

LA FÍSICA DEL SIGLO XXI

F. J. YNDURÁIN MUÑOZ *

* Departamento de Física Teórica, C-XI, Universidad Autónoma de Madrid, Canto Blanco, E-28049, Madrid.
E-mail: fjy@delta.ft.uam.es.

"Y Pasjur, sacerdote, hijo de Inner, que era inspector jefe de la casa de Yavé, oyó a Jeremías vaticinando estas cosas e hizo azotar a Jeremías, profeta, y ponerle en el cepo que hay en la puerta superior de Benjamín, junto a la casa de Yavé."

JEREMÍAS, 20 : 1-2

INTRODUCCIÓN

No es el de profeta o adivino un oficio tranquilo. A los peligros que acecharon a los de la antigüedad (baste recordar cuántos murieron lapidados, quemados o, como Laocoonte y sus hijos, presa de serpientes; por no hablar de la Sibila de Cumas, convertida en grillo), se une uno indudablemente menos violento, pero más seguro, que es el de la confrontación de las predicciones con la realidad. Existen ejemplos en la historia de la física de grandes científicos que han errado ampliamente en sus predicciones e incluso en sus estimaciones de la ciencia conocida: Lord Kelvin, que cuestionó la naturaleza corpuscular de la electricidad o los hallazgos de la geología es uno entre muchos; las meteduras de pata del gran Rutherford, que calificó a la relatividad de fantasía sólo apropiada para alemanes o negó la posibilidad de desarrollar la energía nuclear son famosas entre los científicos.

Aunque, como se ha dicho, no es fácil predecir, lo que es relativamente más sencillo es extrapolar. En este sentido, más que predicciones acerca de cómo será la física del siglo XXI lo que vamos a hacer es referirnos a los problemas de la física actual: el título de este texto sería, por tanto, de forma más apropiada el de Fronteras de la física. Por ello, vamos a comenzar

con una discusión de lo que sabemos en física en la actualidad, es decir, de la física del último siglo. Lo que no es poco: puede decirse que el siglo XX ha estado, desde el punto de vista científico, e incluso desde el punto de vista sociológico, dominado por la física. Después discutiremos algunos de los puntos oscuros de este conocimiento, y ciertas prolongaciones naturales del mismo. Por supuesto, sin pretender completitud: el área de conocimientos físicos es muy vasta y nadie (ciertamente no yo) puede pretender enciclopedismo en este campo. Este será nuestro modesto ejercicio de profecía.

Por ordenar un poco la discusión vamos a separar la física básica de la aplicada; y dentro de la primera, a la que voy a dedicar más espacio por ser en la que me considero más competente, la cuestión de la estructura última de la materia del problema del origen del universo. Digamos, la física del microcosmos y la del macrocosmos.

1. LAS PARTÍCULAS E INTERACCIONES ELEMENTALES

Uno de los descubrimientos más impactantes del siglo XX es que, aparentemente, toda la materia está hecha de tres tipos de partículas elementales: electrones, neutrinos y quarks. Este descubrimiento podemos acotarlo en el tiempo entre 1897, año en que J. J. Thomson descubrió el electrón, y 1995, cuando se descubrió el último quark (conocido como quark *t*) en el laboratorio Fermilab, cerca de Chicago. Pero, además, a mediados de los años setenta del mismo

siglo se completó la descripción de las tres interacciones básicas, conocidas como *electromagnética*, *fuerte* y *débil* en términos de las cuales se pueden comprender todos los procesos que se dan en el microcosmos. El consiguiente modelo, conocido como *modelo estándar*, ha sido validado por innumerables experimentos y nos permite predecir con precisión a veces fantástica los fenómenos que observamos en el universo atómico y subatómico.

No es este el lugar de presentar una descripción detallada de la teoría de las interacciones básicas de la naturaleza. Simplemente quiero recordar que el modelo estándar describe toda la naturaleza microscópica (y por ende, al menos en principio, toda la naturaleza) en términos de las masas de tres tipos de neutrinos, tres tipos de electrones y seis tipos de quarks; y las intensidades de las interacciones que actúan entre estas partículas. Tenemos la intensidad de la interacción electromagnética, que podemos identificar con la carga del electrón, la intensidad de la interacción débil y la de la interacción fuerte; esta última nos mide la intensidad de la interacción entre gluones y quarks.

La lista de estas partículas elementales, que forman los *ladrillos* con los que, al parecer, todo el cosmos está construido, la presentamos en el cuadro adjunto. Prácticamente toda la materia que se encuentra a nuestro alrededor está constituida por partículas de la primera familia (mas los fotones y gluones, *quanta* de las interacciones electromagnéticas, y fuertes, respectivamente).

