

## UNA PROPUESTA TEMÁTICA PARA UN CURSO DE MECÁNICA NEWTONIANA

**DORA DEYANIRA BERNAL NIETO**

Profesora Asociada

Departamento de Física-Facultad de Ciencias-Universidad Nacional de Colombia

**Bernal, D. (1995): Una Respuesta Temática para un Curso de Mecánica Newtoniana. Geofís. Colomb. 3:67-71. ISSN 0121-2974**

### RESUMEN

En este trabajo se busca explicitar, haciéndolos presentes en el debate histórico, algunos de los presupuestos epistemológicos involucrados en la física aristotélica, la física newtoniana y en las bases de la relatividad de Einstein.

Se propone trabajar, con los estudiantes del primer curso de Física para las carreras de Ciencias, sobre el cambio de pensamiento entre la física aristotélica y la newtoniana, y ésta y la relativista, aclarando las "reglas de juego" involucradas en cada una de estas teorías para que su conocimiento mejore los resultados de su trabajo en física.

### ABSTRACT

According with a analysis from a Historical debate, this work tray to clear some epistemologic concepts, involved within the Aristotelic and Newtonian physics and an the Einstein relativity theory bases.

Its proposed to works with students of physics from each sciences academic programs about of the thought change between the Aristotelic and Newtonian physics ans this last one with the relativistic theory, in order to clear the "Play Rules" involved in each theory so that its knowledge to improve the results from the physics works.

### 1. INTRODUCCION

Los estudiantes que normalmente recibimos para iniciar su formación universitaria en física consideran que esta disciplina tiene poco que ver con su cotidianidad. No es común encontrar en ellos la capacidad para dar explicaciones de acontecimientos diarios de acuerdo con formulaciones vigentes de la física. Y reconocer que las explicaciones que se aprenden en la academia hacen parte de un modo de pensamiento aceptado a partir de un momento histórico es aún menos común.

La comprensión cabal de los conceptos de la física exige la explicitación de ciertos presupuestos epistemológicos involucrados en esos conceptos (el marco teórico en el cual se definen, la amplitud del campo de fenómenos a los cuales se aplican, el lenguaje en el que deben expresarse y las características de ese lenguaje, la metafísica implícita o explícita a la que corresponden). Estos presupuestos se hacen presentes en el debate entre las distintas teorías (los presupuestos de la física aristotélica se hacen presentes en su comparación con la física newtoniana y los de ésta en el surgimiento de la física einsteniana). El trabajo en física tiene ciertas reglas de juego y los presupuestos a los que se hace referencia son partes de las reglas de juego que es necesario conocer. Muchos de los errores que cometen los estudiantes corresponden precisamente al desconocimiento de esas reglas fundamentales.

Se propone iniciar el curso de física general, la parte de mecánica, haciendo que el estudiante reflexione sobre el cambio de pensamiento, cambio de modelo de explicación, de la física aristotélica a la física newtoniana, logrando, cuando sea el caso, que reconozca que su propio pensamiento debe modificarse para acceder a la

comprensión matemática de los fenómenos del movimiento.

Se propone también terminar el curso logrando que comprendan otro cambio histórico importante: de la concepción de espacio y tiempo absoluto de Newton a la de espacio y tiempo relativo de Einstein. Se cuenta con la evidente curiosidad de los estudiantes por saber algo de la llamada física moderna y de la tan nombrada Teoría de la Relatividad.

Otra idea común en nuestros estudiantes es que en los cursos de física aprenderán "la verdad" sobre cómo funciona la naturaleza. Seguramente, si se muestran ejemplos históricos concretos, se logrará que comprendan que "la ciencia" es hecha por hombres que plantean "modelos de explicación", teorías que fundamentalmente no contradigan los hechos empíricos, pero que es posible que existan modelos contradictorios que den explicaciones igualmente válidas de situaciones comunes.

### 2. ¿DONDE CAERA?

Retomando algunas de las preguntas planteadas en la época galileana y respondidas por Galileo para la física de la Tierra en movimiento, es posible descubrir los modos de explicación de nuestros estudiantes.

