

EL ORIGEN DE LAS IDEAS SOBRE EL ESPACIO Y EL TIEMPO

HÉCTOR VUCETICH

FACULTAD DE CIENCIAS ASTRONÓMICA Y GEOFÍSICAS. U N L P

Resumen:

Examinamos brevemente la evolución de las nociones de espacio y tiempo en Occidente desde Egipto y Grecia hasta la actualidad.

Abstract.

We briefly examine the evolution of the notions of space and time in the Western world since Egypt and Greece to the present time.

Introducción

Todas las disciplinas de la ciencia moderna toman como dadas las nociones de espacio y tiempo: la física describe las partículas elementales como objetos con funciones de onda del espacio-tiempo, la química se ocupa del flujo de reactivos, la ecología estudia el desplazamiento del plancton por el mar multitudinoso y la sociología describe las interacciones de culturas vecinas a lo largo de su historia.

Sin embargo, para todas estas ciencias espacio y tiempo son nociones *primitivas*, aún para la Relatividad General, que identifica la estructura métrica del espacio-tiempo con el campo gravitacional.

Las preguntas «¿qué es el espacio?» o «¿qué es el tiempo?» pertenecen en realidad a la *protofísica*: la rama de la ontología científica que trata con los presupuestos básicos de la física.¹ Estas nociones, sutiles y complejas, se desarrollaron a lo largo de tres mil años de análisis pues para entenderlas requieren:

¹ Bunge (1967).

- La noción de *distancia*.
- La de *estructura geométrica* (básicamente, el teorema de Pitágoras o su equivalente).
- La noción de *devenir* (o la de cambio).
- La de simultaneidad.

El análisis del espacio físico requiere además:

- La conexión entre espacio y tiempo (la noción de *velocidad*).
- El principio de relatividad.

En este trabajo, nos limitaremos a exponer la evolución de las ideas sobre el espacio y el tiempo desde los tiempos antiguos hasta la actualidad. Estas nociones fueron aclaradas por una combinación de matemáticas, astronomía, geodesia y física, guiadas a su vez por la filosofía natural.

Tiempo y Astronomía

La noción de tiempo es tal vez la más antigua de las que estamos estudiando, y ha estado ligada siempre a fenómenos astronómicos, pero en los tiempos antiguos sólo la diferencia entre día y noche parece haber sido importante. Hesíodo, en la *Teogonía*, afirma:²

De Caos nacieron Érebo y la negra Noche; y de ésta, a su vez, Éter y Heméra (el Día).

Éstos son los dioses más antiguos después de Caos. No hay, sin embargo, ninguna alusión a períodos temporales más largos. Los ciclos más largos, las estaciones, recién comenzaron a ser importantes para los humanos una vez que desarrollaron la agricultura: los momentos de siembra y cosecha correctos se determinan con el ciclo de las estaciones. El poema *Los Trabajos y los Días* de Hesíodo da una descripción del ciclo de las estaciones y de las épocas propicias para el trabajo del campo, plena de observaciones astronómicas:³

Al nacer las Pléyades... comienza la cosecha. Al sumergirse, la siembra. Ellas están ocultas para tí cuarenta días y cuarenta noches.

Ordena... aventar el trigo... ni bien aparezca la fuerza de Orión...

² Hesíodo (1984).

³ Hesíodo (1984).

Cuando Orión y Sirio estuvieren en medio del cielo y la Aurora de rosados dedos vea a Arturo... lleva a tu casa todos los racimos.

Así los griegos analizaron la noción de tiempo muy temprano en el desarrollo de nuestra civilización. El tiempo de los griegos, sin embargo, era *cíclico*: los acontecimientos se repetían en forma regular, imitando el ciclo de las estaciones. Con tal concepción del tiempo, el Universo era un Cosmos: un todo firme y estable que los procesos de cambio, así como la limpieza de un edificio, no alteraban:⁴

*Cual generación de hojas, así la de varones.
El viento esparce hojas por la tierra, pero la selva
florecente las crea al llegar la siguiente primavera.
Así, cuando una generación surge, otra desaparece.*

El descubrimiento del cambio por Heráclito alteró aquella noción primitiva e introdujo en la filosofía y en la ciencia una de las más rebeldes al análisis.

En Heráclito el cambio es la esencia del mundo. Así lo reconocieron los filósofos de la época clásica, que disponían de un *corpus* mucho más completo que el nuestro.⁵ La imagen del río, que tanto ama Borges, es de Heráclito:⁶

Porque no es posible entrar dos veces en un río que se dispersa, se reúne, se acerca y se retira.

y otros fragmentos muestran al tiempo como el causante del cambio

30:

Este mundo, que es el mismo para todos, no lo hizo ningún dios o ningún hombre; sino que fue siempre, es ahora y será fuego siempre viviente, que se prende y apaga medidamente.

94:

El sol no sobrepasará sus medidas. De lo contrario, las Erinias, servidoras de la Justicia, lo descubrirán.

52:

El tiempo es un niño que juega con los dados; el reino es de un niño.

⁴ Homero (1977: 1:114).

