

PRÓLOGO

La presente publicación pretende analizar la transición que ha tenido lugar en el dominio de la Física, desde la Mecánica Clásica (con las aportaciones de Galileo y de Newton incluidas) hasta la Mecánica Cuántica, pasando por la Mecánica Relativista e incluyendo las contribuciones más representativas para comprender, o al menos vislumbrar, el comportamiento cuántico del apasionante mundo microscópico.

El hecho de haber dedicado más de cuarenta años a enseñar Ingeniería utilizando fundamentalmente la Mecánica Clásica; pero sintiendo la necesidad de matizarla en ciertos detalles, como consecuencia de los nuevos paradigmas incorporados por la Física moderna, me motiva a dedicar cierto esfuerzo y a poner alguna ilusión en el intento de resumir las causas, que han hecho necesaria esta transición, de sintetizar los descubrimientos, que la han posibilitado y de extraer algunas consecuencias, que se derivan de la doctrina impuesta por dichos descubrimientos. No se pretende hacer cierta historia sobre los orígenes y desarrollos de la Mecánica Relativista o de la Mecánica Cuántica sino, exclusivamente, intentar situar al lector ante el análisis de las causas que motivaron la necesidad de dar respuesta a ciertos interrogantes que no quedaban definitivamente contestados por la Mecánica Clásica y a inquietarlo ante las conclusiones emanadas de aquellas respuestas y que encuentran su desarrollo tanto en la Mecánica Relativista como en la Mecánica Cuántica. El interés por este intento pienso que podría haber tenido su origen en las tres razones siguientes:

- a. Es necesario seguir teniendo en cuenta la Mecánica Clásica por sus innegables posibilidades de aplicación al estudio del mundo macros-

cópico; puesto que ha resultado apropiada para describir los fenómenos físicos de nuestro medio ambiente cotidiano y ha propiciado una aportación muy importante para la conquista, durante más de dos siglos, de grandes avances tecnológicos.

- b. Es preciso recordar que, al extender el estudio del mundo que nos rodea a otros fenómenos que, por desarrollarse a velocidades no despreciables frente a la velocidad de la luz, se cometían, en su análisis mediante los postulados de la Mecánica Clásica, errores importantes por no considerar el tiempo que tarda la luz en recorrer la distancia que separa el objeto observado del ojo del observador.
- c. No puede olvidarse, por otra parte, la extensa implicación en el desarrollo social de la Humanidad de un mundo no solo muy rápido sino, a la vez, microscópico (como lo es el Universo de los átomos y de las partículas subatómicas), que nos conduce a un profundo reino de la materia que está más allá de la superficial mecánica determinista de nuestros clásicos.

Conocer con algún detalle las causas y los resultados de esta transición, necesariamente, deben resultar apasionantes para cualquier profesional de la técnica; ya que un buen técnico, aunque no pueda olvidarse de los logros de la primera Mecánica Clásica, tampoco debe ignorar ni las limitaciones que esta Mecánica lleva implícitas ni las posibilidades que pueden ofrecerle tanto la Mecánica Relativista como la Mecánica Cuántica. El técnico moderno necesita la interacción entre todas ellas y, a ayudarle a buscar esta posible interacción, se ha dedicado el esfuerzo y las ilusiones puestos en esta publicación. De la misma manera, puesto que dicha interacción ayuda a profundizar en el conocimiento de la manera como se comporta la Naturaleza, el estudio de la pretendida transición no debe ser indiferente tampoco para los amantes de la Filosofía de la Naturaleza.

Los cambios introducidos durante esta transición hay que buscarlos no solo en la evolución natural, debida simplemente a la progresiva acumulación de conocimientos con el paso del tiempo, sino también en ciertos cambios cualitativos de la cultura científica, cambios surgidos como consecuencia de ciertas crisis científicas que han venido obligando, en determinados momentos históricos, a modificar ciertos paradigmas por la aparición de nuevas ideas, a veces simples y en otras ocasiones complicadas.

En gran parte aquellas crisis (con los cambios de paradigmas subsiguientes) suelen tener su origen en la sucesiva puesta en escena de ciertas constantes en el comportamiento de la Naturaleza, constantes que rigen las normas por las que ésta se gobierna y que los padres de la Mecánica

Moderna han venido descubriendo en su afán por encontrar respuesta a los interrogantes, con los que el proceder de esa misma Naturaleza, dejaba insatisfechas sus ansias por conocer y expresar, cada vez con mayor precisión, el comportamiento del apasionante Universo en que vivimos.

En el desarrollo de los distintos capítulos se huye, en la medida de lo posible, de metodologías más o menos especulativas –propias de las ciencias puras– y se intenta buscar una aproximación al pragmatismo –característico de las ciencias aplicadas– partiendo de los conocimientos que suelen ser normales en la formación de los Profesionales de la Técnica y apoyándose en la metodología pedagógica seguida en las Escuelas de Ingeniería.

Bajo estas premisas se modulan las formulaciones propuestas para el estudio de los principios básicos de la Ingeniería por la Mecánica Clásica con el fin de superar ciertas incongruencias que, fundamentalmente por el conocimiento de las constantes antes comentadas, han venido apareciendo en aquellas formulaciones. Citemos a título de ejemplo:

- a. Utilizar las Transformaciones de Galileo para interrelacionar los valores –tanto del espacio como del tiempo– percibidos por dos observadores con movimiento relativo entre ellos no resultaban satisfactorias si tales observadores captaban los valores para el espacio y para el tiempo no instantáneamente, sino con la velocidad constante, que aunque muy grande no es infinita, con que se propagan las ondas electromagnéticas (y, entre ellas, la luz). Como consecuencia, aquellas Transformaciones debieron ser sustituidas por las Transformaciones de Lorentz.
- b. Considerar que se conservaban los valores del tiempo y del espacio en que se desarrollaba un acontecimiento, según la percepción de distintos observadores entre los que hubiera un movimiento relativo (aunque éste fuera una simple traslación rectilínea y uniforme), no era compatible con el hecho de que la velocidad de la luz tuviera un valor finito e igual para esos diversos observadores. En consecuencia, ha resultado imprescindible modular los citados valores para el tiempo y para el espacio e incluso para la masa o para la energía almacenada en un cuerpo, mediante la Teoría de la Relatividad Especial.
- c. Pensar que la transmisión de calor, desde un cuerpo a cierta temperatura al medio que lo envuelve, de acuerdo con las teorías del electromagnetismo clásico, conducía a la conocida catástrofe del ultravioleta o a concluir que la energía total radiada (la suma de las emisiones en todos los rangos de frecuencia) no era compatible con que la cantidad de calor transmitida fuera finita. De aquí surgió la

necesidad de modular la cantidad de calor transmitida por cada onda y a relacionarla con su frecuencia mediante la constante de Planck. Así surgió el **fotón**, como el **cuanto** de la energía, afinándose la idea de que la energía no es continua sino que está formada por “pequeños paquetes”, que se emiten, viajan y son absorbidos como un elemento indivisible de valor **$h \cdot \nu$** , siendo **h** la constante de Planck y **ν** la frecuencia de la radiación.