Para ellos, como para todo el mundo, es obvio que la Tierra se mueve y fácilmente llegan a los valores de la velocidad de rotación y de traslación: la rapidez de un punto sobre el Ecuador es de 1.600 km/h o 450 m/s para el movimiento de la tierra sobre su propio eje y de 103.000

Km/h o 31.000 m/s para su movimiento alrededor del sol (valores aproximados asumiendo los valores de las velocidades constantes).

Comparando estos valores de velocidades con valores cotidianos conocidos, rapidez de un atleta en una carrera de 100 m (aproximadamente 10 m/s), rapidez de un automóvil en carretera (120 Km/h) y otros, es fácil reconocer los enormes valores de la rapidez de los movimientos de la tierra.

Si se formulan las siguientes preguntas:

- ¿Dónde volverá a caer un proyectil disparado en línea recta hacia arriba?
- ¿Dónde caerá cualquier objeto que se suelta desde la ventana del salón de clase? (Se pueden dar longitudes aproximadas de la caída y pedirles que calculen el tiempo de caída y las distancias recorridas por un punto sobre la tierra en ese tiempo).

La respuesta es la esperada para un sistema de referencia sobre la superficie de la tierra. Pero, aunque inicialmente no se tenga suficiente claridad sobre el problema implicado en la no definición del sistema de referencia implícito en la pregunta, se generan importantes inquietudes.

La discusión rica e interesante se da al solicitar la explicación de las respuestas dadas y de las que aparecen al formular las siguientes preguntas:

- ¿Cómo es posible que la Tierra se mueva a estas tremendas velocidades y sin embargo no oigamos silbar el aire que deja tras de sí?
- ¿Porqué los pájaros se atreven a soltarse de los árboles, volar hasta el suelo y comer gusanos situados tanto al este como al oeste del árbol?

Estas preguntas fueron planteadas a Copérnico y a Galileo, pero mantienen vigencia y permiten retomar modos de enseñanza siempre válidos.

La experiencia es diversa en cada uno de los grupos de estudiantes, pero lo más probable es que encontremos intentos de explicación que correspondan al modo de pensamiento aristotélico.

Es posible que se tenga que regresar sobre muchas de las respuestas dadas, en puntos pertinentes del desarrollo del curso, y que sea necesario dar una explicación aún en el caso de respuestas acordes con el modo de pensamiento newtoniano.

La dificultad para dar explicaciones a interrogantes sobre el movimiento en relación con una Tierra que se mueve, permite mostrar el gran cambio de pensamiento entre la física aristotélica y la física newtoniana.

### 3. FISICA ARISTOTELICA

¿Cómo se pensaba antes de Newton?. Busquemos caracterizar, en pocos enunciados, la física antigua, física aristotélica por ser Aristóteles su mas grande representante, física adaptada a los conceptos de una "Tierra inmóvil".

El Cosmos es finito y esférico, con un centro, donde la Tierra tiene su lugar "natural".

La Tierra y "el Cielo" son entidades diferenciadas. Hay una física diferente para cada una de estas entidades:

Los objetos de la Tierra se componen de cuatro elementos: aire, tierra, fuego y agua. Son livianos o pesados dependiendo de la proporción en que intervienen los cuatro elementos. La Tierra es "naturalmente" pesada, el fuego es "naturalmente" liviano. Agua y aire están entre estos dos extremos.

El movimiento "natural" de un cuerpo pesado es hacia abajo. El movimiento "natural" de un cuerpo liviano es hacia arriba. En consecuencia, el movimiento "natural" (sin obstáculos) de un objeto terrestre es en línea recta hacia arriba o hacia abajo. Obviamente Aristóteles sabía que hay movimientos en direcciones distintas a las indicadas. Tales movimientos son "violentos", contrarios a la naturaleza del cuerpo y sólo se presentan cuando alguna fuerza actúa para iniciarlos y mantenerlos en su movimiento "antinatural".

En los cielos nada cambia, todo permanece igual, los cielos son "incorruptibles". Los planetas, las estrellas y el sol se consideran perfectos. La luna es el punto divisorio entre la región terrestre de los cambios y la región celeste incorruptible.

Los cuerpos celestes están formados por "éter". El movimiento "natural" de un cuerpo de "éter" es circular. El movimiento de los astros es cerrado, periódico, no hay principio ni fin en ellos.