⁵ Popper (1992).

⁶ Heráclito (1959) frag. 91).

Como todos los presocráticos, Heráclito era un físico con una visión poética pero materialista de la naturaleza: su filosofía propone un mundo material hecho de fuego, cuya característica es el cambio azaroso, pero regido por una forma de ley. Esta concepción del tiempo revolucionó la filosofía natural, impulsando la magnífica expansión del siglo V.

Las primeras nociones del espacio

Probablemente, las primeras nociones del espacio las tenían ya los *Homo ergaster* en la forma de *distancia recorrida*: a mayor distancia, mayor cansancio. Esta misma forma parece haber perdurado hasta los albores de nuestra civilización. Por ejemplo, Hesíodo, en la *Teogonía*, describe así las distancias entre dos lugares míticos:⁷

*Nueve días y noches un bloque de bronce
tardaría cayendo desde el cielo a la tierra.
Y nueve días y noches ese bloque de bronce
tardaría cayendo desde la tierra al Tártaro.*

Esta primitiva noción ya había sido superada por los egipcios, que debían administrar el cultivo de los terrenos que anualmente inundaba el Nilo y destruía los límites entre los campos fértiles. Para reparar los daños debieron desarrollar *relaciones entre distancias* que fueron el germen de la geometría euclídea. Estas relaciones geométricas eran empíricas y no parece haber existido en Egipto la idea de *demonstración*, esencial para conectar distintos conceptos entre sí. Por esto, la geometría egipcia se parece más a la aritmética de Funes, el Memorioso⁸ que a la moderna geometría euclídea.

El pueblo griego, isleño y costero, amaba el mar; navegó por el Mediterráneo desde una inmensa antigüedad y sabía guiarse por las estrellas: tenía clara la noción de *dirección*, necesaria para hallar la ruta correcta. Así, por ejemplo las instrucciones que Calypso le da a Odiseo para su regreso a casa son:⁹ *Alegre desplegó su vela el brillante Odiseo... mientras miraba las Pléyades y el tardío Boyero y la Osa que siempre circula en su lugar..., y es la única que*

⁷ Hesíodo (1984).

⁸ Borges (1989).

⁹ Homero (1938) Canto 6.

no participa de los baños del Océano; pues la bella Calypso le había ordenado tenerla a su izquierda en su viaje marino.

Con estas herramientas el comercio griego se desarrolló mientras salían de la Edad Oscura y las pequeñas aldeas se transformaban en *pólis*: las ciudades-estado. Pero mientras sus ciudadanos combatían, los comerciantes navegaban y los poetas componían, una callada revolución se desarrollaba en las sombras.

Los primeros pasos en geometría

Las ricas ciudades jónicas desarrollaron gobiernos que aprovechaban el arte y la ciencia para adquirir prestigio y riquezas. Como consecuencia de las necesidades del comercio, ya que a las islas no se llega caminando,¹⁰ se desarrolló el conocimiento de la astronomía y de la geometría. Y Mileto, una de las *pólis* jónicas más ricas, dio origen a la ciencia y la filosofía. Y esto, al menos, desde el siglo VI antes de Cristo, pues se atribuye a Tales, uno de los «siete sabios de Grecia», la preocupación por lo que ocurría en el cielo:¹¹

Después de los negocios públicos (Tales) se dio a la especulación de la Naturaleza. ...escribió dos cosas, que son: Del regreso del sol de un trópico a otro y Del equinoccio: lo demás, dijo, era fácil de entender.

Pero también se le atribuye a Tales un método (basado sobre la semejanza de triángulos) para medir la distancia de un barco a tierra.¹² Se basaba sobre el *teorema de Tales*, supuestamente el primer teorema *demostrado* a partir de ciertas hipótesis, hoy desconocidas. Éste es el primer ejemplo (mítico, tal vez) de geometría racional. Además, se afirma que Tales no sólo lo aplicó a la defensa naval sino también que hizo una investigación básica: la medida de la altura de la pirámide de Keops, comparando las sombras proyectadas por la pirámide y por un cayado.

Hacia el siglo VI aC, la geometría estaba lo suficientemente desarrollada como para aplicarla a problemas complejos de ingeniería. Eupalino construyó entonces un túnel de 1 km de largo y 2 m de ancho, que todavía existe, para llevar agua desde una fuente hasta la ciudad de Samos. El túnel se perforó desde ambos

¹⁰ Homero (1938).

¹¹ Laercio (1991).

¹² Freudenthal (1967: 12).

extremos, como se hace actualmente, y el uso de la geometría euclídea (fundamentalmente, los criterios de igualdad de triángulos y de ángulos) permitió encontrar las direcciones en que debían hacerse las perforaciones para que ambas se uniesen a media distancia,¹³ con un error de medio metro en la horizontal.

