimetría bariónica primordial. Este resultado, unido al hecho de que nuestro Universo es eléctricamente neutro implica que existan más electrones que positrones. Sakharov (a fines de los 60') mostró que es posible generar dinámicamente aquella asimetría bariónica de modo que surja de procesos primordiales. A fin de que se produzca la asimetría, la teoría subyacente debe violar la conservación del número bariónico B, así como la simetría C y la CP.

Pasemos a recorrer ahora el camino de llegada de la asimetría esencial a nuestra existencia. En los años cincuenta el estudio de la interacción débil (radioactividad) cuyo ejemplo paradigmático es el decaimiento del neutrón, mostró que la "virtud" correspondiente viola la simetría P. En efecto, esta violación es máxima ya que todos los neutrinos son izquierdos y todos los antineutrinos derechos. Pero además la interacción débil viola C. De modo que no sólo nos permite distinguir izquierda de derecha sino también materia de antimateria. A pesar de la presencia de estas asimetrías parecería conservarse el producto CP. Esto significa que en un planeta reflejado en el espejo valdrían las mismas leyes si estuviese hecho de antimateria. Así las cosas, en 1964 se produce la gran conmoción cuando Cronin y Fitch midieron experimentalmente ciertos decaimientos de partículas inestables que son asimétricos CP.

Para finalizar volveremos al mundo macroscópico para insistir sobre la

importancia vital de las asimetrías. En particular haremos algunos comentarios sobre la violación derecha-izquierda. Este aspecto suele llamarse quiralidad y por asociación no podemos resistirnos a la “militancia científica” para mencionar, peyorativamente esta vez, la palabra quiromancia que etimológicamente descende del griego (mano y adivinación) y significa precisamente “adivinación vana y supersticiosa por las rayas de la mano”...

Existe una gran cantidad de moléculas llamadas quirales. Ellas aparecen en formas asimilables a la imagen izquierda que de la derecha brinda el espejo, o viceversa. En el caso de moléculas de materia no viva, el número de moléculas de una dada clase asimilables a la derecha es igual al de las izquierdas de la misma clase, en lo que se llama una mezcla racémica. Por el contrario, la vida “usa una sola mano”. Las moléculas de la materia viva son homoquirales. Esta es la única manera de garantizar los encuentros moleculares correctos. De hecho, se observa que las proteínas están fabricadas sólo con aminoácidos izquierdos, los que son codificados por ADN helicoidales derechos conteniendo sólo azúcares derechos.

Es interesante entonces recordar que el electromagnetismo tiene un tratamiento teórico coherente unificado con la interacción débil, aún cuando hay tres órdenes de magnitud de diferencia entre sus intensidades relativas. Lo que decimos es que cuando actúa el electromagnetismo, también actúa la fuerza débil. Justamente esta última interacción es asimétrica de paridad: viola  $P$  y sus consecuencias son detectables en los espectros atómicos. En nuestro análisis presente interesa percibir que ella produce una pequeña diferencia energética entre moléculas izquierdas y derechas. Esta semilla de asimetría puede ser luego amplificada por reacciones autocatalíticas. En una reacción autocatalítica la presencia de una “mano” estimularía entonces su producción inhibiendo la producción de su imagen especular. Se trata en algún sentido de un mecanismo dinámico similar al sugerido por Sakharov para el origen de la asimetría materia-antimateria. En muchas reacciones biológicas aparece esta característica y por ello la Biología provee un amplificador de un eventual

exceso de un tipo sobre otro. Este podría muy bien ser el mecanismo que da lugar a la homoquiralidad.

Habríamos encontrado entonces una huella de la física fundamental directamente a nivel molecular.

Nos resta todavía discurrir sobre posibles mecanismos para la elección natural de la mano adecuada. A este respecto es muy interesante comentar que recientemente se detectó radiación infrarroja fuertemente polarizada proveniente de la región de formación de estrellas OMC-1 en Orion. Esta radiación infrarroja polarizada circularmente y de corta longitud de onda, podría haber inducido asimetría quiral en moléculas orgánicas interestelares las que habrían subsecuentemente llegado a la tierra via cometas o meteoritos. Este hecho podría estar en la base del exceso de aminoácidos izquierdos encontrados en el meteorito Murchison y daría una explicación del origen de la homoquiralidad de las moléculas biológicas.

Nada mejor para terminar que recordar la frase de Louis Pasteur (circa 1880): “La vida tal como se nos manifiesta es una función de la asimetría del Universo y sus consecuencias ... puedo imaginar que todas las especies vivientes son primordialmente, en su estructura y en su forma externa, función de la asimetría cósmica”.

CAOS

A fines del siglo XX se tomó conciencia de que existen numerosos sistemas con pocas partículas para la descripción de los cuales se necesita el uso de probabilidades. Estos son los llamados sistemas caóticos o que presentan caos determinista. En ellos las trayectorias no son predecibles con exactitud para tiempos largos. Esto se debe a la sensibilidad extrema de estos sistemas a los cambios en las condiciones iniciales de su evolución temporal. Las predicciones son aproximadamente deterministas sólo para tiempos cortos, tiempos menores a algún tiempo característico cuyo valor depende de cada sistema particular. Por ejemplo consideremos el análisis del movimiento de bolas de billar. Luego de cada choque se torna ciertamente más difícil predecir la posición de cada una de ellas.

El estudio de estos sistemas caóticos parte del análisis de los llamados sistemas dinámicos. Se trata de la descripción y comprensión de procesos que implican cambios temporales. Ocurre que muchos sistemas dinámicos, como son por ejemplo las fases de la luna o las mareas, son predecibles. Es decir, conociendo las condiciones iniciales de un dado sistema, se puede predecir con precisión cómo se comportará éste en su evolución temporal. Ciertamente esta predicción se basará en cálculos matemáticos ligados a las ecuaciones que rigen esa evolución. Como ejemplo podemos mencionar el movimiento de los planetas del sistema solar que constituye, básicamente, un sistema dinámico predecible. Conociendo la posición de los planetas hoy y realizando los cálculos apropiados podemos determinar sus posiciones mañana, dentro de diez años o dentro de mil años. Sobre esta base es que existen, por ejemplo, tablas de eclipses a producirse en el futuro.

Existen otros sistemas dinámicos de los cuales no es posible predecir el comportamiento a largo plazo con suficiente precisión. Estos son los sistemas dinámicos caóticos o que presentan caos. Cuando este es el caso, aparece una dependencia “exagerada” con las condiciones iniciales del proceso. Muy pequeños cambios (casi imperceptibles) de las condiciones en que comienza la evolución temporal, producen grandes cambios en la situación final. Estos

sistemas parecen manejados por el azar, aún cuando no es estrictamente el caso. Un ejemplo cotidiano de este tipo de sistemas lo constituye la atmósfera. Sabemos que los meteorólogos usualmente sólo pueden hacer predicciones climáticas con cierta confiabilidad si se refieren al futuro muy cercano.

La presencia de estos comportamientos llamados caóticos está directamente ligada con una propiedad matemática llamada fractalidad.

Para tener una noción un poco más precisa de estos conceptos vamos a transitar por la Matemática. En el Siglo XVII, Newton y Leibnitz inventaron el Cálculo, llamado posteriormente Análisis Matemático. Antes del Cálculo existía la Geometría que implicaba rectas, planos, círculos, esferas, parábolas, etc. Cuando aparece el Cálculo, nace el concepto de continuidad y analiticidad. Se percibe que cualquier curva o cualquier superficie puede ser analizada y descrita con precisión si es suficientemente suave. En otras palabras, el Cálculo se aplica a curvas y superficies que no presentan discontinuidades serias. En relación con esa continuidad se pueden definir operaciones infinitesimales (en distancia tan pequeñas como se desee) como son las derivadas y las integrales. Sobre este Cálculo o Análisis Matemático se desarrolló entonces el formalismo de la Física. Así se escribió la Mecánica Clásica, el Electromagnetismo, la Relatividad y la Mecánica Cuántica. En algún sentido se piensa que en el fondo todo es suave. Por detrás de esta afirmación está la observación que muestra que al realizar un análisis de curvas o superficies en partes cada vez más pequeñas, estas partes resultan cada vez más simples. Eventualmente toda curva suave puede pensarse como una sucesión de trozos de recta y una superficie suave cualquiera como una superposición de trozos de planos.