La Tierra es diferente a los cuerpos celestes por su composición y "propiedades esenciales", el movimiento circular sería contrario a su naturaleza. El movimiento natural de todos los pedazos de materia terrestre es hacia el centro del universo, centro que coincide con el de nuestro planeta. Si la tierra se moviera, al arrojar un cuerpo hacia arriba y luego caer, el cuerpo no caería exactamente sobre el mismo punto desde el cual se lo arrojó.

### 4. CIENCIA MODERNA

Los acontecimientos históricos sobresalientes que permitieron el cambio de pensamiento de la física aristotélica a la física newtoniana son en una rápida enumeración los siguientes:

- En el año 1543 se publica el libro de Nicolás Copérnico "Sobre las revoluciones de las esferas celestes", que presenta un nuevo sistema de astronomía opuesto a la noción de inamovilidad de la Tierra. En la antigua Grecia, Aristarco de Samos había sugerido que la Tierra pudiese tener un movimiento de rotación sobre su propio eje y describir una órbita alrededor del sol.
- La obra de Copérnico, publicada casi 2.000 años mas tarde, basa su descripción en esos dos movimientos terrestres. A pesar de que esa obra no encontró aceptación general, fue el inicio de un proceso que culminó con la formulación de Isaac Newton.

- Copérnico plantea que todos los planetas, incluida la Tierra, giran alrededor del sol y el sol es el centro del cosmos.
- El hombre de ciencia a quien se debe fundamentalmente la introducción del telescopio como instrumento científico, y que estableció los fundamentos de la nueva física, fue Galileo Galilei. Galileo hizo su primera contribución a la astronomía antes de usar el telescopio. En 1604 apareció en la constelación Serpentario una "nova" o nueva estrella. Galileo demostró que se trataba de una verdadera estrella ubicada en los espacios celestes y no dentro de la esfera de la luna. Con ello mostró que podía haber cambios en los cielos, a pesar de Aristóteles para quien los cielos eran inmodificables. Al dirigir el telescopio al cielo donde quiera que miraba encontraba pruebas para defender el sistema copernicano, o por lo menos, para debilitar la autoridad de las teorías antiguas.
- El sistema kepleriano, publicado en 1609, presenta un universo de estrellas fijas en el espacio, un Sol fijo y una sola elipse para la órbita de cada planeta, con una adicional para la luna; y tres leyes (basadas en el análisis de las observaciones de Tycho Brahe) sobre la cinemática de los planetas. Kepler y Galileo exigían la existencia de una sola física, aplicable a los cuerpos celestes y a los cuerpos terrestres comunes.
- La publicación de los "Principia" de Isaac Newton, en 1687, constituye uno de los acontecimientos más importantes en la historia de la física. Si bien la física de los "Principia" ha sido modificada, mejorada, objetada, aún hoy enfrentamos la solución de la mayoría de los problemas de la mecánica celeste y de la física de los cuerpos macroscópicos como lo hizo Newton hace 300 años.

En los "Principia" Newton desarrolla los principios de la dinámica de los cuerpos, enuncia sus tres leyes; aplica estos principios al mecanicismo del universo, enuncia la ley de la gravitación universal; estudia la mecánica de los fluidos y el movimiento de los cuerpos en medios resistentes y otros aspectos de la física general. Para esto utiliza los trabajos de Galileo y los de Kepler.

Aplica la misma física a los cuerpos celestes y a los cuerpos terrestres. Hace desaparecer la dicotomía entre mundo sublunar y mundo supralunar.

## 5. FISICA NEWTONIANA

El primer curso de física está centrado en la comprensión de las leyes de Newton, la aplicación de ellas a la resolución de problemas de mecánica clásica y a la comprensión y aplicación de los principios de conservación derivados de ellas. Este empeño de comprensión y manejo no resulta una tarea fácil con estos grupos de estudiantes, las dificultades las conocemos todos muy bien

Aquí se busca hacer una corta reflexión sobre los problemas de método en la obra de Isaac Newton y aclarar el significado de los conceptos de espacio y tiempo, conceptos previos a sus leyes y necesarios para entenderlas, para luego centrar las críticas sobre la mecánica de Newton en estos conceptos con el ánimo de situarnos históricamente en el momento de su modificación por parte de Einstein.