- d. De la misma manera debió instaurarse que la materia tampoco es continua sino que, como la energía, está constituida por **cuantos** elementales. El “paquete elemental de masa” es la masa del electrón de valor $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg e, igualmente, la electricidad tampoco es continua siendo su **cuanto** correspondiente la carga del electrón de valor $1,602 \cdot 10^{-19}$ culombios.

El orden en que aparecen los distintos capítulos pretende ser el conveniente para ir cambiando la mentalidad del lector, desde su acomodo a la Mecánica Clásica hasta adaptarse a los nuevos enfoques exigidos por la nueva forma de entender la Naturaleza de acuerdo con los postulados de la Física moderna. En la formulación de estos nuevos postulados han colaborado, de modo decisivo, cada una de las constantes descubiertas a lo largo del tiempo y, por ello, se dedica el primer capítulo de esta publicación a comentar brevemente el alcance de dichas constantes. Citemos, a título de ejemplo, algunos de estos cambios de mentalidad:

- a. La mayoría de los mortales, hasta que Galileo experimentó la velocidad con que caen los cuerpos bajo la acción de la gravedad, creería que aquellos cuerpos caerían con mayor velocidad según fuera aumentando su densidad. El valor constante de **G** y la segunda Ley de Newton se encargaron de deshacer aquella falacia.
- b. De la misma manera, hasta bien entrado el siglo XX, nadie podía entender que, si dos personas se separaran hoy (día D) y estuvieran viajando a velocidades muy diferentes hasta otra fecha horizonte (día H del reencuentro entre ellas) no habrían envejecido lo mismo o, del mismo modo, nadie podía sospechar que fuera necesario, para expresar el movimiento de un cuerpo, integrar el espacio recorrido y el tiempo empleado en una nueva magnitud de cuatro dimensiones (el **espacio-tiempo**) para poder encontrar un intervalo invariante para varios observadores entre los que hubiera movimiento relativo. El valor constante para cualquier observador de la velocidad de la luz **c** resultó decisivo para estos cambios de paradigma.

- c. No entraba en la mente de ningún estudioso del movimiento de un cuerpo que la masa de éste fuera diferente para un observador, que se moviera solidariamente con dicho cuerpo, a la que apreciara otro observador, que permaneciera en reposo respecto al mismo. Para este vuelco conceptual (como para los cambios comentados en los dos apartados siguientes) también fue determinante el carácter **absoluto** de la velocidad de la luz desbancando de este privilegio tanto al tiempo como al espacio.
- d. ¿Alguien podría pensar que la luz fuera desviada por la acción de la gravedad?
- e. Era indudable que, por un lado, la masa y, por otro, la energía se conservaban constantes sin cuestionarse siquiera que lo que de verdad se mantuviera constante fuera el conjunto de ambas (una vez convertida la masa en energía al multiplicarla por la velocidad de la luz elevada al cuadrado).
- f. La continuidad en la Naturaleza se consideraba tan consustancial a ella que no tenía explicación cómo un electrón, al salir de su órbita, tuviera que ir a parar a otra órbita definida sin poderse quedar en una posición intermedia entre dichas órbitas. La puesta en escena de la constante de Planck h justifica plenamente este comportamiento al parecer anómalo del electrón y también explica otras muchas maneras no intuitivas en el proceder del mundo microscópico.
- g. A escala microscópica carecía de sentido pensar en un determinismo absoluto en el devenir de los acontecimientos. Habría que limitarse, por el contrario, a utilizar modelos estadísticos cuyo resultado final fuera obtener, simplemente, determinadas ondas de probabilidad.

Este proceso de cambio en la manera de estructurar la Mecánica necesita utilizar ciertos conocimientos matemáticos para que, sin enmascarar el concepto físico con el que estemos trabajando, permitan dar cierto rigor a las manipulaciones imprescindibles hasta conseguir las nuevas formulaciones necesarias con el convencimiento de que, en muchos casos, para llegar a conocer bien una realidad física cualquiera, puede ser un camino interesante deducirla a través de las posibilidades que ofrecen las Matemáticas. El propio Einstein con su proverbial agudeza se preguntaba *¿Cómo es posible que las Matemáticas, un producto del razonamiento e independiente de la experiencia, se ajusten tan bien con el comportamiento de las realidades físicas?*

Los técnicos han de ser conscientes de que la Mecánica Clásica les ofrece herramientas adecuadas para que, en la gran mayoría de los casos,

puedan trabajar con aproximaciones suficientemente válidas para satisfacer las necesidades precisas en su quehacer ordinario; pero, igualmente, han de tener en cuenta que estas aproximaciones solo son válidas siempre que los requerimientos, derivados de las circunstancias en que vayan a ser utilizados sus desarrollos, queden asegurados con las garantías suficientes. Por ello es necesario recordar que, en ciertos casos, puede resultar imprescindible acudir a formulaciones que recojan los últimos conocimientos científicos disponibles y, con ello, evitar los errores inadmisibles que podrían derivarse del empleo de los viejos métodos aproximados.

Sería una insensatez pensar que cualquier aproximación es igualmente válida para lo muy grande y para lo muy pequeño, o para lo muy rápido y para lo muy lento. De la misma forma sería de una irresponsabilidad inadmisibile por parte de los centros educativos:

- a. No facilitar a sus alumnos los criterios necesarios para poder discernir en cada caso concreto.
- b. No darles a conocer los últimos adelantos disponibles para evitar que los técnicos actuales pretendan abordar cualquier problema de hoy utilizando solo las herramientas de ayer.
- c. No inquietarlos para hacerles caer en la cuenta de que lo que hoy preocupa a los teóricos de la Física puede ser mañana el soporte de la Tecnología.
- d. No mentalizarlos de que desarrollar con responsabilidad cualquier profesión no solo exige trabajar duro y conocer su “oficio”, sino que también requiere captar la “sustancia” de dicha profesión, lo que suele conllevar la obligación de poseer una curiosidad insaciable.

Podría tener algún interés que esta publicación sirviera:

- a. A los profesionales ya titulados, para satisfacer algunas curiosidades muy ligadas al mundo en que desarrollan su actividad
- b. A los estudiantes, para ponerles un pequeño “plus” de motivación hacia una formación más especulativa que, aunque no llegue a capacitarlos para abordar y resolver los problemas propios –por ejemplo– de la Mecánica Cuántica, sí les permita intuir el apasionante mundo, tanto teórico como aplicado, latente en el **“enigma cuántico”**.
- c. Al público en general no especializado en disciplinas tecnológicas, para situarlo en un horizonte desde el que pueda divisar, con cierta perspectiva, el panorama cultural de nuestro mundo actual y para imprimir en su existencia lo que hay de valioso en el espíritu universal y desinteresado del viejo humanismo, trasladado a nuestro estado

PRÓLOGO

moderno de desarrollo. No solo es humanista quien lee a Aristóteles en griego o a Séneca en latín, sino también quien saborea el inmenso caudal de inspiración que encierran las aportaciones de un Galileo, o de un Newton, o de un Maxwell, o de un Einstein, o de un Planck, o de un Louis de Broglie, o de un Heisenberg, o de un Feynman, o de un Bohr, o de un Schödinger, o de un...