Sin embargo, el Cálculo tiene limitaciones por cuanto existen sistemas donde esas propiedades no se presentan y por el contrario manifiestan una extremada sensibilidad a las condiciones iniciales. Estos son los sistemas dinámicos caóticos. La evolución de estos sistemas caóticos si bien obedece a leyes deterministas, presenta un comportamiento tan irregular que los hace



aparecer como aleatorios. En general se encuentra que son predictibles sólo a corto o a muy corto plazo. Como dijimos, para tiempos cortos, menores a algún tiempo característico de cada sistema particular.

En cualquier caso, para poder predecir el comportamiento dinámico futuro de un dado sistema es necesario conocer de forma exacta sus condiciones iniciales. Sin embargo esto no es posible ya que nunca se puede medir sin error. De modo que durante la evolución se va perdiendo sistemáticamente exactitud en la predicción. En los sistemas que podemos llamar normales, aquel error no se amplifica con el transcurrir del tiempo y las predicciones son útiles. En los sistemas caóticos, por su exagerada sensibilidad a las condiciones iniciales, el error se va amplificando de forma monótona y se va perdiendo predictibilidad. El comportamiento dinámico termina siendo irregular y se denomina caótico.

La extrema sensibilidad de la evolución de los sistemas caóticos con las condiciones de partida, es caricaturizada por el llamado “efecto mariposa”: el aleteo de una mariposa en algún lugar de la Tierra puede generar una tormenta en las antípodas... Otro ejemplo interesante de comportamiento caótico lo brinda la masa llamada milhojas ya que dos granos de sal colocados inicialmente casi juntos pueden terminar luego de preparar la masa, tan alejados como se quiera.

La representación espacial de un sistema caótico se denomina fractal. Un fractal es una figura geométrica que no se simplifica cuando se analiza en partes cada vez menores. En otras palabras, no es suave en el sentido descripto arriba. Esta propiedad de los fractales los hace auto-similares, es decir, sucesivas ampliaciones de la figura espacial reproducen la misma estructura que se tenía previamente. Esta reproducción puede ser a nivel de identidad o puede tratarse de una similitud estadística, en algún sentido de promedio.

Es interesante observar que en general nos sentimos atraídos por las figuras fractales como son la arborescencia de un pino, la hoja de un helecho,

etc. Esta preferencia de los fractales frente a otras figuras está conectada con su presencia en la Naturaleza donde abundan. Ciertamente son fractales aproximados a los definidos matemáticamente.

La presencia de caos en el sentido en que hemos discutido, se detecta en sistemas dinámicos que satisfacen ecuaciones de movimiento no lineales. Es decir, cuando las variables que definen la evolución aparecen elevadas a potencias mayores a la unidad.

Finalmente podemos preguntarnos qué aprendemos del caos. Lo más importante de destacar es que los sistemas caóticos muestran que ecuaciones simples pueden dar lugar a soluciones complicadas. Una especie de anti-cartesianismo. En efecto, vimos que muy pequeños cambios en un punto pueden provocar consecuencias inmensas, provocar catástrofes a largas distancias. De este análisis también surge que es dable esperar que la mayoría de los sistemas reales, donde aparecerán ciertamente efectos no lineales, no sean totalmente predecibles a tiempos suficientemente largos.

Cuando los fenómenos que estamos comentando fueron descubiertos, el movimiento caótico fue considerado casi como una rareza matemática. Sin embargo, recientemente se ha detectado que el comportamiento caótico se encuentra en cualquier ámbito. Como dijimos, su presencia en la Naturaleza es muy abundante.

Como caso pionero en este camino debemos mencionar en particular los estudios realizados por Edward Lorenz, quien en 1963 usó estas ideas para generar un programa de computadora para analizar el fenómeno climático. Surgió así un modelo para tratar el movimiento ascendente y descendente del aire cuando la atmósfera es calentada por el Sol. Lorenz encontró que su modelo daba lugar a resultados drásticamente diferentes cada vez que reiniciaba el cálculo aún con valores iniciales para los parámetros de entrada que a priori parecían idénticos. De hecho estos valores eran levemente diferentes, diferencias ligadas a la precisión con que trabajaba la computadora. Aquí se presentaba claramente el sello característico del caos determinista. Hoy en-

tendemos que las corrientes de aire y el clima como un todo son sistemas caóticos por cuanto tienen una dependencia extrema de las condiciones iniciales del proceso. De aquí la gran dificultad que existe para predecir con precisión las condiciones climáticas a largo plazo.

La presencia de comportamientos caóticos ha llevado a poder afirmar que no hay prácticamente diferencia alguna entre el comportamiento del sistema solar, el de una epidemia, el de la atmósfera terrestre, el de la población de grillos en Africa, la del mercado financiero o el de la aparición de manchas solares, por mencionar algunos. Claro que, como dijimos al comienzo, cada uno de estos sistemas tendrá un tiempo característico de comportamiento determinista antes de tornarse caótico. Estos tiempos serán muy diferentes entre sí. Por esta razón es posible predecir el momento en que ocurrirá el próximo eclipse de Luna o de Sol pero no es posible decir si lloverá dentro de un mes en horas de la mañana.

Volvemos ahora a la discusión que venimos haciendo a lo largo de toda nuestra presentación acerca del concepto de predicción. Podemos todavía ir más lejos en la utilización de este concepto para incluir el análisis científico de los llamados sistemas complejos. En este caso el comportamiento depende de manera crucial de los detalles constitutivos del sistema. Dependencia que en general será difícil de comprender. Los sistemas complejos no son solamente sensibles a las condiciones iniciales sino fundamentalmente a la forma de las ecuaciones dinámicas de movimiento. Por ello manifiestan muy diversos comportamientos. El sistema complejo animal duerme, come, corre, caza, se reproduce, etc. Sin embargo, a pesar de la complejidad todavía se pueden hacer predicciones sobre su comportamiento. Estas predicciones no pueden ser probabilísticas ligadas al propio sistema. Están referidas a la distribución de probabilidades de propiedades que varían de sistema en sistema. Por ejemplo, no se pueden testear propiedades de una única proteína o de un solo perro.

En resumen, un sistema es caótico cuando presenta sensibilidad extrema

de su trayectoria a las condiciones iniciales y por ende es necesario estudiar distribuciones de probabilidad de comportamiento para tiempos largos. Este comportamiento es calculable a partir de las ecuaciones de movimiento. Por otra parte en los sistemas complejos nos encontramos con una sensibilidad extrema a los detalles de la ecuación de movimiento y por ende debemos estudiar la distribución de probabilidades de comportamiento. Esto será calculable a partir de una distribución de ecuaciones de movimiento de diferentes sistemas.

## UNIVERSO

El Universo, todo el espacio-tiempo en el que existimos y toda la energía y la materia en él contenida, ha sido y es motivo de curiosidad central para la humanidad. Esta inquietud, origen de la actitud científica, nos lleva inmediatamente a preguntarnos sobre el origen, evolución, estado actual y destino del mismo. Estas son cuestiones de siempre, surgidas inevitablemente al contemplar las estrellas y comprender la inmensidad del espacio que nos rodea. Ciertamente estas preguntas también se ligan fuertemente a la filosofía y a la religión. Aquí plantearemos y daremos respuesta a las preguntas que tienen sentido desde la Ciencia y que tienen, o pueden llegar a tener en el futuro, respuestas científicas.

Hagamos primero un breve catálogo con las preguntas más inmediatas. - ¿cuán lejos están las estrellas? - ¿el Universo es finito o infinito? - ¿dónde termina el Universo si tiene fin? - ¿es posible detectar esa eventual frontera? - ¿es eterno? - ¿si no lo es, qué edad tiene? - ¿el Universo es estático o crece? - en tal caso, ¿seguirá creciendo siempre? - ¿aumenta el número de estrellas? - ¿se preveen cataclismos? - ¿cuál es el destino final del Universo? - ...

La visión que el hombre se hizo del Universo a lo largo de la historia, ha tenido siempre un horizonte móvil, empujado permanentemente por la curiosidad. Este proceso puede compararse con la exploración del microcosmos, claro que esta vez en el sentido de tamaños crecientes.

Desde Ptolomeo (~130 a.c.) y por 16 siglos reinó el geocentrismo, ya que la Tierra era considerada el centro del Universo. Estas ideas erróneas fueron soportadas fuertemente desde la religión y su concepción del hombre a semejanza de un dios.

