

Introducción

Varias razones han motivado la existencia de este libro. Comencemos por mencionar que la física deja el siglo XX y transita hacia otros horizontes donde los desafíos abiertos no son pocos y cuya naturaleza fundamental hace pensar en nuevas revoluciones científicas en ciernes. Luego, la *raison d'être* es la exploración colectiva de un gran número de ideas visionarias que habrán de inquietar las mentes de los jóvenes lectores a quienes este libro va especialmente destinado. Para este propósito, nos servimos de otra de las grandes contribuciones de la física de nuestros días: la WWW. El presente libro ha sido específicamente pensado para ser distribuido ampliamente y leído de manera abierta y gratuita por la internet. En un mundo donde la cultura, la información y la educación son cada vez más presas de la mercantilización y por ende, su acceso es cada vez más difícil y restrictivo, nos proponemos innovar.

Ciencia y tecnología se nutren mutuamente guiadas por el entorno histórico en el que se desenvuelven. Juntas empujan las fronteras de nuestro conocimiento sobre el universo y la naturaleza. A través de los capítulos del presente libro, se hace patente este proceso de retroalimentación entre ciencia básica y aplicada. En su imparable búsqueda para comprender, desde el origen, estructura y evolución del universo hasta los mecanismos que gobiernan la complejidad social, la física se vale de innumerables recursos intelectuales al mismo tiempo que los impulsa. Una guía infalible y prueba de los modelos teóricos más revolucionarios son los experimentos, que hoy en día han alcanzado grados de sofisticación en otros tiempos inimaginables. Tampoco debemos olvidar otra herramienta *experimental* imprescindible en la ciencia moderna: las simulaciones por computadora. Gracias a ellas, actualmente es posible, por ejemplo, reconstruir imágenes tridimensionales a partir de un conjunto de *rebanadas*, o anticipar lo que se puede esperar en un experimento antes de realizarlo, pero lo más sorprendente, es que nos permiten también recrear escenarios a los que de otro modo no podríamos acceder, porque aún no existíamos, como en los orígenes del universo.

El libro se divide en cuatro partes, cada una de ellas agrupando varios capítulos relacionados con un objetivo común: dar cuenta de la situación actual en diferentes áreas de la física contemporánea, así como una perspectiva de los correspondientes retos y problemas abiertos. Este libro pretende orientar, y ante todo, motivar al lector, para que identifique, quizás, aquellas áreas que más llaman su atención y que posiblemente formarán parte de

su futuro en la ciencia.

En la primera parte, dedicada al "Origen, evolución y estructura de la materia", se revisan conceptos que van desde los más elementales constituyentes de la materia hasta el estudio del universo a escalas astronómicas, incluyendo su evolución y algunos de sus componentes más enigmáticos. Específicamente, en el capítulo "Un universo en evolución", Vladimir Ávila hace un recorrido muy completo de la historia del universo y de como se fue construyendo nuestro conocimiento de ella, incluyendo los últimos avances y los nuevos retos del modelo cosmológico más aceptado. Nos describe como es que, gracias a observaciones astronómicas con mayor alcance y precisión, la cosmología se ha convertido en una rama de la ciencia con bases muy sólidas.

Pero la evolución del universo no podría comprenderse sin entender a la par lo que lo constituye, tema que nos lleva a los capítulos "La materia y sus nuevas estructuras" de Genaro Toledo y "Física de altas energías" de Myriam Mondragón. Ambos tratan de manera complementaria la constitución de la materia hasta su nivel más elemental, y de cómo se conecta esto con el origen del universo. Genaro Toledo describe el camino que siguió la física desde la teoría atómica hasta el descubrimiento de los quarks y los leptones que, junto con los mediadores de sus interacciones, son los constituyentes más elementales de la materia. Poco a poco se ha ido comprobando la existencia de tales componentes subatómicos, gracias a los experimentos en los grandes colisionadores realizados a muy altas energías. Myriam Mondragón, por su parte, nos describe con detalle el Modelo Estándar, que nos da las claves para entender tanto la constitución de la materia y la anti-materia, como las interacciones fundamentales en la física, que permiten que los quarks formen hadrones, que los protones y neutrones formen los núcleos atómicos y que los núcleos y electrones formen átomos. Adicionalmente, en ambos capítulos se pone de manifiesto toda una serie de predicciones cuya investigación e intentos por corroborar, de un modo u otro, continuarán revolucionando la física del nuevo siglo, como por ejemplo, el elusivo bosón de Higgs, o los misterios de la materia y la energía oscura.