El siglo de Pericles

El siglo V a.C. vio una rápida expansión del pensamiento griego creada en la adversidad: las invasiones persas primero a las ciudades-estado jónicas y seguida de varios intentos de invasión a Grecia continental. Atenas, destruida por los persas, se dispuso a reconstruirse. Hacía treinta años había realizado una revolución pacífica implantando un gobierno democrático y ahora, convertida en un importante centro del comercio, dispuso de la riqueza necesaria para desarrollar una cultura integrada.¹⁴

Una mujer, algo casi inconcebible en la Atenas clásica, fue la artífice de la transformación cultural. Hacia el año 450 AC llegó a Atenas Aspasia, una dama de Megara, que abrió una escuela de retórica y filosofía. No sólo muchachas de buenas familias asistieron a sus clases sino también hombres, entre ellos Sócrates, Eurípides y Fidias. Y también acudió Pericles, quien se enamoró perdidamente de ella.¹⁵ Aspasia convenció a su novio que trajese a grandes filósofos a la ciudad: Parménides, Zenón y Anaxágoras. Este último se quedó y fue uno de los fundadores de la escuela filosófica ateniense.¹⁶

Anaxágoras enseñaba:¹⁷

El sol es un globo de fuego y mayor que el Peloponeso...

La luna está habitada y tiene collados y valles...

Probablemente, estas afirmaciones de Anaxágoras son el primer ejemplo conocido de la noción de *distancia angular* y de la noción de *geometría proyectiva*. Para comprender lo avanzado de las ideas de Anaxágoras, observemos que Epicuro, doscientos años después, insistía:¹⁸

¹³ Freudenthal (1967:12).

¹⁴ Durant (1952).

¹⁵ Durant (1952).

¹⁶ Russell (1978).

¹⁷ Laercio (1991).

¹⁸ Epicuro (1993: 46-47).

Para nosotros, el tamaño del sol, la luna o las estrellas es exactamente el que vemos... Así parecen los fuegos en la Tierra al que los ve a la distancia.

Puesto que estas observaciones no están en discrepancia con lo manifiestamente visible... no temamos a los serviles artificios de los astrónomos.

El esfuerzo por interpretar los fenómenos celestes en términos de la física terrestre fue una característica de los filósofos presocráticos,¹⁹ especialmente los jónicos. También compartió otra característica de la ciencia moderna: su carácter subversivo:²⁰

Los ciudadanos de Atenas, como los de otras ciudades en otras épocas y continentes, mostraron cierta hostilidad a los que intentaron introducir un nivel más elevado de cultura... y aprobaron una ley permitiendo la denuncia de los que no practicaban la religión y enseñaban teorías sobre las «cosas de lo alto». Bajo esta ley persiguieron a Anaxágoras, que fue acusado de enseñar que el Sol era una piedra al rojo vivo y que la luna era tierra. No se sabe de fijo qué ocurrió, excepto que Anaxágoras tuvo que abandonar Atenas.

Diógenes Laercio menciona que habiéndose enterado de haber sido condenado a muerte en ausencia, comentó que «desde el nacimiento la Naturaleza había condenado a muerte tanto a sus acusadores como a él».²¹

La muerte de Pericles, al comienzo de la guerra del Peloponeso, inició la decadencia del magnífico florecimiento cultural de Atenas. Si bien habría aún frutos del arte de Sófocles, Eurípides y Aristófanes y la filosofía especulativa recién llegaría a su cenit en el siglo IV a.C., la ciencia dejó de cultivarse en Atenas para resurgir mucho después en Alejandría.

La escuela de Alejandría

Ptolomeo I Auletes (el Flautista), que después fue llamado Soter (el Salvador), era uno de los generales de Alejandro el Grande, posiblemente el más

¹⁹ Laercio (1991), Russell (1978).

²⁰ Russell (1978).

²¹ Laercio (1991).

parecido a su jefe por su formación cultural. Una vez rey de Egipto (ca. 310 a.C.), aprovechó los desiertos que rodeaban su país para defenderse por tierra y formó una buena flota para evitar invasiones por mar. Con esa protección, abundancia de cereales y otras exportaciones, pudo dedicarse a actividades pacíficas, entre ellas la creación de dos entidades culturales que dejarían una marca indeleble en la civilización occidental: la Biblioteca y el Museo.

La primera estaba destinada a coleccionar manuscritos de todas partes del mundo, principalmente helénicos. En una época en que los manuscritos se copiaban trabajosamente a mano y eran objetos de lujo, esta idea revolucionaria de almacenar la cultura universal produjo un cambio profundo en la transmisión del saber. El Museo (templo de las Musas), por otra parte, fue el primer Instituto de Investigación de la historia: allí se contrataron investigadores de primer nivel en todas las ramas del saber. A estos investigadores debemos no sólo lo poco que nos ha llegado de la literatura y la filosofía griegas, sino también las primeras investigaciones sistemáticas en Astronomía y Matemáticas.

La sistematización de Euclides

El más conocido de los investigadores del Museo fue Euclides de Alejandría, que desarrolló el primer texto de Física Teórica de la historia: los *Elementos de Geometría*. En efecto, trata de describir el espacio físico en términos de unas pocas hipótesis básicas: los *postulados geométricos*. Euclides logró esta hazaña introduciendo simplificaciones importantes, similares a las que hace un físico teórico cuando desea analizar un problema complejo.