Hace sólo cinco siglos, Copérnico (1473-1543) sostuvo en cambio que “cerca del Sol está el centro del Universo”. Así nació la teoría heliocéntrica del Universo. Vale recordar que en 1616, el papa Pablo V calificó a las ideas copernicanas como contrarias a las escrituras. Copérnico estaba equivocado, pero fue criticado con argumentos erróneos.

Hoy nuestra visión del Universo ha cambiado nuevamente. Las observa-

ciones experimentales nos han permitido concluir que ni la Tierra ni el Sol poseen una posición central. En realidad el Universo carece de centro. Esta afirmación está contenida en el principio cosmológico que sostiene que en un dado instante, el Universo se presenta igual a todo observador, cualquiera sea su ubicación.

Disponemos actualmente de telescopios, cámaras, espectrógrafos, sensores satelitales, fotómetros, etc, que detectan y analizan la radiación cósmica, la radiación de diferente tipo que viaja en el Universo. Estos instrumentos hacen posible la observación y determinación de propiedades de las galaxias y otros objetos estelares distantes.

Para poder imaginar los tamaños y las distancias en juego en el Universo, debemos recordar algunas cantidades características. Por ejemplo, las distancias en juego a escalas galácticas y extragalácticas se expresan en años-luz. Esta es la distancia que recorre la luz en un año. Recordando que la velocidad de la luz es cercana a los  $300,000 \text{ Km/seg}$  (trescientos mil kilómetros por segundo), se entiende que la luz podría dar siete vueltas a la tierra en un segundo. En su momento hablaremos de información del Universo a distancias de millones de años-luz, a comparar entonces con la distancia Tierra-Sol que es del orden de  $8 \text{ minutos} - \text{luz}$  (150,000,000 de kilómetros). La estrella más cercana a la Tierra después del Sol es Alfa-centauro que se encuentra a 4 años-luz de nosotros. Es decir, cuando observamos a esa estrella estamos recibiendo la luz que ella produjo hace 4 años. Una unidad también útil a estas escalas es el  $\text{parsec} = 3,3 \text{ años-luz}$ .

La Tierra junto al sistema solar se encuentra dentro de una galaxia de tipo espiral llamada Vía Láctea. Esta galaxia contiene estrellas y demás objetos celestes totalizando del orden de cien mil millones de masas solares. Respecto de la Vía Láctea vale la pena recordar la frase de Isaac Asimov: <sup>E</sup>sta es la galaxia más difícil de observar ya que estamos inmersos en ella, mientras que a las otras galaxias podemos verlas desde afuera. Además estamos lejos del centro de la galaxia, vivimos en un brazo en espiral lleno de polvo cósmico.

En otras palabras, habitamos un departamento bajo de los suburbios de una ciudad sumergida en la polución”.

Existe un grupo local de galaxias próximas a la Vía Láctea. Entre ellas se destacan las Nubes de Magallanes ubicadas a unos 170.000 años-luz. Este grupo forma parte a su vez de un super-grupo local, asociación de grupos de galaxias, con centro en Virgo, a veinte millones de parsecs de distancia (setenta millones de años luz). Más allá del super-grupo, la materia del Universo se presenta como una gran esponja de galaxias con vacíos de tamaños de alrededor de 100 *millones de parsecs* y la presencia de filamentos de materia. Resulta realmente impresionante comprender que hoy somos capaces de observar hasta distancias de tres mil millones de parsecs = diez mil millones de años-luz...

El Universo se expande. Hubble en 1920 hizo un descubrimiento fundamental para la Cosmología, la disciplina científica que se encarga de estudiar al cosmos como un todo, al detectar el alejamiento mutuo de las galaxias. Hoy sabemos que las 28.000 galaxias cuyo espectro ha sido estudiado (de los 5 millones de galaxias catalogadas) se alejan todas de todas y lo hacen tanto más rápido cuanto más lejos se encuentran. Hay una relación lineal entre la velocidad de alejamiento y la distancia a la que se encuentra la galaxia. Este alejamiento se detecta porque la luz que proviene de cada galaxia experimenta un corrimiento de frecuencia (de color) hacia el rojo.

A partir de la determinación del alejamiento de las galaxias se puede retrotraer el tiempo y de esa manera intentar reconstruir la historia del Universo. Es claro entonces que el Universo pasó previamente por etapas de mayor y mayor concentración de materia y de energía.

Sobre la hipótesis de homogeneidad e isotropía del Universo y la validez de la ley de Hubble durante toda la evolución temporal, se puede entender al Universo como un gas en expansión que al hacerlo se enfría. Inversamente, se puede extrapolar hacia el pasado y de esa manera acercarnos hacia el estado inicial, cuando todo estaba concentrado. Se produjo entonces el Big-Bang,



la singularidad a partir de la cual comienza la expansión. Las determinaciones experimentales más recientes indican que la edad de Universo es del orden de trece mil setecientos millones (13,700,000,000) de años. Este dato lo conocemos con una precisión de cien millones de años.

La física del proceso de evolución es bien conocida a partir de los  $10^{-12}$  (0,000000000001) segundos posteriores al de la “bola de fuego” primordial. A partir de allí hemos podido reconstruir la historia del Universo. Entre los  $10^{-43}$  segundos y los  $10^{-34}$  segundos debió haber a una “sopa” cósmica formada por partículas elementales altamente energéticas a una temperatura del orden de  $10^{+30}$  *grados*. Hasta  $10^{-30}$  de segundo se produce un rápido crecimiento de la entropía con el consecuente aplanamiento del espacio, que es llamado período inflacionario. En los instantes siguientes, hasta  $10^{-6}$  segundos y a temperaturas del orden de  $10^{+13}$  *grados* se forman los protones y neutrones al ligarse los quarks por medio de los gluones. La nucleosíntesis o formación de los núcleos atómicos livianos ocurre 1 segundo después del Big-Bang, cuando la temperatura ya había descendido a  $10^{+10}$  *grados*. Posteriormente se forman los átomos cuando los núcleos ligan a tantos electrones como el número de protones que poseen. En ese momento la materia se hace eléctricamente neutra y por ello la radiación electromagnética formada por los fotones, sensible a la carga eléctrica, se desacopla, evoluciona de manera aislada, y queda entonces como fósil de aquella época. Es un registro disponible de lo que ocurrió precisamente en el momento del desacople. Esta situación se produjo 170,000 años después del Big-Bang cuando la “sopa” estaba tibia. Trece mil millones de años más tarde, en 1965, esa radiación fósil de fondo fue detectada por Penzias y Wilson. Esta radiación había sufrido la expansión del Universo y el consecuente corrimiento al rojo. Es muy homogénea, sus fluctuaciones son menores a un diez milésimo de su valor. La temperatura característica de la radiación de fondo como se la llama, es de 2,74 *grados* (Kelvin).

Es claro que para que se produzca la formación de galaxias, el Univer-

so no pudo ser absolutamente homogéneo. Es imprescindible la presencia de inhomogeneidades. Desde 1992, primero con el satélite llamado COBE y recientemente con el WMAP, se han detectado inhomogeneidades térmicas en el Universo respecto de aquellos  $2,74$  *grados*, del orden de 1 parte en  $10^5$ , suficientes como para desequilibrar localmente la atracción gravitatoria y dar lugar a concentraciones de materia que terminan formando las galaxias.

La próxima pregunta que naturalmente podemos hacernos se refiere al destino del Universo: cuál es su evolución de aquí en más. Esta depende críticamente de la densidad de masa en el Universo, o mejor de la relación entre la densidad de masa del Universo y la llamada densidad de masa crítica. Esta última, ligada a la constante de Hubble, define la situación futura del Universo. En efecto, si la relación de densidades mencionada supera 1, el Universo al evolucionar colapsará a un punto. Si por el contrario esa relación es menor que 1 se producirá una expansión indefinida. ¿Cuánto vale entonces la relación de densidades?. Las determinaciones experimentales ligadas a corrimientos espectrales y la única solución natural estable de las ecuaciones de Einstein indican que la densidad del Universo debe ser muy próxima a la densidad crítica, de modo que la relación es prácticamente 1. En otras palabras el Universo es crítico ya que las dos fuerzas que compiten, la de expansión originada en el Big Bang y la de atracción gravitatoria entre masas, se compensan casi exactamente. Sin embargo, la densidad de materia visible no supera algunas centésimas de la densidad crítica. De modo que falta detectar alrededor del 90 % de la materia del Universo. Recordando que materia y energía son esencialmente la misma cosa, se ha podido concluir que alrededor del 70 % de ese faltante, más que materia oscura (no visible) es energía oscura (no detectable).