Por otro lado, la evolución del universo, en una etapa posterior, dio lugar a los enigmáticos "Agujeros negros", cuyos misterios explica Miguel Alcubierre en el capítulo bajo el mismo nombre. La relatividad especial y la general se presentan en forma clara como los fundamentos que permiten entender su formación, su existencia y los tipos posibles de agujeros negros, desmoronando de paso algunos mitos asociados a estos objetos astronómicos. Su detección indirecta es también un interesante aspecto que se discute en este capítulo, junto con su vínculo con las esquivas ondas gravitacionales, que permanecen como un tema abierto.

El último capítulo de esta sección lo presenta Saul Ramos bajo el título "El universo de las supercuerdas". Desde siempre, los físicos nos hemos acostumbrado a pensar que las teorías físicas son consistentes unas con otras en el sentido de que ninguna formulación teórica exitosa debe contradecir a otra igualmente exitosa. Llevado a su extremo, este pensamiento diría que todas las fuerza y las partículas del universo deberían entenderse a partir de una única teoría, la "teoría del todo". La teoría de cuerdas es un marco teórico en

esta dirección, donde se intenta reconciliar a la relatividad general con la mecánica cuántica. Cuando a la teoría de cuerdas se adicionan otras partículas y la supersimetría, se tiene la llamada teoría generalizada de las supercuerdas. Esta rama de la física es un terreno activo de investigación y como toda teoría nueva, tiene un buen número de seguidores y de críticos, quedando entonces como uno de los mayores desafíos para la física de ahora y el futuro inmediato.

La segunda sección del libro está dedicada a el “Mundo de lo pequeño”; pero a un nivel más cercano a nuestra experiencia diaria, al menos al nivel de laboratorio. Es decir, no se trata ya de los constituyentes más elementales de la materia, sino de sistemas meso, micro y nanoscópicos, constituidos por un conjunto de átomos, y de la física que ocurre a estas escalas. Es bien sabido que a escalas pequeñas surgen algunas interacciones de carácter puramente cuántico, que no tienen analogía en el terreno clásico, es por lo tanto una frontera de fenómenos muy especiales y sorprendentes. Tal es el caso de las “Fuerzas de Casimir”, indetectables a escalas macroscópicas, que tienen su particular origen en la llamada energía de punto cero del vacío cuántico, como explica con bastante detalle Carlos Villarreal en su capítulo sobre este tema. Las fuerzas de Casimir dependen de la forma y tamaño de los objetos, y para que se manifiesten, no es necesario que exista un vacío en el sentido real. Aquí, como explica Villarreal, el vacío cuántico se entiende más bien como la ausencia de un campo de magnitud finita entre los objetos que se atraen. Más aún, este concepto se ha extendido para considerar fluctuaciones de otro tipo de campos confinados, como campos acústicos. Existen varios problemas abiertos en este tema, entre ellos, la existencia de fuerzas de Casimir repulsivas, que es aún motivo de debate, la influencia de estas interacciones en el diseño y funcionamiento de micro y nanodispositivos, etcétera.

En el capítulo “La luz sobre el micromundo: un laboratorio en un chip”, Karen Volke revisa el papel de la óptica en la exploración y manipulación de objetos a escalas meso y microscópica, encaminado al desarrollo de los sistemas integrados conocidos como *lab-on-a-chip*. Aquí se describen desde algunas técnicas elementales de microfabricación, una gran variedad de trampas ópticas con distintas funcionalidades y diferentes métodos de microscopía óptica de superresolución, hasta el reto de integrar todos estos elementos en dispositivos capaces de llevar a cabo diferentes tipos de análisis, pero con el tamaño de un chip miniatura. Para ello es necesario combinar la experiencia de científicos de distintas disciplinas, lo que abre nuevos retos a la investigación multidisciplinaria. Si se continua reduciendo la escala espacial, los principios de la física clásica ceden terreno a las descripciones cuánticas; así como los efectos de superficie comienzan a predominar sobre los de volumen. Las propiedades de la materia cuando está formada por un número pequeño y cuantificable de átomos pueden cambiar radicalmente dependiendo de este número y de la forma en que se dispongan. De todo esto nos da cuenta Cecilia Noguez en su capítulo “Física a escala nanométrica”. Aquí se hace la distinción entre la nanociencia y la nanotecnología y se abordan los avances y retos de cada una, así como de sus aplicaciones. Entre éstas se incluye la plasmónica, que involucra el diseño de nanopartículas para la generación de plasmones de superficie localizados, que es una de las aplicaciones con mayor