Para Newton los principios teóricos deben encontrarse por "inducción" a partir de observaciones y experimentos o bien deben provenir de "otras verdades ciertas" (Granés, 1978). Procesos de observación y de análisis conducen a los principios básicos de la teoría. Pero al mismo tiempo, la teoría permite pensar cada fenómeno en términos de conceptos, principios y leyes.

Estos dos procesos: mirar la realidad y sacar conclusiones sobre ella, se alimentan y se determinan mutuamente. La teoría es previa a la reconstrucción racional de la realidad perceptible, los aspectos que aparecen como determinantes están definidos por la perspectiva teórica adoptada. Definidos los fundamentos teóricos la realidad física puede pensarse a través de los conceptos y de los principios generales de la teoría.

La observación newtoniana no es observación pura, no contaminada por preconcepciones (lo que, por otra parte, no sería posible); el análisis está orientado desde la teoría, hay un "modelo" que se debe seguir en cualquier análisis: argumentar a partir de los fenómenos, deducir las causas a partir de los efectos. El modelo newtoniano es un esquema racional entre causa y efecto.

Para Newton la explicación matemática del fenómeno es insuficiente para entender el mundo real que se oculta detrás del fenómeno, pero puede mostrar el camino a verdades fundamentales. La Ciencia en Newton, no es totalmente ajena a perspectivas metafísicas y teológicas.

Existen ideas previas a sus leyes, ideas que él considera necesarias para entenderlas, los conceptos de "espacio absoluto" y "tiempo absoluto" que trascienden lo empíricamente observable.

Newton hace distinción entre ideas absolutas y relativas, verdaderas y aparentes, matemáticas y vulgares, ("en las disquisiciones filosóficas deberíamos abstraer de nuestros sentidos y considerar las cosas en sí mismas, distintas de lo que no son sino medidas sensibles de ellas"; Newton, 1987). El espacio y el tiempo, tal como son concebidos por el común de la gente son relativos, aparentes y vulgares. Para Newton el espacio y el tiempo son absolutos, verdaderos, matemáticos. Matemáticos porque en ellos no se hace referencia alguna a la constitución material de los entes.

El tiempo absoluto, verdadero y matemático fluye siempre de manera uniforme, es una realidad objetiva, independiente de los hombres, sus propiedades no dependen de nada sólo de sí mismo.

El tiempo relativo, aparente y común es una medida sensible, externa de la duración de un movimiento (día, año, hora,...). En la práctica debemos trabajar con tiempos relativos.

El espacio absoluto por su propia naturaleza y sin relación alguna con nada externo permanece siempre similar a sí mismo e inmóvil. El espacio es el continente de todo. El lugar donde se pongan las cosas debe estar antes de las cosas, sus propiedades son previas a las cosas. El espacio es isotrópico, infinito, autosuficiente.

El espacio relativo, ligado al cuerpo, se mueve con el cuerpo a través del espacio absoluto. Movimiento absoluto es

un movimiento con relación al espacio absoluto y el relativo la traslación de un lugar relativo a otro.

"Así en un barco que navega el lugar relativo de un cuerpo es esa parte del barco que posee el cuerpo y que se mueve junto con el barco y el reposo relativo es la continuación del cuerpo en la misma parte del barco. Si pensamos a la Tierra en reposo, el cuerpo que reposa en relación al barco se moverá real y absolutamente con la misma velocidad que tiene el barco sobre la tierra. Mas si la tierra se mueve el movimiento verdadero y absoluto del cuerpo se derivará en parte del movimiento verdadero de la tierra en el espacio inmóvil y en parte del movimiento relativo del barco sobre la Tierra. Y si el cuerpo se mueve también relativamente al barco, su movimiento verdadero se deberá en parte al movimiento verdadero de la tierra en el espacio inmóvil y en parte a los movimientos relativos tanto del barco sobre la tierra como del cuerpo en el barco" (Newton, 1987).

Las causas de los movimientos verdaderos son las fuerzas. Si aparece un efecto no causado por una fuerza, será causado por una "fuerza ficticia o inercial" y será este un movimiento relativo.

Si observamos un movimiento que no sea en línea recta con rapidez constante y no le podamos atribuir la causa a la acción de un cuerpo en su medio ambiente, podemos concluir que se trata de un movimiento relativo.

Con estos conceptos previos se enunciarán las leyes de Newton y se aplicarán a la solución de problemas de la mecánica, teniendo en cuenta que para él estas leyes son las mismas en todos los sistemas inerciales de referencia.