Puede deducir el lector que no se trata, ni por los contenidos ni por la reducida extensión pretendida, de acercarnos a algo parecido a un intento de cierta historia de la Ciencia que, por el período de tiempo tan amplio considerado y por los apasionantes resultados conseguidos durante ese tiempo, necesitaría miles de páginas. Simplemente se trata de exponer, con trazos gruesos, los grandes desafíos, con los que la Ciencia ha tenido que enfrentarse ante el descubrimiento de los valores constantes de **G**, de **c** y de **h**, de comentar, con trazos no menos gruesos, los nuevos paradigmas, con los que la Ciencia ha reaccionado y de dar noticia de algunas conclusiones deducidas de la ley de atracción universal, de la constancia de la velocidad de la luz y del carácter no continuo tanto de la energía como de la materia.

Deseo haber conseguido mi propósito.

A MODO DE RESUMEN

Lo importante de la Ciencia no es tanto conocer nuevos hechos como descubrir nuevos modos de pensar sobre ellos. (Sir William Bragg, 1890-1971).

Cada uno de los periodos de la transición, desde la Mecánica Clásica a la Mecánica Relativista y de estas a la Mecánica Cuántica, se caracteriza por haber aparecido en escena alguna o algunas de las nuevas y fecundas maneras de abordar los problemas, con los que el comportamiento de la Naturaleza ha venido interpelando a la Ciencia a lo largo de toda la historia de la Humanidad. En esta publicación y siguiendo las orientaciones de Thomas S. Kuhn, en su libro “La estructura de las revoluciones científicas”, acerca de los cambios de paradigma ocurridos para superar cada una de las crisis de interpretación de la Naturaleza mediante la revolución oportuna, vamos a estudiar con algún detalle:

- a. Los cambios de paradigma, surgidos con las aportaciones de Galileo.
- b. Los nuevos paradigmas, como consecuencia de las ideas de Newton.
- c. Las sorprendentes conclusiones, derivadas de la genialidad de Einstein.
- d. Los avances en el conocimiento del extraño proceder del mundo microscópico, a la luz de la intuición de Planck al llegar a la conclusión de la existencia de la constante h , que discretiza la energía radiada por el cuerpo negro en cuantos (fotones) de valor $h \cdot \nu$ (siendo ν la frecuencia de la radiación), y de las fascinantes aportaciones de la

pléyade (Bohr, de Broglie, Heisenberg, Schrödinger,...) de los físicos cuánticos a lo largo de todo el siglo XX.

En el desarrollo de la Mecánica Clásica fueron las ideas nuevas de Galileo las que consiguieron, no solo sentar las bases para el estudio del movimiento uniformemente acelerado sino, sobre todo, modificar la manera de proceder en el mundo científico ante los desafíos de la Naturaleza.

Hasta Galileo, los científicos pretendían desentrañar dichos desafíos apoyándose, fundamentalmente, en las apariencias con que tales desafíos se presentaran a través de los sentidos. Galileo, por el contrario, tuvo la genial idea de intuir que, para conocer la solución definitiva a muchos de los interrogantes planteados, no bastaba dejarse seducir por la percepción sensorial que tuviéramos de los mismos, sino que era necesario abordarlos desde una nueva perspectiva que se apoyara en determinados principios racionales. Esta nueva perspectiva es uno de los más importantes logros en la historia del pensamiento humano y marca el comienzo real de la Física Moderna.

Entre esos principios racionales ha resultado en muchos casos decisivo el conocimiento de ciertas constantes en el comportamiento de la Naturaleza (capítulo 1) que, sucesivamente, han venido incorporándose al bagaje de la Ciencia. Vamos a profundizar un poco más en este **método científico** analizando, a título de ejemplo, los avances conseguidos al ir añadiendo, a lo largo del tiempo, nuevos principios racionales (entre los que aparecen los descubrimientos de la constante de gravitación universal **G** y de la constante de la velocidad de la luz **c**) al estudio de la **dinámica** considerada ésta como la parte de la Mecánica que se ocupa de escudriñar sobre las circunstancias que determinan y condicionan el movimiento de los cuerpos naturales.

En el estudio de este movimiento sustituiremos la materia de dichos cuerpos por una de sus propiedades más características (**su masa**) con la advertencia de que la masa de un cuerpo (representativa, por un lado, de la resistencia que su materia opone a los cambios en su movimiento –**masa inerte**– y, por otro, como agente activo de las fuerzas de atracción newtonianas –**masa gravitatoria**–) es una de las propiedades de dicha materia, exactamente igual a como puedan serlo otras propiedades de la misma tales como su dureza, su elasticidad, su poder calorífico, su conductibilidad, su... Es evidente que, como ocurre en casi todas las ramas del Saber, el objetivo del estudio del movimiento de un cuerpo es poner de acuerdo el concepto, como la Ciencia estructura matemáticamente la idea de dicho movimiento, con la forma sensible, con que el mismo sea percibido por los sentidos.

Como paso previo debe pensarse que, en el movimiento de cualquier cuerpo natural (de cualquier masa), pueden estudiarse tres parámetros, a saber:

Su velocidad
Su cantidad de movimiento
Su fuerza viva

La velocidad es una magnitud intensiva (independiente de la cantidad de masa que tenga el móvil), se aprecia directamente por los sentidos y, **para un observador dado**, puede variar desde **0** hasta las proximidades de la velocidad de la luz **c**. De acuerdo con la velocidad **v**, que se perciba en el movimiento de un cuerpo cualquiera, puede parecerle al observador que dicho cuerpo se encuentre en **reposo** (si da la sensación, para el observador, de que $v = 0$) o en **movimiento** (si se presenta, ante los ojos del mismo observador, con $v \neq 0$). Puede apreciarse cómo la velocidad es una característica del movimiento que tiene un valor relativo; puesto que este valor se refiere a un determinado observador. Si cambiamos de observador y, entre éste y el anterior hay movimiento relativo, la velocidad, para cada uno de ellos, será diferente como deduciremos, para diversos casos y bajo distintas hipótesis, en los capítulos 4 y 6.

La cantidad de movimiento es una magnitud extensiva (proporcional a la cantidad de masa inerte del móvil). Su valor es **m.v**, es una magnitud intrínsecamente unida al móvil (que reside en el propio móvil) y viene a representar la intensidad de su movimiento, que cuantificará –por ejemplo– el tiempo que será capaz de estar moviéndose venciendo una resistencia exterior determinada. También tiene un valor relativo para cada observador; puesto que relativa es la velocidad y, en el capítulo 8, demostraremos que, incluso, también es relativa la masa.