potencial en la actualidad, junto con la emergente nanotecnología quiral. También en este caso, la investigación multidisciplinaria encuentra un campo fértil de desarrollo y una gran cantidad de problemas abiertos, esperando por las futuras generaciones.

¿Y qué sucede si tenemos una colección cuantificable de átomos, pero no en la fase sólida, sino líquida o gaseosa, o más aún, en nuevos estados de la materia? Rosario Paredes da respuesta a esta pregunta en el capítulo "Materia ultrafría". Estos fluidos son completamente cuánticos, las propiedades ondulatorias de la materia se hacen patentes, pero su comportamiento colectivo está asimismo fuertemente determinado por sus propiedades estadísticas, si se trata de bosones o de fermiones. Aquí se revisan los principios teóricos y los experimentos que conducen a la formación de un condensado de Bose-Einstein, al igual que los que conducen a un gas degenerado de Fermi. Ambos ocurren a temperaturas y densidades extremadamente bajas. El papel de las interacciones entre átomos son también tema de este capítulo, así como las excitantes posibilidades de realizar nuevos experimentos con estos sistemas, que permitan entender aspectos nuevos o aún oscuros de la mecánica cuántica. De hecho, una de las aplicaciones más relevantes que se vislumbra para estos sistemas de átomos fríos es en la joven área de "Información cuántica", que es descrita por Carlos Pineda. La intuición de nuestra experiencia cotidiana resulta totalmente ineficaz ante las consecuencias de la mecánica cuántica, y cuando esto se aplica en el contexto de la teoría de la información, surgen posibilidades sumamente interesantes para el desarrollo del cómputo y las comunicaciones, donde lo que queda por hacer supera ampliamente lo que hasta ahora se ha conseguido, que no es ni poco ni insignificante. La computadora cuántica es, pues, uno de los grandes retos de la física del nuevo siglo.

La tercera parte del libro está dedicada a "La materia compleja", es decir, sistemas compuestos por un conjunto de partes interconectadas, cuyas propiedades no pueden ser inferidas de las propiedades de sus partes individuales. En este contexto, es muy revelador contrastar los libros sobre física que, al mismo tiempo que revisan de manera global los avances de esta ciencia, intentan adelantarse a su tiempo al listar una serie de preguntas abiertas y sus posibles respuestas. De manera repetida se habló, visionariamente, en los inicios y mediados del siglo XX, sobre el papel que la física podría tener en el estudio de la materia viva. Si bien no fue el primero en hacerlo, Erwin Schrödinger, pilar de la física del siglo XX, condensó en su clásico *¿Qué es la vida?* una opinión muy completa sobre una visión física de la vida. Al preguntarse ¿viola la vida las leyes de la física? ¿Faltan aún leyes en la física, precisamente las necesarias para describir la vida? ¿Qué es lo característicamente vivo? Schrödinger hizo uno de los primeros intentos de acercar el concepto de orden termodinámico al de complejidad biológica. Fue en los años sesenta del siglo XX, cuando se desarrolló el concepto de estructuras disipativas en el contexto de la termodinámica fuera del equilibrio creándose, con ello, los fundamentos para la investigación de los procesos autoorganizados en sistemas complejos, la *física de la emergencia*, como lo llama Octavio Miramontes en su capítulo "Evolución y materia compleja". Es justamente en este capítulo que se hace un recorrido breve del origen evolutivo de la materia compleja viva y de los mecanismo físicos de la complejidad y la emergencia.