Características del enfoque euclideano son las idealizaciones. Esto es particularmente cierto en las *Definiciones* que hay al principio del libro. Por ejemplo:

- Punto es lo que no tiene partes.
- Línea es largo sin ancho.

y otras similares. Desde el punto de vista de un matemático, tales definiciones son innecesarias, pero para un físico teórico constituyen una lista de las simplificaciones necesarias para tratar al espacio.

La simplificación más importante que introdujo Euclides fue la supresión del tiempo y del movimiento en sus consideraciones. Esta simplificación fue esencial porque la civilización helénica nunca tuvo una descripción consistente del movimiento, otra de las nociones esenciales para la descripción del espacio físico.

Los *Elementos de Geometría* describen un espacio estático, separado de toda conexión con el cambio y el devenir. Esta gran simplificación de Euclides fue el origen de su éxito. Después de la Biblia, *Elementos de Geometría* es el segundo *best-seller* de Occidente.

Espacio y tiempo se reúnen

Probablemente, uno de los descubrimientos conceptuales más importantes de la escuela de Alejandría fue el de que espacio y tiempo están conectados a través de la relación de simultaneidad. Tal vez el primero en conseguirlo fue Eratóstenes, quien por primera vez determinó el radio de la Tierra.

Eratóstenes observó que en el mismo día del año el sol se encontraba en el cenit sobre la ciudad de Siena mientras que formaba un ángulo pequeño en Alejandría. El lucrativo comercio de Egipto con Sudán había hecho conocer bien la distancia entre Alejandría y Siena. La aplicación de relaciones geométricas sencillas le permitió a Eratóstenes determinar el radio y la circunferencia de la Tierra, esta última con una precisión impresionante para la época.²² Aún más impresionantes son los trabajos de Aristarco de Samos e Hiparco de Nicea, que fueron capaces de medir el radio de la Luna y la distancia Tierra-Luna en excelente acuerdo con el valor moderno.²³ Hay varios puntos sutiles en el argumento de Hiparco: usó las nociones de distancia recorrida, de velocidad, de simultaneidad y de distancia angular para llegar a su excelente resultado.

La búsqueda del movimiento

La búsqueda de la ley que rige el movimiento de los astros está ligada, indisolublemente, al problema del cambio: comprender el cambio, buscar una forma de estabilidad, fue una meta desde que Heráclito enunció que «todo fluye» (Sección 2). No es de extrañar que la inestabilidad perpetua que pregonó haya aterrorizado a los griegos, pues aún nos aterroriza, como lo dice un *rubái* de Borges:²⁴

*Torne a afirmar que el fuego es la ceniza,
La carne el polvo, el río la huidiza*

²² Berry (1961), Abetti (1952).

²³ Berry (1961), Abetti (1952).

²⁴ Borges (1989, III: 371).

HÉCTOR VUCETICH

*Imagen de tu vida y de mi vida
Que lentamente se nos va de prisa.*

Las respuestas al desafío planteado por Heráclito fueron variadas. Parménides y los eléatas desarrollaron una filosofía opuesta, casi desesperada: el cambio no existe. Entre ellos, es Zenón el más próximo al pensamiento moderno, al mostrar que la forma más obvia del cambio, el movimiento, conduce a contradicciones:²⁵

...la flecha en movimiento está inmóvil... en el acto que ocupa un espacio igual a sí mismo, o está en reposo o bien en movimiento, pero como el móvil está siempre en el instante, la flecha en movimiento está inmóvil.

Este argumento, como lo ha observado Bertrand Russell, no es el sofisma de un «macaneador»: es una profunda intuición física, formulada en un lenguaje inapropiado.

La concepción aristotélica del movimiento

La física y la matemática griegas se ocuparon, fundamentalmente, de objetos estáticos. No hubo ningún estudio profundo de las leyes del movimiento, como los de Arquímedes sobre estática. El movimiento planetario, casi el único que se trató en forma matemática, se describió con modelos simplificados, que no lo explicaban. Por ejemplo, Eudoxo de Cnido, desarrollando ideas de Platón, construyó un modelo cinemático del movimiento celeste: cada planeta estaba movido por cuatro «esferas celestes», salvo el sol y la luna, que sólo necesitaban una.²⁶ Los modelos de movimiento planetario de Aristarco de Samos, Hiparco de Nicea y de Claudio Ptolomeo tenían las mismas características: puramente cinemáticos, describían con mayor o menor precisión los movimientos celestes pero que no los explicaban.

El primer intento que conocemos en detalle, de explicar el movimiento planetario con un modelo físico, se debe a Aristóteles.²⁷ En la filosofía aristotélica, todo movimiento requería un motor:

²⁵ Mondolfo (1958), Heráclito (1983).

²⁶ Abetti (1952), Berry (1961), Koestler (1963), Toulmin and Goodfield (1965).

²⁷ Abetti (1952), Berry(1961), Koestler (1963), Toulmin and Goodfield (1965).