La fuerza viva es otra magnitud extensiva, su valor es $\frac{1}{2}m.v^2$ y representa la energía almacenada en el móvil y, por lo tanto, su capacidad para realizar trabajo. Idénticamente también, como la velocidad y como la cantidad de movimiento, tiene un valor relativo, como es evidente a partir de los comentarios contemplados en los apartados anteriores y cuyo concepto ha evolucionado de forma totalmente imprevisible con la llegada de la Relatividad Especial, como se estudia en los capítulos 6 y 8.

La dinámica antigua consideraba que el reposo y el movimiento de cualquier tipo (incluso el rectilíneo y uniforme) eran dos estados diferentes. Para esta dinámica (basada únicamente en la impresión **sensorial** del movimiento) una cosa era que el cuerpo permaneciera en reposo y otra, muy

distinta, que estuviera en movimiento. Por otra parte, consideraba que el concepto de reposo era claro y evidente por sí mismo y no necesitaba, por lo tanto, ninguna razón ni causa que lo justificara (era el estado natural de los cuerpos). En cambio, cualquier masa que se moviera estaba fuera de su estado natural y, en consecuencia, debería haber alguna causa que la forzara a mantenerse en ese estado antinatural. Para Aristóteles, si una flecha se movía con movimiento aparentemente rectilíneo y uniforme después de abandonar el arco, dicho movimiento se debía necesariamente a una fuerza, aunque fuera invisible, originada –según él– por una serie de remolinos que empujarían la flecha durante todo el tiempo que se estuviera desplazando.

A finales de la Edad Media, los físicos de la Universidad de París dieron otra aparente solución al problema de distinguir el reposo del movimiento rectilíneo y uniforme mediante la llamada “**Teoría del Ímpetu**”. Esta teoría afirmaba que un cuerpo conservaba su movimiento, después de desaparecer la fuerza que lo impulsó porque, durante su impulsión, aquel cuerpo habría absorbido una determinada cantidad de **ímpetu**, que se iría consumiendo según el cuerpo se fuera moviendo a lo largo de su trayectoria.

En consecuencia, tanto en la Edad de Oro de la Filosofía griega como durante toda la Edad Media, las explicaciones, con que se intentaba distinguir el reposo del movimiento rectilíneo y uniforme (que los sentidos percibían como diferentes), resultaban excesivamente forzadas para que fueran creíbles.

La Mecánica Moderna, gracias a Galileo y a Newton, dejó de apoyarse únicamente en la apreciación de los sentidos (según la cual el reposo y el movimiento son dos estados diferentes) y cambió el enfoque para abordar el mismo problema considerando que ambos estados no deben distinguirse; ya que cualquier masa continúa en uno de dichos estados mientras una fuerza exterior no lo modifique. Este cambio de enfoque desbloqueó el problema y dio paso al **Principio de Inercia**, principio que Newton consagró más tarde en la primera Ley de sus famosos **Principia** (capítulo 8).

Galileo se encontró con otra situación desconcertante al intentar precisar matemáticamente como se produce el movimiento con que se desplaza, por ejemplo, una piedra al dejarla libre de la mano que la sostiene. Se partía, hasta Galileo, de la imagen que tenemos de dicho movimiento al constatar, una y mil veces, que la piedra se mueve más deprisa según aumenta el espacio que recorre y, por ello, se percibía una estrecha relación entre el movimiento de la piedra y el espacio por ella recorrido.

Esta relación, que partía de la imagen percibida por los sentidos, se mostraba incapaz de culminar en la precisión matemática del concepto que Galileo anhelaba para precisar la idea del movimiento cambiante de la pie-

dra. Dicha percepción conducía a un camino bloqueado, a una vía muerta; puesto que el cambio de velocidad de la piedra al recorrer ésta los primeros 10 metros no era igual al cambio de su velocidad en los segundos 10 metros. No existía una ley clara entre el cambio de velocidad de la piedra y su desplazamiento y, por lo tanto, era necesario buscar otro nuevo sendero, sendero que encontró Galileo al aplicar el criterio racional (científico y no meramente sensible) de la **mayor simplicidad posible** en el acontecer natural de la caída libre de la piedra.

Leyendo el prólogo de sus **Diálogos de la Nueva Ciencia** se constata como el genio italiano cambió el enfoque del problema razonando de la forma siguiente:

- a. Si la piedra partiendo del reposo va aumentando su velocidad, este incremento debe añadirse de la manera más sencilla posible, considerando que esta manera más simple posible debe ser aquella que siempre consiga dicho incremento de la misma manera y en las mismas proporciones.
- b. Decir que una masa está en reposo lleva implícito hacer alguna referencia al tiempo, puesto que un cuerpo está en reposo ($\mathbf{v} = \mathbf{0}$) si su situación en el espacio no se ve afectada por el transcurrir del tiempo. De idéntica manera, el concepto de movimiento ($\mathbf{v} \neq \mathbf{0}$) deberá estar también estrechamente relacionado con el tiempo, ya que tal movimiento solo existe si el cuerpo cambia de posición espacial a lo largo del tiempo; debe existir, en consecuencia, una afinidad más estrecha entre el cambio de velocidad del movimiento y el tiempo transcurrido, que la afinidad existente entre dicho cambio de velocidad y el espacio recorrido.
- c. De este modo Galileo concluyó que la manera más simple posible de cuantificar la forma como la piedra puede cambiar de velocidad es aquella en la que los incrementos iguales de velocidad tengan lugar en incrementos iguales de tiempo. Es decir, debe ocurrir que:

$$\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1 = \mathbf{k}(t_2 - t_1) \quad [1]$$

siendo \mathbf{k} una constante

Con estos razonamientos, Galileo había llegado a concretar el concepto de **movimiento uniformemente acelerado** simplemente cambiando de punto de partida. No pretendió llegar al concepto intelectual, partiendo de la percepción de los sentidos; sino intentando justificar la percepción de los sentidos, a partir del concepto intelectual; es decir, reemplazando la intuición por el razonamiento.

Parece interesante recordar que este criterio de **simplicidad**, que iluminó a Galileo, coincide con las pautas tenidas en cuenta al establecer, en el capítulo 9, algunos otros **principios de simplicidad** extraordinariamente interesantes en Ingeniería y no le falta relación a esta simplicidad con el principio de **acción mínima** tan en consonancia, además, con la constante **h** de Planck, como se estudia detenidamente en los capítulos finales de esta publicación.

Otra aportación importante de Galileo fue constatar, por medio de muchísimos experimentos dejando caer cuerpos muy diferentes desde la torre de Pisa, que –prescindiendo de la resistencia del aire– el valor de **k** en la ecuación [1] es siempre el mismo, cualquiera que sea la densidad del cuerpo que dejemos caer desde lo más alto de la torre.