La emergencia y la autoorganización no serían posibles a no ser por la interacción de las partes constituyentes de los sistemas complejos, como lo explica Lucas Lacasa en su capítulo "Redes, interacciones, emergencia". Por ello, la dinámica de interacciones se ha convertido, en los primeros años del siglo XXI, en un tópico de extrema importancia para el estudio de la física de la complejidad y para ello se ha desarrollado un gran cuerpo teórico que estudia la dinámica y arquitectura de las *redes complejas*. Con ello se intenta explicar como la *arquitectura* formada por las interacciones, abre las puertas a la comprensión de los fenómenos colectivos (transiciones de fase, extinciones en cascada, etcétera) que aparecen en el seno de los sistemas complejos.

En la línea de lo anterior, Bartolo Luque discute un ejemplo singular en su capítulo "Números críticos autoorganizados". Las redes complejas tienen una serie de propiedades universales compartidas entre sí, independientemente del ejemplo particular del que se trate. Algunas tienen propiedades fractales y algunas presentan el fenómeno de "mundo pequeño". Los ejemplos van desde las redes complejas que se forman entre las moléculas de agua líquida y que le confieren propiedades únicas y muy especiales; hasta las redes neuronales en el cerebro pasando, desde luego, por las favoritas de los jóvenes del siglo XXI: las redes sociales tipo *Twitter* y *Facebook*. Luque nos presenta; sin embargo, una red muy especial, la red formada entre números enteros, y con ello nos transporta a una interesante discusión sobre las inesperadas relaciones entre la teoría de números en matemáticas y la física de los sistemas complejos.

Las redes complejas son relaciones entre elementos que interactúan y su representación gráfica es en forma de grafos estáticos. Sin embargo, el mundo de las interacciones incluye al de los elementos móviles y por ello, sus redes tienen conectividad local cambiante y los fenómenos que surgen de ello no son simples. El estudio de la difusión y movilidad es muy importante para la comprensión de fenómenos que siguen siendo enigmas para la física, por ejemplo, a nivel molecular, el transporte de materia y las transiciones hacia la turbulencia, la cinética de reacciones químicas autocatalíticas, los motores moleculares, etcétera. A otro nivel, la difusión y movilidad engendran fenómenos aún parcialmente explicados como son, por ejemplo, el flujo génico en poblaciones o el flujo de información en sociedades. Son precisamente este tipo de problemas de frontera los que Denis Boyer discute en su capítulo "Procesos difusivos: de moléculas a animales".

La movilidad de un conjunto de partículas correlacionadas (movilidad colectiva) es una de las fronteras de la física en el siglo XXI y ello lo explica Francisco Sevilla en su capítulo "Movilidad y agentes". Considere el lector a las parvadas de pájaros volando en sincronía o los cardúmenes de peces y ¿por qué no?, la movilidad de humanos entrando y saliendo de un recinto. En los tres casos, se tienen flujos de individuos en los que interacciones locales y percepción individual sobre la posición y velocidad de los vecinos inmediatos, ayudan a la toma de decisiones que se traducen en flujos de movimiento coherente de todo el conjunto, en un proceso social autoorganizado y por ende, fuera de equilibrio. La fenomenología física que emerge en estos sistemas es extremadamente rica y constituye un verdadero reto para la física estadística, los sistemas complejos y –desde

luego— para la *física de lo social*.