$e; Q_e/ e = -1$	$\mu; Q_\mu/ e = -1$	$\tau; Q_\tau/ e = -1$
$\nu_e; Q_{\nu_e} = 0$	$\nu_\mu; Q_{\nu_\mu} = 0$	$\nu_\tau; Q_{\nu_\tau} = 0$
$d; Q_d/ e = -\frac{1}{3}$	$s; Q_s/ e = -\frac{1}{3}$	$b; Q_b/ e = -\frac{1}{3}$
$u; Q_u/ e = \frac{2}{3}$	$c; Q_c/ e = \frac{2}{3}$	$t; Q_t/ e = \frac{2}{3}$
“Familia” 1	“Familia” 2	“Familia” 3

Todas las partículas elementales, agrupadas en "familias". Junto a cada partícula mostramos su carga eléctrica (Q), en unidades de la del protón, que denotamos por |e|. A las partículas μ y τ se las conoce también como "electrones pesados."

Aunque conocemos con enorme precisión las interacciones y propiedades de las partículas de la segunda y tercera familias, nadie sabe el papel que juegan estas partículas. Prácticamente todo el universo está compuesto solo por partículas de la primera familia; las otras sólo se encuentran en raros rayos cósmicos o producidas artificialmente en los grandes aceleradores.

Aparte de las masas de las partículas del cuadro que hemos presentado, y la intensidad de las tres interacciones operativas en el microcosmos, hay otros parámetros que nos describen el modelo estándar. Tenemos la masa de las partículas W y Z, intermediadoras de la interacción débil, y la masa de la (todavía hipotética) partícula de Higgs, que se supone es la responsable de las masas de las demás partículas y de la que hablaremos con algo más de detalle a continuación. Existen además otros parámetros (lo que se conoce como ángulos de mezcla y dos fases) que no discutiremos en absoluto.

1.1. El problema de las masas de las partículas W, Z y el mecanismo de Higgs

Para explicar el problema del mecanismo de Higgs tenemos que discutir con un cierto detalle las teorías de las interacciones débiles. Ya en 1961 Sheldon Glashow había formulado una teoría, esencialmente idéntica a la que ha sido comprobada experimentalmente de forma aplastante a partir de 1973, suponiendo que las interacciones débiles son mediadas por partículas W y Z. Para estar de acuerdo con los resultados experimentales, Glashow reconoció que estas partículas tenían que tener unas enormes masas, docenas de veces mayores que el protón (como hoy sabemos, la W unas noventa veces y la Z casi cien).

Esto era un desastre; debido a que las partículas W, Z tienen autointeracciones, la teoría sólo puede ser consistente si su masa es cero. Higgs, entre otros, encontró una vía para solucionar el problema. Consiste en imaginar que el vacío está lleno de un campo, que en su honor se conoce hoy como campo de Higgs. En su modelo no todas las partículas interactúan con ese campo; las que lo hacen adquieren algo indistinguible de la masa ya que, al moverse en el vacío ocupado por el campo de Higgs, tienen que arrastrarlo.

Weinberg e, independientemente, Salam y Ward, se dieron cuenta de que se podía salvar el modelo de Glashow suponiendo que las partículas W y Z no tienen masa por sí, sino sólo como reflejo de su interacción con el vacío de Higgs. De hecho, hay que suponer que las masas de todas las partículas que conocemos tienen este extraño origen.

Este vacío, lleno del campo de Higgs, es muy incómodo. En primer lugar, la partícula correspondiente es la única que no ha sido encontrada experimentalmente. Es cierto que existen indicaciones indirectas sobre su posible existencia en las medidas de precisión realizadas, especialmente en los aceleradores LEP y LEP200, en el CERN (Centro europeo de física de partículas, cerca de Ginebra), particularmente debido a la influencia de la partícula de Higgs sobre propiedades de las partículas W y Z ; pero no hay nada definitivo. Lo peor, sin embargo, es el parecido del campo de Higgs con el éter, y el presentar problemas casi tan formidables



Figura 1. La señal de cuatro chorros de partículas, observada en el verano de 2000 en el detector Aleph, en LEP, puede interpretarse como producción de Z y Higgs, y posterior desintegración de estos.

como aquel. Por ejemplo, la existencia del campo de Higgs tiene importantes consecuencias en conexión con las interacciones gravitatorias, a las que el campo de Higgs no puede sustraerse. En particular, la presencia de un campo llenando el "vacío" implica que todo el universo debería colapsar inmediatamente. La única solución para evitar este colapso es introducir una constante cosmológica *ad hoc* que cancele exactamente, con más de cincuenta cifras decimales de precisión, el efecto del campo de Higgs: una solución difícilmente creíble.