Con la relación de densidades menor o cercana a 1, como parecen indicar las diferentes evidencias que disponemos, el escenario más probable para el destino del Universo es el de una expansión permanente. En ese caso la densidad seguirá disminuyendo al disponer la misma cantidad de masa de

un mayor volumen. Consecuentemente el Universo se enfriará, las estrellas se apagarán y la única fuerza activa será la gravitatoria. La materia terminará en forma de agujeros negros (concentración singular elevadísima de materia en regiones espaciales muy pequeñas), otros objetos densos y remanentes de partículas elementales y radiación surgidas del colapso gravitatorio. El Sol ya frío, escapará de la Vía Láctea y errará por el Universo arrastrando a la Tierra.

El futuro previsible para dentro de unos  $10^{100}$  años (muchos de verdad...) es la sistemática formación de agujeros negros devorando materia y de los que escapa solamente la llamada radiación de Hawking de tipo térmico, es decir, sin ninguna información útil. El Universo frío y en expansión será iluminado en forma ocasional cada vez que se evapore un agujero negro y la materia muy lentamente condensará al estado líquido.

**CIENCIA=CULTURA**

A modo de conclusión discurriremos sobre los efectos negativos de la falsa dicotomía que pone por un lado a la Ciencia y por otro a la Cultura tradicional generalmente ligada a las Artes y las humanidades. La vieja, pero por cierto no superada, teoría de las dos culturas tratada por Snow en los 60 y cuya práctica tiene como consecuencia una pérdida sustancial para la sociedad en su conjunto.

Por sí misma y a través de la Tecnología, la Ciencia tuvo y sigue teniendo un impacto creciente sobre la sociedad y la vida de todos los días. Queramos o no, estemos conscientes o no, el desarrollo científico y tecnológico diseña nuestro presente y nuestro futuro. Uno de los cambios más importantes y de detección inmediata, es el que nos ha llevado a vivir rodeados de máquinas y a depender fuertemente de ellas. La mayor parte de los trabajos que alguna vez fueron hechos manualmente, se realizan hoy con la ayuda de mecanismos apropiados. Esta simple observación muestra que la importancia de la investigación científica y tecnológica para la sociedad contemporánea es de muy fácil constatación, aún cuando muchas veces haga falta justificarla.

La Ciencia de hoy genera y alimenta todas las tecnologías que son responsables de las transformaciones sociales, económicas y políticas de nuestro mundo. Está subyaciendo a prácticamente todas las actividades del hombre y por ello, aunque la gran mayoría de la sociedad no lo perciba, forma parte naturalmente de la Cultura contemporánea.

Constatamos de inmediato que la Ciencia ha pasado, durante la última mitad del siglo que acaba de terminar, por dos períodos bien definidos. En los 60 y 70 y sobre la base de los éxitos espectaculares del quehacer científico hasta allí, se transformó casi en una “religión universal”. Se creó una ideología realmente negativa, imprescindible de separar del método científico, que hasta podría dársele un nombre: “cientismo”. A este cientismo adhirieron todos los países, fueran capitalistas o socialistas, desarrollados o subdesarrollados. A pesar de ello el método científico no percoló a la sociedad en su conjunto para constituirse en bien cultural. En ese momento, aunque parezca contra-

dictorio y debido precisamente a la irracionalidad del planteo dogmático, se perdió la oportunidad de instalar en los ciudadanos el pensamiento científico con todas sus potencialidades. En efecto, cuando se pretende mal usar a la Ciencia para sustentar un dogmatismo, lo que se consigue es aplastar la libertad y a la propia Ciencia. Este es un ejemplo que debió haber incluido George Steiner en “Nostalgia del Absoluto”, colección de conferencias de 1974 sobre la aparición de doctrinas con función de nuevas mitologías, especie de religiones seculares que pretenden ofrecer soluciones a todos los grandes problemas. Mencionó allí al marxismo, al psicoanálisis, al estructuralismo, además de la “sabiduría” zen, la visita de extraterrestres y otros dogmas, pero olvidó al cientismo porque en cierto modo quedó atrapado en sus mallas.

El otro período, el actual ligado al fin del siglo y del milenio, está marcado por el postmodernismo y sus derivados. A partir de la negación de toda trascendencia nace la puesta en duda de todo y la falsa idea de que el conocimiento científico es materia opinable. El péndulo cruzó hasta el otro extremo del relativismo. La Ciencia como tal tampoco pasa a constituirse en el bien cultural que debiera.

Insistamos en que a pesar de todo seguimos, aún sin pensarlo, valiéndonos de los desarrollos tecnológicos, fruto de esa Ciencia, para nuestro quehacer cotidiano. Más vale que no nos falte la televisión y que a un número inmenso y fuertemente creciente, no nos priven de Internet, por favor!

La Ciencia o la Tecnología no van de la mano de la deshumanización de la sociedad como tratan de convencernos ciertos agoreros opuestos al avance del conocimiento. Aquéllos cuya incomprensión los lleva a pasar de sensaciones a-científicas a una verdadera y nefasta actitud anti-científica. Muchos que vislumbran y proponen la vuelta a la sencillez y “no encender la televisión”, en una revalorización de la Edad Media. El que la televisión se use también para malinformar (o desinformar) y manipular ideológicamente a los ciudadanos, no significa que los avances científico-tecnológicos que la hicieron posible sean

deshumanizantes. No son los productos del conocimiento los que provocan la deshumanización sino el uso que de esos avances hace el poder dominante de la sociedad, precisamente para evitar que el conocimiento científico percole y posibilite la toma de decisiones sobre bases racionales. A poco de meditar sobre este punto queda claro que, por el contrario, la Ciencia y la Tecnología son factores fundamentales para favorecer la humanización de la sociedad. Si la sociedad incluye a la Ciencia entre sus valores culturales, conseguirá evitar que minorías poderosas sigan utilizando al conocimiento en su contra. Podrá así estar alerta sobre los peligros reales que a veces aparecen por el mal uso de la Ciencia y la Tecnología. Y no solamente eso, sino que también podrá proponer alternativas válidas y posibles y no soluciones mágicas o milagrosas a sus problemas.

Surge de inmediato preguntarse si es posible mejorar la falsa imagen de la Ciencia que tiene la sociedad y conseguir que ésta la adopte como uno de sus bienes. Si es posible que cuando deba tomar decisiones, el ciudadano común en lugar de leer el horóscopo, organice su vida y su pensamiento recurriendo en la medida de lo posible al método científico.

Se trata sin duda de un problema cultural. La sociedad que es, en general, analfabeta científica, describe los fenómenos usando lo que podría llamarse el lenguaje de la calle. Con éste se hace muy difícil, si no imposible, transmitir el conocimiento científico. La ignorancia de los padres, luego de los maestros y finalmente de los medios de difusión en general, está en la base de esa restricción de lenguaje. Y no solamente del lenguaje, sino también del entrenamiento imprescindible para escuchar, entender y digerir un discurso lógico con premisas y conclusiones como lo es el de la Ciencia. Sobre este punto se puede elaborar un análisis un poco más detallado que pasa en primer lugar por detectar la escasez de desarrollo local de la investigación científica y el endémico aislamiento de los científicos. El universo de la investigación en los países en desarrollo y en muchos desarrollados es tan reducido y a veces tan postergado como para que en general las pocas noticias científicas de las que

se hace eco el periodismo sean producto de cables de agencias informativas extranjeras referidos a sucesos en los países con mayor poderío económico. Los científicos tampoco hacen el esfuerzo necesario para trascender socialmente. Muchas veces aducen que los requerimientos y las complicaciones laborales del día a día les ponen pesadas barreras, otras que el esfuerzo de difusión no es adecuadamente valorado. Como consecuencia de ello, la sociedad no percibe que los, pocos, científicos que existen a su alrededor, son parte de ella y por lo tanto no acompaña sus esfuerzos ni siente satisfacción por sus logros. Comparemos, por ejemplo, con la resonancia que tienen los triunfos deportivos, los premios cinematográficos y aún los eventuales éxitos literarios de nuestros compatriotas.