La cuarta y última parte del libro trata de la incursión de la física en otras disciplinas, es decir, la "Física interdisciplinaria". De inmediato cobra relevancia la pregunta ¿Existe la física de lo social? como se sugiere en el párrafo anterior. Uno de los autores de estas líneas recuerda una conversación sostenida por ahí del año 2005 con un colega físico de mayor edad. La plática giraba alrededor un artículo publicado en esos días en una de las revistas más veneradas por los físicos: *Physical Review Letters*. El texto de marras trataba sobre la dinámica y arquitectura de las redes complejas con implicaciones para las redes sociales. La opinión del colega, hecha con cierto desdén, fue literalmente "es verdad que eso es ciencia; pero no es física". Dicho de tal manera vino a convertirse en uno de los más bellos ejemplos ilustrativos de lo expuesto por alguna vez por Max Planck: "una nueva verdad científica no triunfa por convencer a sus oponentes y hacerles ver la luz, sino porque sus oponentes finalmente mueren, y crece una nueva generación que se familiariza con ella". Hoy en día existe una febril actividad de los físicos interesados por la física de los fenómenos sociales. Pero esto ni siquiera es tan nuevo como parece. Prueba de lo anterior es la bien documentada amistad entre Galileo Galilei y Thomas Hobbes y el hecho de que las ideas físicas del primero influyeron decisivamente en el pensamiento político del segundo, quien, por cierto, además de ser uno de los pilares de la filosofía política, era un hábil matemático y físico. Respondiendo a la pregunta inicial, Gerardo García Naumis inicia la última sección del presente libro con su capítulo "Física y sociedad", en el que deja muy claro que la física de lo social si es, efectivamente, un febril campo de investigación donde los fenómenos sociales, como manifestaciones de la naturaleza, son perfectamente entendibles desde la física. No desde la física tradicional, sino desde la física que se dibuja en los albores del siglo XXI. No hablamos de reduccionismo, hablamos de la nueva física de los sistemas complejos sociales.

Nuestra sociedad moderna se basa en la economía de mercado y todos nosotros, como lo destacan Ana María Contreras y Hernán Larralde, hemos oído hablar de las crisis económicas, del neoliberalismo, de la inflación y el desempleo, etcétera; pero pocos sabemos, bien a bien, de qué se trata la economía. Menos, todavía, sabemos que muchas herramientas y enfoques propios de la física hallan aplicaciones en el estudio y descripción de sistemas económicos y financieros. Es justamente a esto que los autores del capítulo "Econofísica" se abocan, a mostrar como herramientas de la física estadística y de los sistemas complejos, están construyendo la teoría económica del mañana.

Pero quizá no existe una área donde la actividad de los físicos haya impactado de manera tan decisiva el bienestar de los humanos que la medicina, como lo narra Mercedes Rodríguez en su capítulo "Física médica". De una u otra manera, esta área de la física se concentra en idear y mejorar métodos para el diagnóstico no invasivo (imagenología médica) y en innovar y perfeccionar métodos para curar enfermedades mediante el uso, por ejemplo, de radiaciones (radioterapia) o más recientemente de métodos nanotecnológicos para el suministro de medicamentos en lugares extremadamente localizados. Esta rama interdisciplinaria de la física es sumamente importante para entender la salud

humana y promover el bienestar social. Como ciencia, también enfrenta una variedad de desafíos abiertos que habrán de ocupar a los físicos del mañana.

Además de la salud, el bienestar humano esta dado por una serie de factores donde la ciencia y la tecnología se conjugan para aportar soluciones. Tal es el caso de la ciencia de los materiales, como lo destaca Gonzalo Gonzáles en su capítulo “Perspectivas de los nuevos materiales del siglo XXI”. En esta contribución se narran con detalle algunas de las líneas de investigación abiertas para atacar problemas ambientales como el cambio climático o la búsqueda de nuevas fuentes de energía que puedan, eventualmente, reemplazar a las que provienen de los combustibles fósiles.

Finalmente, la sección y el libro, acaban con el capítulo “El universo algorítmico” de Héctor Zenil, que describe una de las ideas más audaces y polémicas de la física contemporánea: ¿Tiene el universo un carácter digital? ¿Es el universo una enorme computadora? El autor revisa como la teoría de la computación y la teoría de la información algorítmica intentan explicar la emergencia de estructura y la persistencia de principios físicos, dando lugar incluso a posibles reinterpretaciones de teorías físicas en términos de información.

El presente libro consta de veinte ensayos de autores reconocidos como autoridades en sus campos. La selección de los autores no ha sido arbitraria. Son una muestra de una generación que tendrá en sus manos el desarrollo de la física en las proximas tres décadas –por lo menos– y cuya obra futura dejará una marca al mismo tiempo que abrirá más caminos. Los autores, desde luego, no son todos los que deberían estar y muchos otros temas de igual relevancia han quedado fuera. A todos aquellos ausentes les ofrecemos una disculpa. Los límites de espacio han impuesto su voluntad, que no es la nuestra.

Octavio Miramontes y Karen Volke
México, D.F. 2013