Todo móvil debe ser movido por un motor. ...[Por lo tanto] es necesario que cada cuerpo en el espacio sea movido por otro... Y el motor, por otro motor, pues también se mueve, y éste a su vez por otro.²⁸

Puesto que todo móvil es movido por un motor... es necesario que haya un primer motor...y que el primer motor sea inmóvil.²⁹

Además, el movimiento en Aristóteles podía ser «natural» o «forzado». En el movimiento natural un cuerpo tendía a ocupar su «lugar natural» en el espacio: los leves arriba, los graves abajo. Los cuerpos celestes, sin gravedad ni ligereza, se mueven necesariamente con movimiento «natural» circular.

Con esta teoría cualitativa del movimiento, Aristóteles podía explicar el movimiento planetario introduciendo las «inteligencias motrices» y admitiendo que los objetos celestes sólo podían moverse espontáneamente en forma circular. La explicación era, sin embargo, puramente cualitativa: los modelos cuantitativos astronómicos quedaban fuera del esquema aristotélico.

La concepción de que el movimiento de los cuerpos celestes era naturalmente circular, obligó a modificar una de las conclusiones de la geometría de Euclides: el Universo aristotélico era necesariamente finito, encerrado por la *esfera de las estrellas fijas*. Ésa fue la primera separación entre matemáticas y física: el modelo matemático de Euclides sólo servía para explicar el interior de la esfera de las estrellas fijas y no puede ser considerado un modelo del Universo como un todo.

La concepción aristotélica del movimiento pasó a occidente a través de los árabes y, en sus mejores momentos, la teología medieval identificó al Primer Motor con Dios:³⁰

l' amor che move il sole e l' altre stelle

La ruptura con el pasado

El análisis correcto del cambio pertenece a la edad de la razón y ayudó a originarla. La astronomía jugó aquí un papel importante y ese fue uno de los

²⁸ Mondolfo (1958, II: 38).

²⁹ Mondolfo(1958, II:38).

³⁰ Alighieri (1972, Par. XXXIII: 145).

reencuentros más fértiles entre ambas ciencias. El primer paso, fue el intento de Copérnico por reemplazar el pesado modelo geocéntrico ptolemaico por el heliocéntrico, en principio más sencillo.³¹ El modelo de Copérnico, sin embargo, es sólo una *remake* del aristotélico: razones teológicas sugieren que el Sol es el objeto más «noble» y debe ocupar el centro del Universo, el «movimiento natural» de la Tierra y los planetas sigue siendo el circular.

Las investigaciones astronómicas de Tico de Brahe, convenientemente subsidiadas por el trabajo agotador de numerosos siervos de la gleba,³² permitieron formar la primera base de datos útil para el trabajo astronómico de su época. Ya Copérnico se había quejado a su discípulo Rético la poca confiabilidad de los datos astronómicos del Almagesto y las precisas observaciones de Tico mostraron poco después las deficiencias del modelo aristotélico del movimiento, basado sobre el principio del movimiento circular.

La ruptura con el pasado se produjo con el trabajo de Képler sobre el movimiento de Marte,³³ quien partió de varias oscuras convicciones, que lo guiaron en medio de una oscura selva de errores, a la formulación correcta de las leyes del movimiento:

- El sol, como centro del Universo, ejerce alguna influencia física sobre el movimiento planetario.
- El movimiento planetario obedece leyes matemáticas simples.
- La estructura del sistema solar está también determinada por leyes matemáticas simples.

De estas hipótesis, tal vez la primera fue la que tuvo mayor influencia en los años siguientes. La precisión de los datos recogidos por Tico exigían un análisis detallado del movimiento. Képler hizo entonces varias hipótesis *físicas* sobre el origen del movimiento:

*Físicos, aguzad el oído pues ahora vamos a invadir vuestro territorio.*³⁴

La hipótesis de Képler fue que el Sol emitía una fuerza similar a una escoba que empujaba los planetas en sus órbitas. Con razonamientos incorrectos, basándose sobre premisas incorrectas, Képler halló las leyes correctas del

³¹ Koestler (1963), Toulmin and Goodfield (1965), Kuhn (1993).

³² Koestler (1963).

³³ Koestler (1963).

³⁴ Citado en Koestler (1963: 319).

movimiento planetario. Éste fue el punto crítico de la revolución copernicana: la que terminaría por cambiar nuestra concepción del mundo.

El análisis del movimiento

Deducir las leyes de Képler de alguna otra ley física no fue cosa trivial, para la época. Abundaban los datos, pero no existía ningún marco teórico suficientemente amplio como para sintetizarlo. La teoría aristotélica hacía agua por varias partes como ya lo habían advertido los académicos medievales, quienes introdujeron la noción del *impetus*: una propiedad que la flecha adquiriría al ponerse en movimiento y que la mantenía en ese estado mientras se agotaba. Nuevamente, la teoría era cualitativa, si bien simplificaba profundamente el problema: en lugar de infinitos motores existía una propiedad característica del estado del cuerpo.

Los primeros pasos certeros fueron las hipótesis de Galileo sobre la inercia:³⁵

Cualquiera que sea el grado de velocidad que se dé a un móvil, está por su propia naturaleza, indeleblemente impreso en él, con tal de que se eliminen todas las causas de aceleración o retardo...