Los lectores de periódicos pueden constatar que el suplemento de Ciencia y Tecnología, si existe, aparece siempre separado del de Cultura. Además se habrá observado que mientras la sección cultural tiene presencia diaria, el suplemento científico, si aparece, lo hace una vez por semana. Los medios masivos de comunicación contribuyen también, por ingenuidad o por razones económico-comerciales a profundizar la falsa dicotomía entre Ciencia y Cultura. Se crea y se potencia entre el gran público la idea de que la comprensión de los temas científico-tecnológicos está reservada a un pequeño grupo de especialistas, entre otras cosas, aislados y aburridos... Por otra parte, cuando eventualmente las agencias ligadas al desarrollo de la Ciencia y la Tecnología pretenden hacer conocer sus actividades, terminan difundiendo la imagen y la personalidad de los funcionarios de turno y no el conocimiento científico y los avances tecnológicos.

Estas observaciones, no por simples menos importantes, han llevado a algunos a hablar de una tercera cultura que conecte la Ciencia con la Cultura tradicional, aquella ligada a las letras y las Artes plásticas, etc. Esta tercera vía estaría sustentada por puentes de entendimiento mutuo entre esas dos falsas opciones para tratar de fusionarlas. También aquí no se ataca el problema de base, no se propende a eliminar la falsa dicotomía, a aceptar



la complementaridad de Ciencia y Arte para definir la Cultura del hombre como un todo.

Convenimos entonces en que la actividad científica en la mayoría de los países, carece de vigencia social. La sociedad no tiene a sus científicos como adalides del saber, como consultores que usan el conocimiento científico que poseen, o pueden obtener, para dar sus respuestas.

Las “verdades” científicas no son reveladas sino que surgen de contrastar teorías y modelos con datos de la Naturaleza. Por ello son limitadas, condicionadas y relativas. La grandeza de la Ciencia está precisamente en que no puede ofrecer un espacio donde reina la certeza absoluta aunque su aporte al conocimiento es esencial y trascendente. La Ciencia está basada en la objetividad, no en la creencia, permitiendo que los fenómenos adquieran una definición racional, una descripción coherente y universal al independizarla del hombre particular que hace la observación o la teoría. El científico es libre de formular cualquier pregunta, de dudar de cualquier aseveración, de buscar cualquier evidencia y de corregir cualquier error.

Destaquemos también algunas de las dificultades para esa inclusión necesaria de la Ciencia dentro del patrimonio de la sociedad toda. A pesar de la impactante unidad de formulación, la Ciencia presenta una diversidad innegable. En Ciencia y en Tecnología la comprensión de las grandes ideas fundamentales, la visión de conjunto no es suficiente para su desarrollo. Los detalles que son precisos y muy particulares deben ser conocidos, bien conocidos. La multitud de ellos da lugar inevitablemente a la especialización. Esta especialización, creciente en nuestros días, define objetos y métodos muy particularizados. Esta especialización, en fin, ha conducido a una fragmentación intelectual y semántica que hace que la comunicación entre los diferentes actores sea difícil. Insistamos en que esa dificultad de comunicación, que ciertamente opera no sólo entre distintas disciplinas científicas como la Física, la Química o la Biología, es igualmente fuerte dentro de cada campo individual. El enorme y fabuloso desarrollo de la Ciencia ha creado ineludibles divisiones

y problemas. Como consecuencia ha dejado de ser un tema particularmente atractivo para mucha gente, dando lugar a ese analfabetismo científico en la sociedad del que venimos hablando. La Ciencia como elemento común en la Cultura del hombre de hoy, el conjunto de lo aprendido, ha casi desaparecido. Sin embargo, la práctica científica es, o debería ser, realmente parte de la Cultura no sólo en el sentido intelectual sino también en el antropológico. Si bien los actores de la Ciencia muchas veces no se comprenden fácilmente entre ellos, poseen patrones y actitudes comunes de comportamiento y modos compatibles de acercarse a los problemas. Esto circula a niveles profundos y de manera transversal a posiciones políticas o ideológicas. Casi sin pensarlo, los poseedores de actitud científica responden de manera similar. Este es precisamente el significado de una Cultura. Esta Cultura que debe ser adquirida y vivida por la sociedad.

La comprensión del valor de la Naturaleza y la importancia del avance de la Ciencia y la Tecnología deben ser parte integrante de la Cultura. Ambas deben ser tareas colectivas. Luego de comprender que las grandes deficiencias en salud, alimentación y educación no son una responsabilidad directa de los investigadores científicos y tecnológicos, hay que establecer su origen en las malas decisiones acumuladas o soslayadas y consecuentemente actuar racionalmente para corregirlas. Allí científicos y tecnólogos tendrán su lugar

Debemos conseguir que la sociedad identifique a la Ciencia entre sus valores culturales. La Ciencia no termina en las tecnologías que surgen de su desarrollo, las que a veces pueden ser responsables, por ejemplo, del incremento del desempleo que va de la mano de la globalización de la economía. Es también la única vía para resolver este problema al proveer educación racional a todos los ciudadanos, quienes al adquirir una formación de base adecuada podrán estar preparados para recibir las tecnologías de punta, convivir con ellas y encontrar mecanismos para que aparezcan soluciones originales. No existe camino más democrático para borrar las desigualdades sociales que el que pasa por una adecuada educación de base que incluya a la Ciencia.

Aquí cabe otra observación para reflexionar. Una pregunta generalizada a los actores de la Ciencia es ¿para qué sirve lo que se está investigando? Ella siempre aparece en las esporádicas entrevistas a científicos y tecnólogos. Es notable que el mismo tipo de preguntas no está presente en las sí frecuentes entrevistas a futbolistas, actores o autores. Nunca se escucha preguntar, por ejemplo, ¿cuál es el significado de pelearse a patadas por una pelota?

Por ello debemos convenir también que los científicos necesitan mejorar sustancialmente su tarea de comunicación para explicar qué hacen y por qué lo que hacen concierne a todos. Las políticas científicas también descuidan este aspecto fundamental al no exhortar a los actores de la Ciencia a comunicar más y mejor. Esta comunicación no debe ser sólo con el público en general sino también, y quizás preponderantemente, con el Parlamento y todos los estamentos de gobierno.

La comunicación es generalmente una tarea difícil, sobre todo en ciertas áreas de la Ciencia. En algunas es más simple llegar con el mensaje adecuado. Por ejemplo la Biología. Además de los beneficios directos y evidentes de la investigación médica, siempre es atractivo el estudio de la materia viviente. La Cosmología, la Astronomía y hasta la Astrofísica tienen ventajas similares ya que es difícil encontrar a alguien que no disfrute mirando las estrellas. Los geólogos pueden siempre recurrir a los dinosaurios para "vender su producto". Ya la imagen de la Química tiene altos y bajos. Finalmente la Física es difícil de compartir. La Física ya a fines del siglo XIX dejó de tener como objeto de estudio lo visible y lo tangible. Entró en el mundo mucho más abstracto de la escala atómica, verdaderamente lejana de la del hombre. De hecho, la Mecánica Cuántica y la Relatividad tienen tanto, o más, que ver con la realidad del hombre que los fósiles o el ADN. Sin embargo para el ciudadano común los quarks y los electrones aparecen como objetos mucho menos reales. Estos personajes de la Física contemporánea parecen estar más ligados a la Matemática. Y la Matemática es sin duda la Ciencia más difícil de adquirir, ya que es la única exacta y tiene muy poca conexión directa

con realidades tangibles. Esta constatación ha llevado a muchos científicos a recurrir a metáforas, la mayoría de las veces desafortunadas, para tratar de hacer comprender ese mundo de escala tan lejana al hombre aunque omnipresente, que es el objeto de su estudio. Vale recordar una anécdota de Niels Bohr, que como vimos fue uno de los fundadores de la Física Atómica, quien recordaba que durante una reunión social a la que asistía, una invitada al enterarse de su profesión, le pidió que le explicara “usando palabras fáciles” qué era la Teoría de la Relatividad. Bohr cuenta que intentó varios caminos metafóricos con dificultad decreciente pero siempre era interrumpido con un: no le entiendo profesor. Ya cansado comenzó a hablar del movimiento de un carro de lechero y entonces la interlocutora le dijo que ahora sí entendía. Bohr le respondió que lo que estaba diciendo ya no tenía nada que ver con la Teoría de la Relatividad... En algún sentido la comunicación también se entorpece por el camino restringido a la metáfora. Queda claro que aquí también deberá hacerse un gran esfuerzo para encontrar la buena senda.