En el otoño de 2000, llegaron noticias de que uno de los cuatro grupos que trabajan en el acelerador LEP200, en el laboratorio CERN conocido con el nombre de *Aleph*, había encontrado señales de la existencia de la partícula de Higgs con una masa de unas 123 veces la del protón: compatible con la deducida de medidas de precisión a través de correcciones radiativas que mencionamos con anterioridad. Y esta señal ha sido parcialmente corroborada por indicaciones, algo menos claras, que aparecen en otros de los detectores de LEP, en particular L3 y Opal. En la figura 1 mostramos la reconstrucción de una señal con cuatro chorros de partículas encontrada en el detector Aleph, tal vez la más convincente de todas.

Sin embargo, la evidencia no es concluyente; cuatro o cinco señales, obtenidas al límite de la energía disponible, bien pueden ser debidas a ruido de fondo. Indudablemente, la confirmación (o no) de la existencia de la partícula de Higgs será uno de los platos fuertes de la física de partículas en los próximos años. Como lo será la investigación de sus propiedades: ¿existe realmente el campo de Higgs como campo fundamental? Nótese que no me estoy refiriendo aquí a si existe o no una partícula con las propiedades similares a las que predice el modelo de Weinberg-Salam; podría existir, pero no ser una entidad fundamental. ¿Es la introducción del campo de Higgs únicamente un artilugio que esconde nuestra ignorancia acerca de una teoría más básica? Sin duda esta última será una de las cuestiones más ardorosamente investigadas en los comienzos del siglo XXI.

1.2. Las masas de los neutrinos

La cuestión de la masa de los neutrinos está ligada, en sus inicios, con los experimentos que han intentado

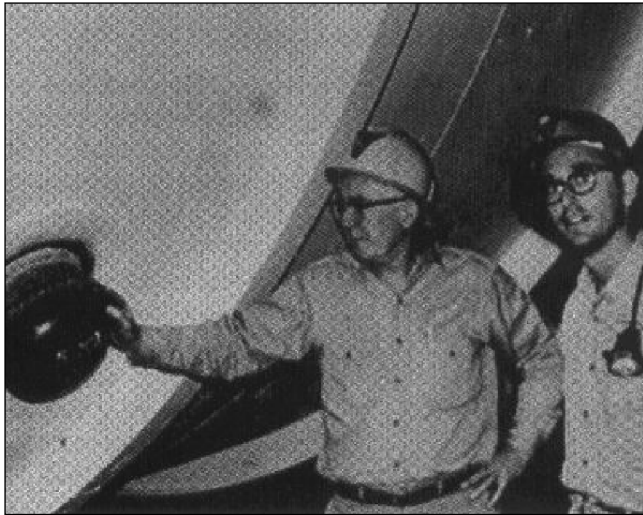


Figura 2. Davis y Bahcall, con el recipiente utilizado en el experimento de Davis.

detectar los neutrinos que, en grandes cantidades, el sol produce en las reacciones nucleares que ocurren en su interior. El intento de estudiar estos neutrinos, conocidos como "neutrinos solares", empezó desde 1964, cuando se realizó la propuesta formal de construir un detector con casi medio millón de kilos de un compuesto de cloro (*perclorotileno*), que sería capaz de registrar las señales de los neutrinos solares. Después de varias peripecias, y con la ayuda del Laboratorio Nacional de Brookhaven, en Estados Unidos, un pequeño equipo formado por Raymond Davis, Don Harmer y John Galvin diseñó y construyó el experimento en la mina de oro Homestead, en Dakota del Sur, en 1965. La razón de utilizar una mina (como en el experimento de Davis) o el interior de un túnel, como en otros experimentos, es que en tales lugares se está blindado contra los rayos cósmicos que, de lo contrario, producirían un gran ruido de fondo, imposibilitando la detección de algo tan sutil como las interacciones de los neutrinos.

Se rellenó el depósito con el medio millón de litros de perclorotileno (ver la figura 2); cada varios meses se ciclaba el material por detectores de radiactividad, esperándose detectar algún átomo de argón radiactivo, y por tanto el rastro de la interacción de algún neutrino, una o dos veces al año.

Pero durante mucho tiempo el experimento, conocido como *experimento de Davis* (que era quien lo lideraba), funcionó sin éxito aparente. Las señales de

neutrinos tardaron en llegar y, cuando llegaron (a partir de 1968), resultaron mucho menos frecuentes de lo que se esperaba: al menos un factor dos, tal vez un factor tres. Sin embargo, el detector de Davis era tan difícil de controlar que la comunidad científica no prestó demasiada atención al hecho y durante casi veinte años Davis prosiguió, prácticamente ignorado, sus experimentos, a cuyos resultados la comunidad se refería ocasionalmente como *el problema de los neutrinos solares*.