Al trabajar con movimientos relativos, la transformación de las variables cinemáticas de un sistema a otro se hace de acuerdo con las transformaciones de Galileo.

Los presupuestos detrás de las transformaciones de Galileo son:

- El intervalo de tiempo entre eventos medido desde cualquier sistema de referencia en movimiento relativo es el mismo.
- La longitud de un metro es la misma medida desde cualquier sistema de referencia en movimiento relativo.

## 6. CRÍTICA A LOS PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA NEWTONIANA

El libro más importante de Ernst Mach, "The science of mechanics" (1883), se conoce principalmente por la discusión de los "Principia", de Newton, en particular por la crítica de lo que Mach llama "el concepto patológico de espacio y tiempo absoluto", concepto patológico porque es "una pura construcción mental que no se puede encontrar en la experiencia" (Mach, 1960).

Para Mach es imposible determinar un tiempo absoluto, lo que podemos es comparar la duración de dos movimientos, (la duración del movimiento de un péndulo con la duración de otro movimiento). Rechaza el tiempo como realidad objetiva, el tiempo es una construcción humana. Un movimiento nunca

es uniforme en sí mismo, es uniforme con relación a otro. En la realidad comparamos movimientos, se necesita más de un objeto en el universo para hablar de quietud o movimiento.

El comportamiento de un objeto depende de la presencia de los otros cuerpos, hay una dependencia entre las condiciones que determinan los movimientos. Todas las cosas están interrelacionadas entre sí.

Para Mach no hay necesidad de suponer una realidad desconocida que se esconda detrás de las sensaciones. El conocimiento científico del mundo consiste simplemente en la descripción más sencilla posible de las conexiones entre los elementos, sensaciones, y tiene como único objetivo el dominio intelectual de esos hechos con el menor esfuerzo posible de pensamiento, ("no existe nada real excepto las percepciones, y toda la ciencia natural es en última instancia una forma económica de adaptar nuestras ideas a nuestras percepciones"; Mach, 1960).

El programa de la física del siglo XIX consistió, principalmente, en la reconciliación de las nociones de éter, materia y electricidad por medio de imágenes e hipótesis mecanicistas. Esto condujo a deformaciones como la propuesta de Larmor que consideraba al electrón como una torsión o estado de tensión en el éter, permanente pero móvil, que forma partículas discontinuas de electricidad y tal vez de toda la materia ponderada. Había una fe dogmática en la mecánica como base última de todo pensamiento físico.

"The science of mechanics", de Mach, hizo tambalear esta fe en el joven Einstein. Para Einstein: "la grandeza de Mach radica en su escepticismo e independencia a toda prueba" (Holton, 1992). Reconoce que la posición epistemológica de Mach influyó en él en sus años jóvenes. Esto coincide del momento en que el estilo de pensamiento inspirado en Mach apuntaba hacia observables.

## 7. BASES DEL PENSAMIENTO EINSTENIANO

Einstein identifica realidad con lo que nos es dado a través de las sensaciones, los "acontecimientos", en lugar de colocar a la realidad en un plano que está más allá o detrás de la experiencia sensorial: "Tenemos que tener en cuenta que todos nuestros juicios en los que el tiempo entra a formar parte son siempre juicios sobre acontecimientos simultáneos. Si digo por ejemplo "ese tren llegó aquí a las siete en punto" lo que quiero decir es: "la llegada del tren y el que la manecilla pequeña del reloj apunte a las siete en punto son simultáneos. El tiempo en que se produce un acontecimiento es el que está dado simultáneamente al acontecimiento por un reloj estacionario colocado en el lugar del acontecimiento" (Holton, 1992).

La definición de simultaneidad en la teoría especial de la relatividad se basa en el requisito de Mach de que todo enunciado de la física tiene que establecer relaciones entre cantidades observables.

De la misma forma que el tiempo en que se produce un acontecimiento cobra significado cuando se conecta con la experiencia sensorial, (cuando se mide por medio de un reloj situado en el mismo lugar), el lugar o coordenada espacial de un acontecimiento tiene significado solamente en el caso en

que entre dentro de nuestra experiencia sensorial por medio de una medición en su aspecto fundamental, (por medio de una regla presente en el mismo instante).