Así como ocurre con el Arte, hoy la Ciencia, aunque no se lo perciba, es parte de la Cultura. Debería formar parte de lo aprendido. La ignorancia de las leyes que definen la estructura atómica, del papel de Darwin en la Biología o de la importancia del ADN debería ser considerada tan negativa para la vida plena como el desconocimiento de Cervantes, Colón, Mozart o Picasso. Preguntar sobre el contenido de la segunda ley de la Termodinámica debería ser equivalente a preguntar si se leyó el Quijote...

Hay todavía una advertencia válida. A veces se encuentra que filósofos o cultores de las humanidades usan expresiones científicas con el afán de complicar el discurso o tratando de impresionar al lector. Debido a que en general la Ciencia no forma parte real de la propia cultura del autor, muchas veces lo hacen de manera incorrecta o imprecisa. Este aspecto ha sido puesto de manifiesto de manera grotesca por el reciente “affaire Sokal” que desnudó la práctica de ciertos afamados intelectuales consistente en arrojar al lector palabras altisonantes que parecen sabias pero en un contexto donde no poseen

ninguna pertinencia.

Convengamos como corolario que debemos conseguir que la sociedad perciba y tome conciencia de que está perdiendo algo fundamental: el conocimiento y la práctica de la Ciencia. No hay duda de que quien experimenta la Ciencia, la ideología científica, toma contacto con una fuente inagotable de sorpresas y de caminos nuevos que se abren por delante. La alternativa científica debe formar parte de las opciones de vida de todo ciudadano ya que propende a su libertad. Por otra parte, los científicos deberían también participar en forma directa en la solución de los problemas sociales aportando el pensamiento científico que nos enseña, en primer lugar, que no hay fórmulas mágicas para atacar esos problemas. La Ciencia avanza cuando aceptamos nuestra ignorancia y abrimos las puertas a las dudas. El conocimiento científico tiene componentes con muy diferentes grados de certeza. Algunas de ellas son casi ciertas, otras algo más inciertas pero ninguna componente es absolutamente cierta. Esta fragilidad de la Ciencia es su valor fundamental, actúa como prevención frente al autoritarismo y define su responsabilidad. La Ciencia siembra libertad y es esencialmente democrática por cuanto su objetividad garantiza la igualdad a priori de oportunidades. Con la Ciencia entre su bagaje cultural, el hombre propende a eliminar comportamientos sectarios y de exclusión racial y de género. En efecto, si hay alguna herramienta que ha apoyado la emancipación de las mujeres, ésta ha sido la Ciencia.

En fin, al haber olvidado la Cultura científica, el hombre contemporáneo no consigue ni desea comprender la revolución científica y tecnológica en que vive. Los países con estructura industrial-científica son cada vez más ricos y los que no la poseen cada vez más pobres. La separación se ensancha día a día, potenciada en muchos casos por la superpoblación que aqueja fundamentalmente a los últimos. Pero no alcanza con potenciar una atmósfera tecnológica que se transforma fácilmente en mística. El paso imprescindible que se debe dar tiene que incluir especialmente a la Ciencia.

Separar la Ciencia de la Cultura es como separar la Naturaleza de la

Cultura. Cerrar la brecha entre las pretendidas culturas diferenciadas es imprescindible no sólo desde un punto de vista teórico y principista sino también desde el más práctico que se pueda imaginar. Si se mantiene separado el desarrollo de los aspectos que tradicionalmente han sido llamados artísticos y humanísticos del de aquéllos científicos, la sociedad no será nunca capaz de pensar y decidir con sabiduría, de completar el conocimiento. No podrá mejorar su vida intelectual, no sabrá como defenderse eficientemente de los peligros de cualquier especie que puedan presentarse, no conseguirá poner en juego métodos útiles para desterrar la pobreza de su seno. En fin, la educación que es la base indiscutible de cualquier desarrollo social realmente válido y trascendente, nunca será plena y verdadera si la cisura que hemos descrito no se cicatriza.

**FINALE**

Para concluir hemos elegido un par de frases, una de un físico contemporáneo, Richard Feynman, de gran importancia en el desarrollo del análisis del mundo microscópico y otra de un escritor de valor indiscutible como es Marcel Proust.

Feynman decía que los científicos no podemos permitirnos imaginar cosas que están en clara contradicción con las leyes de la Naturaleza. Por ello imaginar en Ciencia es difícil...

Por otra parte Proust escribió: lamento que mi médico no tome en cuenta el hecho de que leí a Shakespeare, pues después de todo eso también es parte de la patología. Shakespeare no enferma ni inmuniza, sólo otorga otros prismas para comprender los tonos del padecer...

Esperamos haber contribuido con otros prismas...



## CON GOETHE

- ¿Por qué?
- ¿Por qué con Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832)?
- Por poeta. No en primer lugar, pero también.
- Por novelista. Tampoco en primer lugar, pero también.
- Por dramaturgo. Tampoco en primer lugar, pero también
- Por sus estudios sobre la vida de plantas y animales y su teoría de la luz y del color. No en primer lugar, pero también.
- Pero, ¿por qué?
- Por que nos enseñó que: **“aquél que posee Arte y Ciencia tiene religión; quien no las posee, necesita religión”...**

## GLOSARIO

*Acelerador:* Máquina diseñada para producir haces de partículas (electrones, protones, etc.) de alta energía (alta velocidad) utilizados para la investigación de la estructura íntima de la materia. También se usa en aplicaciones médicas y tecnológicas. Existen aceleradores naturales a escalas galácticas y extra galácticas.

*Acidos nucleicos:* ADN y ARN, polímeros lineales de nucleótidos responsables de la acumulación y expresión de la información genética.

*Adaptación:* Modificación de un organismo para ajustarse a nuevas condiciones o nuevos ámbitos.

*ADN (ácido desoxirribonucleico):* Macromolécula constituida de la sucesión de los cuatro bases o nucleótidos: adenina (A), guanina (G), citosina (C) y timina (T).

*Agujero negro:* Región del espacio-tiempo que no puede ser observada por un observador distante ya que todo, materia o luz, es atrapado por el campo magnético super intenso que posee. Podrían ser el estadio final de estrellas muy masivas luego del colapso gravitacional.

*Alela:* Cada una de las diferentes formas que puede asumir un gen. Existen alelas normales o mutadas.

*Aminoácido:* Cada uno de los 20 elementos que combinados dan lugar a las proteínas.

*Antipartícula:* Partícula con la misma masa y las propiedades características (carga eléctrica, número de leptón o de barión, sabor, color, ...) invertidas con respecto a la partícula. Por ejemplo, el positrón, conjeturado por Dirac

en 1928 (con exactamente la masa del electrón y carga eléctrica positiva) es la antipartícula del electrón.

*ARN*: Acido ribonucleico. Cadena de nucleótidos cuya secuencia está dictado por el ADN del cual está transcrito.

*Atractor*: Estado final estable hacia el que se aproxima un sistema dinámico con propiedades adecuadas.

*Atractor extraño*: Atractor al cual las trayectorias de ciertos sistemas dinámicos llamados caóticos se aproximan aperiódicamente y de manera irregular. Poseen geometría fractal.

*Azúcares*: Forma de glúcidos que junto a grasas y proteínas constituyen los principales nutrientes energéticos.

*Bacteria*: Organismo vivo unicelular con estructura procariota, es decir, sin núcleo. Posee solamente un cromosoma.

*Barión*: Barión: Un hadrón, partícula que participa en interacciones fuertes, formada básicamente por tres quarks. El protón y el neutrón son bariones.

*Bifurcación*: División de un estado de equilibrio en dos de manera progresiva y en función de las variaciones de algún parámetro de control.

*Big bang*: Teoría que describe el origen del Universo a partir de una inmensa explosión.

*Bosón*: Partícula con espín entero (0, 1, ...) que obedece la estadística de Bose-Einstein. Las partículas portadoras, o mediadoras, de las interacciones

fundamentales y la partícula de Higgs son bosones.