Estas conclusiones de Galileo, que supusieron un paso trascendental en el estudio de la dinámica, dejaban sin desvelar el valor de la enigmática constante **k**, problema que no fue resuelto hasta que Newton (prácticamente un siglo más tarde; ya que Newton nació el mismo año en que moría Galileo) desarrolló su Teoría de la Gravitación Universal y puso de manifiesto la existencia de la **constante G**, que permitía cuantificar la fuerza con la que se atraen dos masas cualesquiera. Se puede razonar con Newton utilizando el Cálculo Infinitesimal, que más o menos simultáneamente desarrollaron Newton y Leibnitz, y transformar la ecuación [1] en:

$$dv = kdt$$

y, por lo tanto:

$$k = \frac{dv}{dt} \quad [2]$$

Luego **k** es la aceleración con que cualquier masa **m** se desplaza hacia el centro de la Tierra.

Por otro lado, también Newton había establecido en su segunda Ley (ver de nuevo el capítulo 8) que, para acelerar una determinada masa, es preciso aplicarle una **fuerza** de valor:

$$f = km$$

luego:

$$k = \frac{f}{m}$$

En consecuencia, el valor de \mathbf{k} era también la fuerza con que la Tierra atraía a la unidad de masa en las proximidades de la torre de Pisa, fuerza que, según la citada Teoría de la Gravitación Universal, tenía por valor:

$$\mathbf{k} = \mathbf{G} \frac{1 \cdot \mathbf{M}}{\mathbf{R}^2} \quad [3]$$

siendo:

\mathbf{G} la constante de atracción universal.

\mathbf{M} la masa de la Tierra

\mathbf{R} la distancia desde el centro de la Tierra hasta las proximidades de la torre de Pisa.

El segundo miembro de la ecuación [3] normalmente se representa por \mathbf{g} , y su valor es variable de un punto a otro, como variable es la distancia \mathbf{R} que separa dicho punto del centro de la Tierra y la distancia a su eje de giro, distancia que influye, por otra parte, en la componente de la aceleración centrípeta.

Teniendo en cuenta las dos ideas expuestas respecto a este concepto $\mathbf{g} = \mathbf{k}$, es posible darle al mismo dos acepciones distintas, a saber:

- a. El valor de \mathbf{g} , en cualquier punto, es la fuerza con que la Tierra atrae a la unidad de **masa gravitatoria** situada en dicho punto
- b. Este valor de \mathbf{g} representa también la aceleración con que la **masa inerte** de cualquier cuerpo, en el punto considerado y en movimiento libre, se desplaza hacia el centro de la Tierra. La igualdad entre \mathbf{g} y \mathbf{k} es precisamente la idea que inspiró a Einstein para desarrollar su interpretación relativista de la gravedad (capítulos 9 y 10).

Con todo lo anterior, sin tener en cuenta la percepción sensible del movimiento de la piedra y considerando únicamente conceptos científicos, queda suficientemente cuantificado el movimiento en la caída libre de los cuerpos y la causa que lo motiva.

No obstante, Galileo y también Newton, pensaban erróneamente que el espacio y el tiempo parecían ser las variables independientes entre sí, cuya relación definía cualquier movimiento estando convencidos, como lo ha estado después todo el mundo científico durante doscientos años, que ambas variables tenían los mismos valores para los posibles distintos observadores que pudieran utilizarlas, aunque entre ellos hubiera movimiento relativo.

También surgió una nueva falacia procedente, de igual modo, de las impresiones de los sentidos y que esta vez confundió al mismísimo Galileo cuando formuló sus célebres Transformaciones (ampliamente estudiadas y comentadas en el capítulo 6). Transformaciones que, aun siendo aceptables

cuando la velocidad relativa entre los diversos observadores sea pequeña, son –no obstante– totalmente inadecuadas cuando dicha velocidad alcance valores no despreciables frente a la velocidad de la luz.

Para explicitar el alcance de esta confusión, supongamos a Galileo que, con un reloj en su mano, contemple con suma atención la caída de una piedra desde lo más alto de la torre de Pisa e imaginemos también a un contemporáneo suyo que, con otro reloj idéntico al de Galileo, vaya descendiendo pero suspendido de un cable, desde el mismo momento en que dejamos caer la piedra, a una velocidad constante \mathbf{u} observador que mire, también con suma atención, el descenso de la misma piedra.

Llamando \mathbf{X} a la coordenada que determina la posición, para Galileo, de la piedra en cualquier instante, \mathbf{T} al tiempo transcurrido por su propio reloj desde que se dejó caer la piedra hasta ese momento y representando, respectivamente, por \mathbf{x} y por \mathbf{t} las mismas magnitudes vistas por su contemporáneo bajando a la velocidad constante \mathbf{u} colgado de su cable, se cumplirá que estos valores están relacionados por las expresiones siguientes:

Para el instante \mathbf{T}_2 :

$$\mathbf{x}_2 = \mathbf{X}_2 - \mathbf{u} \cdot \mathbf{T}_2 \quad [4]$$

De la misma manera en el momento \mathbf{T}_1 :

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{X}_1 - \mathbf{u} \cdot \mathbf{T}_1 \quad [5]$$

Para cualquiera de esos tiempos, según las Transformaciones de Galileo:

$$\mathbf{t}_i = \mathbf{T}_i \quad [6]$$

Por lo tanto:

$$\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1 = \mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1 - \mathbf{u}(\mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1) \quad [7]$$

o su equivalente:

$$\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1 = \mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1 - \mathbf{u}(\mathbf{t}_2 - \mathbf{t}_1) \quad [8]$$

Es de observar cómo ni la ecuación [7] ni la ecuación [8] encajan bien con la creencia, en aquel momento no discutible ni discutida, de que los espacios y los tiempos, medidos por cualquier observador y bajo cualquier movimiento, debían ser iguales lo que equivaldría a decir que:

$$\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1 = \mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1$$

y que:

$$\mathbf{t}_2 - \mathbf{t}_1 = \mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1$$

En consecuencia, algo fallaba en las previsiones de Galileo.

Hubo que esperar hasta que Lorentz encontró, con sus famosas Transformaciones, los cambios a introducir en las Transformaciones de Galileo para determinar, ante un suceso dado, el valor correcto de los incrementos ocurridos en el espacio y de las variaciones registradas en el tiempo, cuando ambas variables fueran medidas por dos observadores entre los que existiera movimiento relativo. Recordemos que, para justificar los cambios necesarios, Lorentz tuvo que acudir a ciertas influencias muy rebuscadas en el comportamiento del éter tan en boga en aquella época.