Ésta era la clave del laberinto medieval: la existencia de un movimiento espontáneo, el movimiento inercial. El principio de inercia (que demolía algunas de las demostraciones medievales de la existencia de Dios) demostró su valor en los trabajos de Galileo sobre el movimiento de los proyectiles:³⁶ el primer análisis moderno del movimiento, comparable en rigor a los trabajos de Arquímedes.

El propio Galileo aplicó por primera vez el principio de inercia a los fenómenos celestes, demoliendo algunos argumentos contra el movimiento de la tierra. El ejemplo que utiliza es muy bello:³⁷

Encerraos con un amigo bajo cubierta en la sala más espaciosa de un gran navío y procurad que haya allí moscas, mariposas y similares animalitos voladores; llevad también un gran recipiente con agua y pececillos dentro; preparad además un jarro para dejar caer agua, gota a gota, en otro de cuello angosto colocado debajo. Ahora, con el

³⁵ Galilei (1945), Boido (1996).

³⁶ Galilei (1945).

³⁷ Citado en Boido (1996).

HÉCTOR VUCETICH

barco en reposo, observad con diligencia cómo aquellos animalitos voladores van en todas direcciones dentro de la sala; veréis que los peces vagabundean indiferentes hacia cada parte del recipiente y que todas las gotas que caen entrarán en el jarro de abajo... Cuando hayáis observado atentamente todas estas cosas..., hacedlo mover con la velocidad que gustéis (siempre que el movimiento sea uniforme...); no percibiréis el menor cambio en ninguna de las cosas nombradas ni podréis determinar si el navío se mueve o está quieto...

Con ese ejemplo didáctico, Salviati convence fácilmente a Sagredo y con mayor dificultad al tonto de Simplicio, de la imposibilidad de determinar el movimiento de la tierra por observaciones internas. La segunda contribución de Galileo, la aplicación del telescopio a la astronomía, queda opacada por su descubrimiento de la inercia.

La síntesis newtoniana

El principio de inercia no era, sin embargo, suficiente. El paso siguiente se debe a Newton, con a ayuda esencial de Barrow, Huyghens, Leibnitz y Halley, con los que mantuvo relaciones mucho menos que amistosas.

Desconocemos los detalles de las investigaciones que condujeron a la invención del cálculo infinitesimal, a la formulación de las leyes del movimiento y al descubrimiento de la ley de gravitación universal: los actores del drama ocultaron los múltiples ensayos que debieron hacer para resolver el acertijo.

La síntesis final de Newton³⁸ resolvió el problema del movimiento. La solución introducía la noción de función: una genuina creación de la edad de la razón. La posición de un móvil es una función del tiempo: en cada instante, ocupa una posición bien definida. Así pues, la noción de cambio analizada en términos modernos, mostró que la intuición de Zenón era correcta: ¡la flecha se mueve *porque* en cada instante está inmóvil!³⁹ En las palabras de Bertrand Russell:⁴⁰

³⁸ Newton (1946).

³⁹ Kasner and Newman (1957).

⁴⁰ Russell (1948).

En este mundo caprichoso, nada es más caprichoso que la fama póstuma. Una de las víctimas más notables de la falta de juicio de la posteridad es Zenón de Elea... Después de dos mil años de continua refutación... Weierstrass, desterrando estrictamente los infinitesimales, ha mostrado por fin que vivimos en un mundo sin cambio, y que la flecha, en cada momento de su vuelo, está verdaderamente en reposo.

Para distinguir entre los estados de «reposo» y «movimiento» hubo que inventar todo un cálculo de funciones, el cálculo infinitesimal, e introducir sutiles disquisiciones sobre la relatividad del movimiento. Y finalmente se halló que ambos estados eran el mismo.

La naturaleza del espacio y del tiempo

Las investigaciones anteriores dilucidaron la *estructura* del espacio y del tiempo, así como algunas de sus relaciones mutuas, pero dejaron su *naturaleza* sin analizar. La naturaleza ontológica de espacio y tiempo ha sido un tema importante de debate para físicos y filósofos durante los últimos 400 años. El corazón del debate ha sido la confrontación entre dos posiciones antagónicas: absolutismo y relacionalismo. El primero, sostenido por Newton en su famosa discusión con Leibnitz (por intermedio de S. Clarke)⁴¹ fue enunciado por él en los *Principia*^{42 43}

El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí y por su propia naturaleza, fluye uniformemente, sin relación con cosa externa alguna.

El espacio absoluto, por su propia naturaleza, sin relación con cosa externa alguna, permanece siempre idéntico e inmóvil.

Así, la posición absolutista considera al espacio-tiempo una cosa, tal como lo son planetas y electrones: el espacio-tiempo sería una entidad física dotada de propiedades concretas.

⁴¹ Alexander (1983).

⁴² Newton (1946).

⁴³ Las traducciones castellanas de los textos son del autor.