*Bosón de Higgs:* Partícula que interactúa con todas las partículas de la materia masivas y con los portadores de la fuerza débil de tal modo que la fuerza de esta interacción da lugar a la llamada masa: mayor la interacción, mayor la masa.

*Bosón W:* Portador de las interacciones débiles cargadas. Muy masivo (  $\approx 80$  protones), propiedad relacionada con el corto alcance de estas interacciones.

*Bosón Z:* Portador de las interacciones débiles neutras. Muy masivo (  $\approx 90$  protones), propiedad relacionada al corto alcance de estas interacciones.

*Campo:* Cantidad física por la que una fuerza es transmitida al espacio. Idea originalmente expuesta por Faraday y elaborada por Maxwell en una teoría de campos del electromagnetismo que comprende campos eléctricos y magnéticos. Estos son campos clásicos representados por funciones suaves. La teoría de la relatividad general es otra teoría clásica de campos que describe la gravedad.

*Caos:* Comportamiento aperiódico y aparentemente al azar de sistemas dinámicos no lineales gobernados por leyes deterministas.

*Catalizador:* Agente que acelera una reacción química sin ser consumido durante el proceso.

*Carga:* Cantidad física transmitida por partículas que determina su participación en una interacción dada. Una partícula con carga eléctrica siente la interacción electromagnética. Una con carga de color participa en la interacción fuerte.

*Cero absoluto:* La temperatura mínima posible a la cual los movimientos de agitación térmica desaparecen completamente. Es el cero de la escala Kelvin de temperatura y corresponde a aproximadamente  $-273$  grados centígrados.

*Clon (celular):* Todas las células obtenidas por descendencia directa de una única célula.

*Clonación:* Producción de individuos genéticamente idénticos a partir de células pertenecientes al mismo clon celular.

*Clonaje molecular:* Procedimiento experimental para aislar un fragmento de ADN.

*Código genético:* "Diccionario" que expresa la correspondencia entre tripletas del ADN y aminoácidos individuales.

*Codón o Tripletta:* Cada una de las 64 tripletas que codifican un aminoácido específico.

*Color:* Carga asociada con las interacciones fuertes, transmitida por los quarks y los gluones. Este grado de libertad genera el grupo de simetría  $SU(3)$ , base de la Cromodinámica Cuántica. Todos los hadrones, formados por quarks y gluones no poseen color, es decir, el color está confinado dentro de los hadrones.

*Conservación:* Propiedad que garantiza que la cantidad total de alguna magnitud física siempre permanece constante a pesar de cambios internos en el sistema.

*Constante cosmológica:* Constante que puede incorporarse a las ecuaciones de la teoría de la gravitación de Einstein y describe la densidad de energía de un universo sin materia.

*Constante de Planck:* ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Joule.segundo) Constante fundamental que constituye el cuanto elemental de la acción. Fija la escala de las acciones donde los efectos cuánticos comienzan a ser protagonistas.

*Cromodinámica Cuántica:* Teoría de campo de gauge de las interacciones fuertes entre quarks y gluones. Se basa en el grupo de simetría de gauge SU(3) relacionado con la carga de color.

*Cromosoma:* Corpúsculo del interior del núcleo celular. Contiene un largo filamento de ADN con miles de genes.

*Cuanto:* Cantidad discreta de energía (o momento, o momento angular) en unidades que incluyen la constante  $h$  de Planck.

*Decaimiento:* Proceso por el cual una partícula desaparece y aparecen por lo menos otras dos. El muón decae en un electrón y un neutrino.

*Decaimiento beta:* Transmutación de un neutrón en un protón acompañada de la producción de un electrón y un antineutrino de electrón. Manifestación paradigmática de la interacción débil.

*Detector:* Dispositivo, generalmente electrónico, diseñado para medir propiedades de una partícula.

*Doble hélice:* Cadena entrelazada de dos hélices formando una molécula de ADN que es mantenida unida por el apareamiento de bases complementarias

entre A-T y entre C-G.

*Electrón:* Leptón con unidad de carga eléctrica negativa. Es el leptón cargado con la masa más pequeña y, en consecuencia, estable. El electrón es el leptón por antonomasia. Es uno de los ingredientes principales del átomo y es responsable de la mayoría de los fenómenos diarios.

*Energía de ligadura:* La energía requerida para romper una ligadura (por ejemplo entre moléculas o entre átomos).

*Entropía:* Magnitud termodinámica que mide el grado de desorden de un sistema macroscópico.

*Enzima:* Proteína dotada de poder catalítico específico para acelerar una reacción bioquímica.

*Escalar:* Cantidad física sólo con magnitud.

*Espín:* Propiedad cuántica relacionada con el momento angular intrínseco de una partícula o mejor con su momento magnético intrínseco. Puede ser un número semi-entero como en los fermiones o un entero como en los bosones.

*eV (electrón-volt):* Unidad de energía correspondiente a la cantidad de energía ganada por un electrón al moverse a través de una diferencia de potencial de un voltio.

*Fenómenos críticos:* Comportamiento termodinámico singular de un sistema cuando se encuentra cerca de una transición de fase de segundo orden.

*Fermión:* Partícula con espín semientero ( $1/2, 3/2, \dots$ ) que obedece la estadística



ca de Fermi-Dirac. Los quarks y los leptones son fermiones.

*Fisión nuclear:* División de un núcleo atómico en fragmentos de masa equivalente. Es inducida por neutrones y en el proceso se producen además otros neutrones dando lugar a una reacción en cadena. Es el mecanismo básico de los reactores nucleares y de la bomba atómica.

*Fotón:* Partícula que transmite la interacción electromagnética entre partículas cargadas eléctricamente. Tiene masa cero.

*Fusión nuclear:* Combinación de dos núcleos livianos para formar otro con la liberación de energía. Es la fuente de la energía producida por las estrellas, en particular el Sol.

*Gen:* Porción de ADN que codifica una proteína específica. Elemento de patrimonio genético transmitido en la herencia generacional.

*Genoma:* Patrimonio genético constituido por el conjunto de todos los genes de un individuo.

*Geometría fractal:* Geometría de los objetos de formas totalmente irregulares como las costas marinas, las esponjas o la espuma. Los objetos fractales poseen dimensiones fraccionarias.

*Gluon:* Partícula portadora de la interacción fuerte entre quarks. Tiene carga de color y en consecuencia siente la interacción en la que media. Tiene masa cero.

*Hadrón:* Partícula, no elemental, compuesta de quarks y gluones. No tiene color y participa en interacciones fuertes residuales debido a las cargas de

color de sus componentes. Los hadrones se dividen en bariones y mesones. El protón, el neutrón, el pión y el kaón son hadrones. Los dos primeros son bariones y los dos segundos mesones.

*Hipercarga:* Número cuántico aditivo. La hipercarga fuerte es la suma de la extrañeza más el número bariónico:  $Y = S + B$ . La hipercarga débil es el número cuántico relacionado con la simetría de gauge  $U(1)$  de la teoría electrodébil.

*Interacción Débil:* Interacción presente en cualquier proceso donde el sabor cambia, mediada por el bosón  $W$  y también cuando no cambia de sabor y es mediada por el bosón  $Z$ , eléctricamente neutro. Es de muy corto alcance y viola la invariancia bajo reflexión espacial (paridad).

*Interacción electromagnética:* Interacción debida a la presencia de carga eléctrica, incluido el magnetismo si la carga está en movimiento. A nivel microscópico es transmitida por el fotón. Se la formaliza como una teoría de campos de gauge basada en el grupo de simetría  $U(1)$ .

*Interacción Fuerte:* La interacción entre quarks transmitida por gluones, basada en la simetría de gauge  $SU(3)$ . Tiene la propiedad de ser pequeña a distancias pequeñas y de crecer con la separación de partículas dando lugar al confinamiento de cargas de color. En un período previo del desarrollo del concepto de elementalidad, la interacción fuerte se refería a la fuerza nuclear entre protones y neutrones.

*Interacción Fundamental:* Las interacciones que explican todos los procesos físicos observados. Las interacciones fundamentales conocidas son: la fuerte, la electromagnética, la débil y la gravitacional.

*Interacción gravitatoria:* Fuerza de atracción entre partículas masivas. La carga correspondiente es energía (o masa).

*Interferencia:* Propiedad característica de las ondas que da lugar a una nueva onda cuando dos ondas se superponen. Puede dar lugar a una amplificación si es constructiva o a la atenuación, incluida la extinción, si es destructiva.