Fue necesario que Einstein abordara el mismo problema con mayor rigor científico, partiendo de la existencia de otra **constante** en el comportamiento de la Naturaleza (la velocidad de la luz \mathbf{c}), en lugar de considerar los aparentemente constantes valores del espacio y del tiempo para cualquier observador. De nuevo, con un nuevo enfoque, aquellas diferencias quedaron plenamente justificadas y, con dicho enfoque como punto de partida, surgió en 1905 nada más y nada menos que la Teoría de la Relatividad Especial, teoría que realmente calcula con precisión los valores del espacio recorrido y del tiempo empleado en dicho recorrido, cuando ellos sean percibidos por dos observadores entre los que exista una velocidad relativa rectilínea y uniforme de valor \mathbf{u} . Tales valores quedaron definitivamente relacionados (capítulos 4 y 5) por las expresiones:

$$\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1 = (\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1) \sqrt{1 - \frac{\mathbf{u}^2}{\mathbf{c}^2}} \quad [9]$$

$$\mathbf{t}_2 - \mathbf{t}_1 = \frac{\mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1}{\sqrt{1 - \frac{\mathbf{u}^2}{\mathbf{c}^2}}} \quad [10]$$

También es digno de observar como, aunque no se conserva el mismo valor ni para el espacio ni para el tiempo en el sentir de los dos observadores, sí se conserva para ambos el valor del escurridizo concepto del **espa-**

cio-tiempo, como preconizó Minkowski y se justifica suficientemente en el capítulo 7. El valor del **espacio-tiempo** entre dos sucesos es un invariante, para todos los observadores entre los que exista movimiento relativo de traslación rectilínea y uniforme, como lo son la distancia entre dos puntos o el tiempo entre dos sucesos, para todos los observadores entre los que no exista movimiento relativo alguno.

A partir de los nuevos modos de pensar propuestos por el genial Einstein y apoyados, exclusivamente, en desechar la aparente velocidad infinita de la luz y utilizar su valor c (no solo finito sino, además, constante para cualquier observador como habían constatado Michelson y Morley —capítulo 3—) la Física fue consciente de que:

- a. Es preciso olvidarse de la visión tradicional del tiempo y del espacio como estructuras rígidas del Universo y tener en cuenta, por el contrario, que los valores de ambas magnitudes dependen del movimiento relativo entre los posibles observadores que pretendan medirlas. Tanto el valor de las diferencias entre dos tiempos, medidas por los diferentes observadores, como el de las distancias, constatadas por cada uno de ellos, no son independientes del movimiento relativo entre los distintos observadores, aunque éste movimiento sea rectilíneo y uniforme.
- b. Las leyes físicas, no obstante, son válidas para los distintos observadores, siempre que ellos se encuentren entre sí en reposo o con movimiento relativo rectilíneo y a velocidad constante. Si, para uno de los observadores, dos distancias o dos tiempos o dos velocidades o dos aceleraciones o dos masas o dos magnitudes cualesquiera son iguales, también son iguales para el otro observador, igualdades que no entrañan que sean iguales los valores, con que cada uno de dichos observadores, perciba cada una de aquellas magnitudes. En consecuencia, los sistemas que se muevan con movimiento rectilíneo y uniforme pueden considerarse tan **inerciales** como los sistemas en reposo y, por ello, si un observador está completamente aislado del exterior es incapaz de distinguir, aplicando cualquier ley física, si está en reposo o si se mueve con movimiento rectilíneo y a velocidad constante. El pasajero de un avión, que se durmiera antes de despegar, se despertara cuando el avión hubiera adquirido su velocidad de régimen y si estuviera aislado del exterior, dudaría si todavía permanecía en el aeropuerto de partida o si se encontraba volando y a punto de iniciar el descenso hacia el aeropuerto de destino.
- c. También pudo ponerse de manifiesto que dos observadores, que se mantengan en puntos distintos de un sistema moviéndose todo él con

cierta aceleración no ortogonal a la dirección determinada por los dos puntos en que se encuentren los dos observadores, perciben con valores diferentes tanto el tiempo como el espacio correspondientes a un acontecimiento cualquiera; ya que la aceleración del sistema hace que, durante el pequeño tiempo que tarda la luz en llegar de un observador al otro, no coincida la velocidad relativa, respecto al acontecimiento, del segundo observador con la velocidad relativa, con que el primero de dichos observadores, lo haya visto en un momento anterior. Si en una nave espacial hay un observador en la parte delantera y otro en la parte trasera, cada uno con su reloj correspondiente, constatarán que sus relojes no marchan al unísono mientras la nave se acelere o se retenga, porque hay un cambio en la velocidad de la nave desde que se registró un tiempo determinado en uno de los relojes hasta que se registra en el otro (capítulo 9).

- d. También a partir de Einstein se tiene conciencia (capítulo 8) que la masa y la energía no son magnitudes independientes. Están relacionadas como si la masa fuese una energía altísimamente condensada con un factor de condensación de gran valor (este valor es la velocidad de la luz elevada al cuadrado $c^2 = 9.10^{16} \text{ m}^2/\text{seg}^2$). La masa puede transformarse en energía y ésta en aquella con el resultado, por ejemplo, de que una pequeña disminución de la cantidad de masa total en el proceso de una reacción nuclear dé origen a una enorme cantidad de energía liberada. **Un gramo** de masa equivale a **9.10^{13} julios** de energía.
- e. Otra consecuencia del apartado anterior es que, para un observador dado y según la Teoría de la Relatividad Especial, la masa de un cuerpo es función de la velocidad relativa del cuerpo respecto a él de tal manera que, si dicha velocidad relativa tendiera a la velocidad de la luz, tal observador tendría la sensación de que la masa del citado cuerpo tendería a valer infinito. Para dicho observador, toda la energía comunicada al cuerpo para cambiar su velocidad se ha convertido en masa.
- f. Se deduce también, como recopilación de las premisas anteriores, la más importante de las ecuaciones formuladas a lo largo de todo el siglo XX (la famosa ecuación de Einstein):

$$E = m.c^2$$

Interesa recordar también que, a partir del **Principio de Equivalencia** de Einstein (*no es posible distinguir si un cuerpo se mueve con aceleración*

constante o si está en reposo pero a la vez sometido a los efectos de la gravedad o de otra fuerza exterior), el mismo Einstein profundizó en su interpretación relativista de la gravedad (capítulos 9 y 10) y en ciertos detalles y comportamientos del espacio-tiempo (capítulo 7) al constatar que:

- a. Un individuo en el interior de un ascensor que descendiera con una aceleración exactamente igual a g , si está el individuo completamente aislado del exterior, será incapaz de distinguir si el ascensor se mueve con dicha aceleración o si está en reposo y ha desaparecido, por arte de magia, la acción de la gravedad (lo único que detecta es que ha desaparecido totalmente la fuerza igual a su peso con que sus pies se apoyaban sobre el suelo del ascensor). Igualmente, si subiera el ascensor con una aceleración de valor g , no será capaz de distinguir si el ascensor sube con dicha aceleración o si está en reposo y el campo gravitatorio ha multiplicado por 2 su valor (simplemente nota que sus pies se apoyan, ahora, sobre el suelo del ascensor, con una fuerza de valor 2 veces su propio peso). En tercer lugar, y por seguir insistiendo en el mismo ejemplo, si consiguiéramos mediante alguna acción exterior que nuestro ascensor bajara con una aceleración de valor $2g$, nuestro ascensorista se sentirá incapacitado para saber si el ascensor baja con dicha aceleración o si está en reposo y el campo gravitatorio, conservando su valor, ha cambiado de sentido (es ahora su cabeza la que se apoya sobre el techo del ascensor con una fuerza igual a su peso).
- b. Supongamos, por un momento, que nuestro amigo del ascensor se instalara en el interior de un tubo cilíndrico de acero con los pies apoyados sobre su fondo y su espalda en contacto con la pared lateral del cilindro, y supongamos, también, que el cilindro comenzara a girar alrededor de su eje. Nuestro amigo empezaría a notar una presión sobre su espalda y, si estuviera aislado del exterior, llegaría a dudar si estaba girando solidariamente con el tubo o si estaba en reposo y, desde la pared interior del mismo, se aplicaba sobre su espalda una fuerza de valor:

$$m\omega^2 r$$

siendo:

- m la masa de nuestro compañero en el experimento.
- ω la velocidad angular con que gira al unísono con el tubo.
- r el radio interior del mismo.

- c. Por otra parte sabemos, por geometría elemental, que la relación entre el perímetro interior del tubo y su radio vale:

$$\frac{P}{r} = 2\pi$$

pero, si una vez girando el tubo, pudiésemos saber exactamente, desde el exterior del tubo, por un lado el valor percibido para el perímetro interior del mismo y, por otro el valor para su radio, ambos valores serían tales que su relación dejaría de ser igual a 2π . La razón hay que buscarla en que el radio del tubo, cuando gira, tiene un movimiento relativo, respecto a cuando estaba parado, ortogonal a dicho radio; mientras que, en el perímetro, la dirección del movimiento relativo, cuando gira, respecto a cuando estaba parado, es tangente al cilindro y, por lo tanto, coinciden en dirección el movimiento relativo y el espacio a medir. La Teoría de la Relatividad Especial (capítulos 4 y 5) nos descubre que, cuando existe movimiento relativo entre dos espacios, se produce, al comparar los valores percibidos por un observador para dichos espacios, una **contracción** del uno respecto al otro en la dirección del movimiento relativo y dicha **contracción** es nula en la dirección ortogonal a dicho movimiento relativo. Todo ello conlleva ciertos cambios en la mismísima geometría de Euclides (capítulo 7).

- e. Por la equivalencia entre que un sistema tenga un movimiento con aceleración constante o que el mismo esté sometido a un campo gravitatorio constante y uniforme, dos relojes exactamente iguales, situados uno en lo más alto de una torre y otro al pie de la misma, no marcarán exactamente el mismo intervalo de tiempo entre dos hechos concretos; ya que, en la dirección determinada por los dos puntos en que situamos ambos relojes, está actuando el campo gravitatorio terrestre y, para un observador aislado del exterior, el campo gravitatorio equivale a un movimiento acelerado (capítulo 9).

A pesar de los avances que permitieron a Einstein aclarar ciertamente muchos de los comportamientos de la Naturaleza, mediante su interpretación relativista de la gravedad (capítulo 9), y entrelazar correctamente el espacio y el tiempo, mediante su unión en la unidad superior del **espacio-tiempo** (capítulo 7), quedaban pendientes aún otros problemas inquietantes, por ejemplo ¿Que ocurriría si el valor de g dependiera no solo de la posición del cuerpo en el espacio sino también del tiempo? ó ¿Cuál sería la “**maquinaria**” que motiva la atracción mutua entre las masas gravitatorias

de los diferentes cuerpos?. Estas y otras preguntas por el estilo inquietaron tanto a Einstein que lo ocuparon, durante 10 años de su vida, intentando encontrar la nueva forma de darles una respuesta convincente desde la nueva óptica de su Teoría de la Relatividad General. En el capítulo 10 se presenta una pequeña introducción a esta Teoría que recoja las ideas fundamentales, con las que Einstein estableció sus **ecuaciones gravitatorias**, y que soporta, con un nuevo enfoque, el apasionante problema cosmológico que aspira a determinar la estructura global de todo el **espacio-tiempo** en el amplísimo Universo físico, en el que estamos y vivimos.

Años más tarde aparecieron otros problemas insospechados al aplicar, al universo atómico y subatómico, los criterios establecidos por la Mecánica Clásica con los matices relativistas. Surgió una auténtica crisis puesto que, aunque dichos criterios estaban plenamente contrastados en el mundo macroscópico, no eran coherentes con el comportamiento observado en el mundo microscópico. Establecer los nuevos paradigmas, que superaran esta crisis, tuvieron que esperar hasta que:

- a. Planck tuviera la idea genial de plantear la discontinuidad de la energía radiada por el cuerpo negro estableciendo que ésta estaba constituida por pequeños paquetes indivisibles (**cuantos**), cuya energía tenía por valor $h \cdot \nu$ (siendo **h** la **constante** de Planck y ν la frecuencia de la radiación) –capítulo 11–.
- b. Se confirmara el comportamiento dual como **onda** y como **partícula** no solo para la luz sino también para la materia (capítulos 12 y 13).
- c. Quedaran establecidos el **fotón** como el **elemento cuántico** de cualquier radiación electromagnética, la **masa del electrón** como el **cuanto** de la materia y la **carga del electrón** como el **cuanto** de la electricidad.
- d. Se estableciera la interpretación en términos de **probabilidad** de la posición de los cuantos mediante ciertas **funciones de onda** (capítulo 13).
- e. Se limitara la capacidad de medir simultáneamente los valores de un par de magnitudes armónicamente conjugadas como pueden ser la posición y el momento de una partícula o la energía intercambiada entre dos sistemas cuánticos y el tiempo empleado para ello (capítulo 13).
- f. Se encontrara razón válida para la aparición de las líneas espectrales procedentes de cada átomo (capítulo 15).
- g. Se tuvieran pautas acerca de la estructura del núcleo de los átomos y de su posible manipulación (capítulo 15).

Con estos y otros criterios, a muchos enigmas del mundo microscópico se les encontraron respuestas convincentes. Es evidente que todavía muchas otras cuestiones relacionadas con el Universo, en su verdadera amplitud y en su intrincada complejidad, no han sido resueltas y que otras ni siquiera se han podido plantear con precisión. Ahí está el reto maravilloso para los enamorados de la Ciencia que pretenden acercarse, aunque sea asintóticamente, a conocer la Verdad.