En cambio, la posición relacionalista afirma que el espacio-tiempo no es una cosa sino un complejo de relaciones entre las cosas físicas. En las palabras de Leibnitz:⁴⁴

He dicho más de una vez que mantengo que el espacio es algo meramente relativo, como lo es el tiempo; que mantengo que es un orden de coexistentes, así como el tiempo es un orden de sucesiones.

Una consecuencia importante de las ideas de Leibnitz es que si el espacio-tiempo no es un concepto ontológico primitivo, debería ser posible construirlo partiendo de un nivel ontológico más profundo. Es decir, las relaciones espacio-temporales deberían ser definibles a partir de relaciones más fundamentales. Ha habido varios intentos de analizar la naturaleza relacional del espacio-tiempo, tanto subjetivistas y fenomenológicos⁴⁵ como objetivos y realistas.^{46 47}

El mundo relativista

El trabajo einsteniano de 1905 titulado «Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento»,⁴⁸ introdujo una nueva concepción del espacio y el tiempo.

Ya hemos dicho que desde Galileo se sabía que las leyes de la mecánica satisfacen el *Principio de Relatividad*: «Las leyes de la Mecánica son las mismas en todos los sistemas inerciales». Los sistemas inerciales se definen, groseramente, como aquellos en los cuales un cuerpo aislado se mueve con movimiento rectilíneo y uniforme.

Ahora bien, las leyes electromagnéticas parecían depender del sistema de referencia y los físicos decimonónicos, con las notables excepciones de H. A. Lorentz y H. Poincaré, habían elegido aceptarlas y prescindir del Principio de Relatividad. Esto significa, entre otras cosas, que existe un sistema de referencia privilegiado, llamado el «éter luminífero», en donde la luz se propaga con la misma velocidad en todas las direcciones. En otros sistemas de referencia, la velocidad

⁴⁴ Alexander (1983).

⁴⁵ Por ejemplo, Carnap (1967), Basri (1973).

⁴⁶ Bunge and Máynez (1977), Bunge (1977).

⁴⁷ Véase también Romero *et al.*(1998).

⁴⁸ Einstein (1905).

de la luz dependería de la dirección de propagación de la misma forma que la velocidad del sonido depende de la dirección del viento.

En su trabajo, Einstein mostró, con razonamientos muy sutiles pero sencillos, que el principio de relatividad es compatible con las leyes del electromagnetismo, en particular con la independencia de la velocidad de la luz del sistema de referencia. Pero para ello, tuvo que arrojar por la borda dos postulados que todos los científicos habían aceptado inconscientemente desde la época de Newton: el espacio y el tiempo son entidades independientes, absolutas. Estos postulados, tomados de la tradición filosófica occidental, eran los culpables de las dificultades del electromagnetismo.

En la nueva concepción del tiempo, cada sistema de referencia inercial tiene su propio transcurrir del tiempo y todos ellos son igualmente legítimos para describir las leyes de la naturaleza. Pero en una teoría relativista, debe refinarse aún más este concepto: es necesario *sincronizar* los relojes de regiones distantes, al menos en principio. Esto es imposible durante tiempos finitos, pues ningún proceso físico puede propagarse con velocidad mayor que una velocidad límite: la velocidad de la luz. Así, nuestra vida y la de hipotéticos habitantes de un planeta en la galaxia de Andrómeda están desincronizadas durante unos millones de años. Durante ese plazo, ninguno de nuestros actos influirá en sus vidas ni ellos en las nuestras.

Ambos planetas están completamente separados.

La impresión que produjo la formulación einsteniana de la relatividad fue muy profunda. Inspirado por las ideas de Einstein, el matemático alemán H. Minkowski introdujo el *espaciotiempo*: un universo de cuatro dimensiones, cuya cuarta dimensión es el tiempo con una declaración revolucionaria:⁴⁹

La visión del espacio y el tiempo que deseo mostrarles nace del humus de la física experimental y en eso yace su fuerza. Es [una visión] subversiva. Desde ahora, el espacio y el tiempo en sí mismos, están condenados a transformarse en sombras y sólo cierta unión entre ellas preservará una realidad independiente.

La teoría de la relatividad no afirma que «todo es relativo». Por el contrario, existen muchas cantidades que son «absolutas»; es decir, independientes del sistema

⁴⁹ Perret and Jeffery (1955: 75).

de referencia. Así, aunque espacio y tiempo son relativos, el espaciotiempo es absoluto. Y también lo son otras entidades físicas: la masa, la carga, la entropía.

El Universo bloque

Las leyes de la física se expresan geoméricamente en el espaciotiempo donde la historia de cada partícula forma una figura estática en el mundo tetradimensional: su *línea de Universo*. Así, pues, cada uno de nosotros describe en el Universo de Minkowski una compleja figura estática: un haz de fibras (nuestros átomos individuales) que se integran y desintegran en un único objeto geométrico inmóvil, que se estira a lo largo de una dirección particular del espacio de Minkowski: el tiempo. El determinismo y la relatividad, pues, condujeron por un camino tortuoso y oscuro a reconstruir el Universo de Parménides.