*Isoespín:* Simetría interna relacionada al grupo  $SU(2)$ . Sugerida por Heisenberg para tratar al protón y al neutrón como diferentes subestados de carga de una partícula: el nucleón. El isoespín se conserva en las interacciones fuertes. El isoespín débil generaliza el concepto en conexión con la interacción débil.

*Laser:* Acrónimo de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Dispositivo que genera haces de luz intensos, direccionales y coherentes a través de la emisión estimulada de radiación.

*Leptón:* Una partícula fundamental que no participa en las interacciones fuertes. Cuando está cargada eléctricamente (electrón, muón y tau), siente ambas interacciones, la electromagnética y la débil. Los leptones neutros (neutrino electrón, neutrino muón y neutrino tau) participan sólo en las interacciones débiles.

*Lípidos:* Diversas biomoléculas no solubles en agua.

*Mecánica Cuántica:* Teoría dinámica válida a pequeñas escalas (atómicas). Se caracteriza por cantidades discretas de energía, o momento angular.

*Longitud de onda:* Distancia entre máximos adyacentes de una onda.

*Mesón:* Un hadrón sin número bariónico, construido principalmente por un

quark y un antiquark. Los piones, los kaones, el rho, el omega son mesones.

*Modelo Estándar:* Teoría formal actual de las partículas elementales y de las interacciones fundamentales, excluyendo la gravedad, basada en la simetría de gauge  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ .

*Muerte:* Estado de un organismos cuando se produce un cese completo y permanente de sus funciones vitales.

*Muón:* Un leptón con masa en reposo de aproximadamente 200 veces la masa del electrón.

*Mutación:* Alteración de la secuencia de nucleótidos de un gen.

*Neutrino:* Un leptón sin carga eléctrica. Introducido por Pauli en 1931. Hay tres sabores correspondientes a los tres leptones cargados llamados neutrino de electrón, de muón y de tau, respectivamente. Los neutrinos participan solamente en las interacciones débiles y en interacciones gravitacionales aún si su masa es mucho más pequeña que las correspondientes a las de los leptones cargados.

*Neutrón:* Un barión con carga eléctrica cero, uno de los principales constituyentes del núcleo atómico. Está formado básicamente por dos quarks down y uno up. Su masa es solamente un poco mayor a la del protón.

*Núcleo:* La parte central de un átomo formada principalmente por una colección de protones y neutrones. En el núcleo atómico reside la mayor parte de la masa del átomo.

*Nucleótido:* Componente elemental del ADN. Puede ser A, G, C o T.

*Número Cuántico:* Número que designa el estado cuántico de un sistema, usado para distinguirlo.

*Parásito:* Un organismo que vive sobre otro o en su interior, del que se alimenta.

*Paridad:* Simetría izquierda-derecha ligada a la reflexión especular.

*Partícula Elemental:* Ladrillo básico para la comprensión actual de la estructura de la materia. Todas las otras partículas y los sistemas son compuestos, combinación de partículas elementales.

*Partícula Estable:* Partícula que no decae.

*Pión:* El mesón con la carga más liviana. Es producido copiosamente en colisiones a altas energías. El pión fue introducido teóricamente por Yukawa en 1935 como el mediador de las interacciones entre neutrones y protones para mantener unido el núcleo atómico. Se descubrió en 1947.

*Positrón:* Antipartícula del electrón.

*Principio cosmológico:* Establece que el Universo aparece idéntico para cualquier observador independientemente de su lugar de observación.

*Principio de exclusión de Pauli:* Afirma que dos fermiones del mismo tipo (idénticos) no pueden ocupar el mismo estado cuántico simultáneamente. Está en la base de la estructura de la Tabla Periódica de los Elementos.

*Principio de incerteza de Heisenberg:* Establece que en Mecánica Cuántica no

todas las magnitudes que caracterizan a un sistema pueden ser determinadas exactamente de manera simultánea.

*Proteína:* Cadenas largas de aminoácidos ligadas entre ellas por conexiones entre los aminoácidos, llamadas peptídicas.

*Protón:* Barión con una unidad de carga eléctrica positiva (igual y opuesta a la del electrón), uno de los principales componentes del núcleo atómico. Está formado básicamente por dos quarks up y un quark down. Es el núcleo del átomo de hidrógeno.

*Proyecto Genoma Humano:* Iniciativa científica para determinar la secuencia de todos (alrededor de tres mil millones) los nucleótidos del genoma humano.

*Quark:* Partícula fundamental que participa en la interacción fuerte mediada por gluones. Es el principal componente de los hadrones. La carga eléctrica de los quarks es  $2/3$  para up, charm y top, o  $-1/3$  para down, strange y bottom. El nombre fue introducido por Gell-Mann en conexión con la simetría del sabor.

*Radioactividad:* La propiedad de emisión espontánea de radiación alfa (núcleos de He), beta (electrones) o gama (ondas electromagnéticas) debido a desintegración nuclear.

*Rayos cósmicos:* Partículas energéticas, fundamentalmente protones, electrones y núcleos que alcanzan la Tierra desde cualquier parte del Universo.

*Rayos gama:* Radiación electromagnética muy energética con longitudes de onda muy cortas (menores a  $10^{-11} m$ ).

*Relatividad:* Teoría desarrollada por Einstein para el correcto tratamiento de los fenómenos que involucran sistemas que viajan a velocidades comparables a la de la luz (300.000 Km/seg). La Relatividad General es la teoría de la gravitación.

*Sabor:* Rótulo distintivo para diferenciar tipos de quarks y leptones. Hay seis sabores de quarks: up, down, charm, strange, top y bottom y tres sabores de leptones cargados: electrón, muón y tau. Para cada uno de estos tres leptones cargados hay un correspondiente leptón neutro llamado neutrino.

*Simetría:* Invariancia de un objeto con respecto a ciertas operaciones como reflexiones especulares, rotaciones, etc.

*Simetría de gauge:* Una simetría interna local y continua. Una transformación de simetría es interna cuando sólo afecta las variables dinámicas que definen al sistema, por ejemplo, diferentes cualidades de los observables. Cuando existe una conexión de la simetría interna con las coordenadas espacio-temporales por medio de los parámetros de la simetría, nos encontramos en el caso llamado transformaciones de gauge.

*Superconductividad:* Propiedad que adquieren ciertos materiales por debajo de una cierta temperatura llamada crítica, cuando presentan resistencia eléctrica nula y expulsan al campo magnético al que se los someta.

*Superfluididez:* Pérdida total de la viscosidad que presenta el helio a temperaturas cercanas al cero absoluto.

*Tau:* Leptón cargado eléctricamente que posee masa grande, casi el doble de la del protón.

*Transcripción:* Proceso por el cual el ARN se ensambla con el ADN.

*Transgénico:* Individuo en el cual se introdujo un gen extraño o en el que se modificó artificialmente un gen.

*Tripleta:* Sinónimo de codón.

*Teoría Cuántica de Campos:* Versión moderna de las teorías de campos que incluye a la Mecánica Cuántica. La Teoría Cuántica de Campos se basa en campos cuánticos que representan tanto a la materia como a las interacciones. Las "partículas cuánticas" son corpúsculos de masa-energía. El fotón es el cuanto del campo electromagnético. El electrón es el cuanto del campo electrón.

*Teoría de cuerdas:* Hipótesis que establece que las partículas elementales son manifestaciones de vibraciones de una cuerda aún más pequeña (del orden de  $10^{-32}$  cm). Las interacciones surgen de la ruptura o unión de esas cuerdas.

*Teoría de gauge:* Una teoría de las fuerzas fundamentales basada en la idea de la simetría de gauge.

*Teoría Electrodébil:* Teoría de gauge que unifica el tratamiento de las interacciones electromagnéticas y débiles. Se basa en el grupo  $SU(2) \times U(1)$  de simetría de gauge, donde los factores están relacionados al isospín débil y a la hipercarga débil, respectivamente.

*Vectorial:* Cantidad física que tiene magnitud, dirección y sentido. La fuerza y la velocidad son magnitudes vectoriales.

*Virus:* Estructuras minúsculas compuestas sólo de información hereditaria



(ADN o ARN) rodeadas de una proteína. Debido a la infección que produce, la célula que lo recibe ve modificado su metabolismo.