Haciendo un resumen de este resumen podríamos decir que:

1. La Mecánica Clásica, con las aportaciones de Galileo y de Newton, había establecido cierto **determinismo** para la Mecánica en su totalidad ya que, conociendo simultáneamente la posición y la velocidad de un cuerpo material (cuya masa se consideraba constante) en un instante t_1 y las fuerzas que sucesivamente se le fueran aplicando, estaba completamente **determinada** la posición y la velocidad del mismo para cualquier observador (cualquiera que fuera su movimiento) en otro instante t_2 . El espacio y el tiempo se consideraban con valores invariables para los posibles observadores, que pudieran interesarse por ellos.
2. Este determinismo, considerando las matizaciones de Einstein, solo resultaba válido si en la formulación empleada se tenía en cuenta el movimiento relativo entre los posibles observadores; ya que Einstein desbancó de su posición de privilegio al espacio y al tiempo, como valores absolutos para el estudio del movimiento, y colocó, como actriz principal para dicho estudio, la constancia de la velocidad de la luz.
3. Con la aparición de la Mecánica Cuántica desapareció totalmente la idea de cualquier determinismo en el devenir del mundo microscópico; ya que:
 - a. La Naturaleza dejó de poderse considerar continua y ello afectaba poderosamente a su manera de comportarse.
 - b. De Broglie descubrió que la materia, como la luz, tenía un comportamiento dual (simultáneamente presentaba características tanto de onda como de partícula).
 - c. Schrödinger profundizó en el estudio de la variación con el tiempo de las funciones de onda asociadas a las partículas.
 - d. Heisenberg, con su famoso **Principio de Indeterminación**, puso un límite infranqueable para el hombre en su capacidad de conocer simultáneamente la posición y la velocidad de un punto material. Parece, como si otra ley del comportamiento de la Natu-

raleza, capacitara a ésta para defender su propia intimidad frente a la curiosidad insaciable de la Ciencia.

- e. Niels Borh y Ernest Rutherford descubrieron no solo la estructura no compacta del átomo como conjunto, sino también la de su núcleo.
 - f. Las distintas partículas no solo se mueven a mayor o menor velocidad sino que pueden interactuar entre ellas de muy distintas maneras.
- Etc. etc.

Espero que, después de la lectura de esta publicación, el lector sea capaz de:

1. Discutir con Euclides que, si l es la longitud de la periferia de un disco circular perfecto y de diámetro d , no se cumple para cualquier observador que:

$$\frac{l}{d} = \pi$$

o que una esfera viajando a muchísima velocidad, respecto a un observador, éste la vería tendiendo a convertirse en un disco plano perpendicular a la recta que uniese el observador con el centro de la esfera.

2. Retar a Galileo para demostrarle que la superposición de dos velocidades (v_1 y v_2) en la misma dirección y sentido no es $V = v_1 + v_2$ sino que realmente vale:

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

siendo c la velocidad de la luz.

3. Convencer a Lavoisier de que, si en reposo respecto a un observador la masa de un litro de agua a 4 grados centígrados vale 1 kg, esta masa a la velocidad v , respecto al mismo observador, éste la percibirá de valor:

$$m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ kg}$$

4. Demostrar a Newton que una longitud de, por ejemplo, 20 metros y un tiempo de, en su caso, 20 segundos son constantes para todos

los físicos que estén en reposo respecto al espacio donde midamos la longitud y en el que controlemos el tiempo; pero que la misma longitud se acorta y el mismo tiempo se dilata para un nuevo investigador que tenga movimiento relativo respecto a los primeros físicos.

También podría demostrarle a Newton que la masa de un cuerpo, con que es percibida por un observador, no tiene un valor independiente de la velocidad relativa entre la masa y el observador.

5. Hacer ver a Fresnel que la luz tiene un comportamiento corpuscular en algunas experiencias y ondulatorio en otras.
6. Agradecer a Fourier que, a través de la superposición de ondas monocromáticas, se pueda encontrar la probabilidad de situar una partícula en un margen de posiciones y con un margen de velocidades.
7. Convencer, a todos cuantos lo duden, de que en la Naturaleza la energía y otras muchas magnitudes andan a “saltitos”
8. Desilusionar a los que piensan que, cualesquiera que sean las magnitudes a medir, vayan a poder conocerlas, simultáneamente, con precisión absoluta; porque, si aquilatan al determinar el valor de una variable, simultáneamente, perderán precisión en el valor de la magnitud armónicamente conjugada con ella.
9. Seguir, de la misma manera, haciendo mención a otros aparentes contrasentidos.
10. Disfrutar con Antonio Machado en la confusión que, soñando o despiertos, todos podemos sentir al dudar entre lo que es real y lo que no lo es. Recordemos:

Era un niño que soñaba
un caballo de cartón.
Abrió los ojos el niño
y el caballito no vio.

Con un caballito blanco
el niño volvió a soñar;
y por la crin lo cogía ...
¡Ahora no te escaparás!

Apenas lo hubo cogido,
el niño se despertó.
Tenía el puño cerrado.
¡El caballito voló!

Quedose el niño muy serio
pensando que no es verdad
un caballito soñado.
Y ya no volvió a soñar.

Pero el niño se hizo mozo
y el mozo tuvo un amor,
y a su amada le decía;
¿Tú eres de verdad o no?

Cuando el mozo se hizo viejo
pensaba: Todo es soñar:
el caballito soñado
y el caballo de verdad

Y cuando vino la muerte
el viejo a su corazón
preguntaba: ¿Tú eres sueño?
¡Quién sabe si despertó!

Simplemente para presentar al lector las pretensiones de esta publicación añadamos que:

- a. En el capítulo 1, se comenta brevemente la incidencia, en los paradigmas propios de la Mecánica Clásica, del descubrimiento de tres constantes universales (G, c, h).
- b. En el capítulo 2, se presentan los Principios de Poincaré y de Equivalencia de Einstein (que, junto a la velocidad constante de la luz –capítulo 3– condujeron al desarrollo de la Mecánica Relativista Especial).
- c. En los capítulos 4, 5, 6, 7 y 8 se pretende familiarizar al no especialista en las paradójicas conclusiones derivadas de la Teoría de la Relatividad Especial.
- d. En el capítulo 9 se analizan algunos casos de relatividad derivada de una aceleración o de la gravedad considerada ésta uniforme en el espacio y constante en el tiempo.
- e. En el capítulo 10, como consecuencia de las relaciones campo gravitatorio-aceleración y masa-energía y, teniendo en cuenta que dos observadores, con movimiento acelerado entre ellos, se interrelacio-

nan mediante la geometría de los espacios de Riemann, se aspira a introducir al lector en la posibilidad de considerar la acción de la gravedad, debida a la presencia de masas, equivalente a la transformación del espacio de Euclides en un espacio de Riemann.

- f. En los capítulos 11, 12, 13, 14, 15 y 16 se intenta exponer, de la manera más intuitiva posible, la naturaleza dual tanto de la luz como de la materia y se desea divulgar el escurridizo, y a veces desconcertante, modo de comportarse no solo del átomo en su periferia y en su núcleo sino también de las partículas subatómicas.
- g. Por último en el capítulo 17 me permito una licencia personal poniendo de relieve la lucha permanente del hombre entre sus ansias por conocer la verdad y los frenos para alcanzarla derivados de sus propias limitaciones.