Einstein modifica los conceptos de espacio y tiempo absolutos de Newton. De abstracciones de nuestros sentidos, independientes del hombre, estos conceptos pasan a corresponder a mediciones sensoriales, siguiendo concepciones de Mach. Pero en el desarrollo posterior de su teoría se apartara fundamentalmente de Mach.

Otro hecho histórico que genera conflicto a finales del siglo XIX es la idea del éter, idea que se hace eficaz a partir de las teorías ondulatorias de la luz.

Newton había rechazado la hipótesis ondulatoria de la luz y de esta manera había favorecido la concepción de la luz como un flujo de partículas. Esta idea se había mantenido durante los siglos XVII y XVIII.

En el siglo XIX se hace muy difícil explicar con esta teoría las franjas de interferencia y difracción, (experiencias de Fresnel y de Young), que sólo pueden ser explicadas si se acepta la idea de la luz como una onda.

Y una onda es una perturbación que se propaga en un medio que debe tener ciertas características de elasticidad. Es entonces cuando la idea de éter comienza a tener el papel protagónico que mantiene durante toda la historia de la física del siglo XIX.

La luz se concibe, por analogía con las ondas sonoras, como una perturbación mecánica del éter, su velocidad es independiente del movimiento de la fuente, como en el caso sonoro, y solo depende de las propiedades del medio.

El éter es un medio material que permea todo el espacio y penetra incluso en los poros de las sustancias sólidas; permanece en reposo coincidiendo con el espacio absoluto de Newton y siendo prácticamente una réplica material de éste. Los físicos se dedican a comprobar su existencia real y a medir sus características físicas por medio de experimentos ópticos, cuyo resultado siempre negativo obligará a reformular una y otra vez sus características y llevará finalmente a descartar esa idea.

Es en este medio histórico donde surge la teoría de la relatividad como una respuesta a la situación de crisis de la física del siglo XIX creada por las críticas a la mecánica newtoniana, los experimentos con electrones a altas velocidades que no concordaban con la teoría conocida hasta el momento y las dificultades con la teoría del éter y la teoría electrodinámica de Maxwell.

## CONCLUSIONES

Se espera que concluido este curso los estudiantes den explicaciones acordes con la teoría newtoniana de los movimientos en una Tierra que se mueve.

No se pretende que los estudiantes entiendan la teoría de la Relatividad Especial, solamente que les quede claro el cambio de concepto de espacio y tiempo absoluto de Newton al concepto de espacio y tiempo relativo de Einstein.

En la corta experiencia que se tiene, (tres semestres consecutivos con el curso de mecánica para estudiantes de segundo semestre de la carrera de química), solamente ha sido posible utilizar las últimas dos semanas de clase para la discusión sobre el surgimiento de la teoría de la relatividad, contando con el estudio previo, por parte de los estudiantes, del capítulo sobre cinemática relativista que viene comúnmente en cualquiera de los textos de física general.

Se espera que los estudiantes comprendan los postulados básicos de la relatividad especial; entiendan el experimento (¿crucial?) de Michelson-Morley; entiendan que, como consecuencia de los postulados básicos, el intervalo de tiempo entre eventos es relativo al sistema de referencia desde el cual se mide y que la longitud de un metro medida desde sistemas de referencia en movimiento relativo con velocidades comparables a la de la luz no es igual; que entiendan, por último, que la transformación de variables cinemáticas de un evento en un sistema de referencia al otro debe hacerse por una transformación, diferente a la de Galileo, la de Lorentz.

Pero este entendimiento se facilita si se tiene información sobre las condiciones de la ciencia en el momento histórico en que surge una nueva teoría.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Granés, J.** 1978: "Newton: Problemas de Método y Fines de la Ciencia". Serie Pensamiento Universitario. APUN 5:12
- Holton, G.** 1992: "Ensayos sobre el Pensamiento Científico en la Epoca de Einstein". pp.170. Alianza Universidad. Alianza Editorial, Madrid 1992.
- Mach, E.** 1960: "The Science of Mechanics: A Critical an Historical Account of its Development". pp/273. The Open Court Publishing Company. Illinois.
- Newton, I.** 1987: "Principios Matemáticos de la Filosofía Natural". pp.129. Alianza Universidad. Alianza Editorial. Madrid.