Tal vez una comparación ayude a comprender esta figura inmutable: en un DVD, todo el desarrollo de una película se encuentra *simultáneamente* en el disco compacto. Así, en *Casablanca* la secuencia inicial, el encuentro entre los ex-amantes, el *racconto* de su vida en París... yacen simultáneamente como marcas ópticas en la superficie del CD. Pero cuando lo miramos, sólo percibimos el cuadro que impresiona nuestra retina, que nos da la ilusión de participar del devenir de los personajes. Cualquier repetición de la experiencia producirá la misma secuencia de acontecimientos.

La existencia del Universo bloque tiene profundas consecuencias para la ley moral. Si cada uno de nuestros actos está determinado por una figura geométrica inmutable en el espaciotiempo, ¿cómo puede hablarse de libre albedrío, tan necesario para distinguir la noción del bien y del mal? Tal vez el azar, que en física toma la forma secreta del caos, pueda explicar la existencia del libre albedrío y justificar una ética basada sobre la noción de libertad.

De esta manera, después de dos milenios y medio, se reconciliaron los puntos de vista de Heráclito y Parménides: el Universo es un objeto de cuatro dimensiones, estático e invariante. Nosotros sin embargo, pequeñas partes del mismo, percibimos nuestra vecindad (en el espacio y el tiempo) como un remolino de cambios. Esta bella síntesis de dos corrientes aparentemente opuestas del pensamiento occidental es una de las realizaciones más importantes de la ciencia del siglo XX.

Agradecimientos

Deseo agradecer a la Dra. Ana María González de Tobía, así como a los integrantes del Área de Filología Griega, por su amable invitación a participar del 4º Simposio Internacional, su asistencia y amistad.

BIBLIOGRAFÍA

- Abetti, G. (1952) *The History of Astronomy*, New York.
- Alexander, H. G. (1983) *Leibniz-Clarke Correspondence*, Manchester.
- Alighieri, D. *La Divina Comedia*. Carlos Lolhé, S. A. I. C. y F., 1972.
Traducción, prólogos y notas de Ángel J. Battistessa.
- Basri, S. A. (1973) *A Deductive Theory of Space and Time*. Studies in Logic and the Foundations of Mathematics, Amsterdam.
- Berry, A. (1996) *A Short History of Astronomy*, New York.
- Boido, G. (1996) *Noticias del Planeta Tierra*, Buenos Aires.
- Borges, J. L. (1989) *Obras Completas*, Barcelona.
- Bunge, M. and García Máynez, A. (1977) *A Relational Theory of Physical Space*. en *Int. J. Theor. Phys.*, 16:1.
- Bunge, M. A. (1967) *Foundations of Physics*, Berlin, Heidelberg, New York.
- Bunge, M. A. (1977) *Ontology I: The Furniture of the World*, Dordrecht, Holland.
- Carnap, R. (1967) *The Logical Structure of the World*, Berkeley & Los Angeles.
- Durant, W. (1952) *La vida de Grecia*, Buenos Aires.
- Einstein, A. (1905) «Zur elektrodynamik bewegter körper», en *Ann. Phys.*, 17:891.
- Epicuro (1993) *The Essential Epicurus*, Buffalo, N. Y.
- Freudenthal, H. (1967) *Las matemáticas en la vida cotidiana*, Madrid.
- Galileo Galilei (1945) *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, Buenos Aires.
- Gamow, G. (1962) *Biografía de la Física*, Madrid.
- Heidel, W. A. (1946) *La edad heroica de la ciencia*, Buenos Aires.
- Heráclito (1959) *Fragmentos*, Buenos Aires.
- Parménides – Heráclito (1983) *Fragmentos*, Barcelona.
- Hesíodo (1984) *Teogonía y otros textos*, Buenos Aires.
- Homero (1938) *La Odisea*, Buenos Aires.
- Homero (1977) *La Ilíada*, Buenos Aires.
- Jeanes, J. (1960) *Historia de la Física*, México.
- Kasner, E. and Newman, J. (1957) *Matemáticas e Imaginación*, Mexico.
- Koestler, A. (1963) *Los sonámbulos*, Buenos Aires.

HÉCTOR VUCETICH

- Kuhn, Th. S. (1993) *La revolución copernicana*, Barcelona.
- Diógenes L. (1991) *Vidas de los filósofos más ilustres*, México.
- Mondolfo, R. (1958) *El pensamiento antiguo*, Buenos Aires.
- Newton, I. (1946) *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, Berkeley.
- Perret, W. and Jeffery, G. B. editors (1955) *The principle of relativity*, Dover.
- Popper, K. R. (1992) *La sociedad abierta y sus enemigos*, Barcelona.
- Romero, G., Pérez Bergliaffa, S. and Vucetich, H. (1998). «Steps towards an axiomatic pregeometry of space-time», en *Int. J. Theor. Phys*, 37: 2281.
- Russell, B. (1948) *Los principios de la matemática*, Buenos Aires - México.
- Russell, B. (1978) *Historia de la filosofía occidental*, Madrid.
- Toulmin, S. and Goodfield, J. (1965) *The Fabric of the Heavens*, New York.