Sin embargo, a finales de la década de los ochenta, y a lo largo de los noventa, y ayudados los investigadores por la experiencia adquirida en los intentos de detectar la desintegración del protón (algo de lo que hablaremos más adelante), se han llevado a cabo otros experimentos utilizando materiales distintos del de Davis, y con sensibilidad a neutrinos producidos en reacciones solares distintas de las consideradas por él. Los resultados de todos estos experimentos confirmaron los hallazgos de Davis.

También se obtuvo información sobre la "desaparición" de los neutrinos en los experimentos dedicados a detectar neutrinos producidos en la atmósfera por rayos cósmicos, en especial el de Kamiokande, situado en una mina en las montañas del Japón. Estos experimentos (dirigidos por Masatoshi Koshiba y Yoji Totsika), estuvieron entre los que observaron los neutrinos producidos por la supernova de 1987 y después se dedicaron a la observación de neutrinos producidos por rayos cósmicos.

A partir de 1996, el detector de Kamioka se reemplazó por uno mucho más grande, conocido como Superkamiokande, en que la posibilidad de detectar neutrinos de origen extraterrestre se tuvo en cuenta desde el principio. En la actualidad se planean también detectores de neutrinos procedentes de rayos cósmicos ultraenergéticos en lugares tan exóticos como el polo sur (conocido como AMANDA), las profundidades del Mediterráneo (con los nombres clave de ANTARES, NESTOR) e incluso en el espacio.

Aunque los experimentos son muy difíciles, ya que después de grandes esfuerzos sólo se recogen unos pocos sucesos en varios años, la conclusión parece confirmarse: se detectan algo menos de la mitad de los neutrinos que el sol emite. Y además, los experi-

mentos con rayos cósmicos (tal los de Kamioka) parecen indicar que también el número de interacciones de neutrinos procedentes de esta fuente decrece, cuando los neutrinos tienen que viajar un largo recorrido antes de llegar al detector.

Esto lo podemos saber porque en los más modernos experimentos (en particular en los realizados en Kamioka) es posible inferir la *dirección* desde la que llegan los neutrinos. Es por tanto posible diferenciar entre los neutrinos producidos en la atmósfera por rayos cósmicos directamente encima del detector, y aquellos neutrinos que llegan después de atravesar la tierra, habiendo sido producidos en los antípodas. El sorprendente resultado que se encuentra es que el número de neutrinos procedentes de los antípodas que se detectan es bastante inferior a los neutrinos detectados procedentes de encima del detector: aparentemente, desde los antípodas al detector desaparece casi la mitad de los neutrinos.

No podemos, con seguridad, dar una razón para estos curiosos comportamientos de los neutrinos. Cuando viajan una pequeña distancia entre la fuente que los produce y el detector, como es el caso con los generados en reactores nucleares, en la atmósfera inmediatamente encima del detector, o en aceleradores de partículas, sus señales son exactamente lo que se espera teóricamente. Pero cuando media una gran distancia entre fuente y detector parece que los neutrinos se perdiesen por el camino.

Se han propuesto docenas de explicaciones para este fenómeno. La más sencilla, sugerida ya en 1968 por Vladimir Gribov y Bruno Pontecorvo, es suponer que los neutrinos tienen una muy pequeña masa (tal vez generada por el mecanismo de Higgs), con lo cual podrían desintegrarse, o tal vez oscilar, entre los tres posibles tipos de neutrino. Así, el neutrino electrónico (que es el que producen las reacciones solares) podría desintegrarse, o transmutarse, en neutrinos tipo *mu* o *tau*, que los aparatos utilizados por Davis y los demás experimentos no son capaces de detectar.

Esto es un problema abierto; no cabe duda de que, dada la lentitud que, por su propia naturaleza, tiene el desarrollo de los experimentos, esta cuestión será una de las que tendrán ocupados tanto a teóricos como experimentadores durante mucho tiempo.

1.3. Gran unificación; desintegración de la materia

No cabe duda de que el progreso en la comprensión de la estructura de la materia que ha representado el modelo estándar es enorme. Los fenómenos que a finales del siglo XIX constituían importantes puntos oscuros, tales como desintegraciones radiactivas o los mecanismos de producción de energía por las estrellas, han sido explicados; como lo ha sido la estructura del núcleo atómico descubierto a principios del siglo XX. De los casi cien elementos químicos de la tabla de Mendeleev hemos pasado a cuatro: los quarks de tipo *u*, *d*, el electrón y el neutrino electrónico. Podemos decir que, a partir de 1971-1973, años en que se propusieron las teorías correctas de interacciones débiles y fuertes, y culminando en 1982, en que se descubrieron (con todas las propiedades predichas por la teoría) las partículas intermediadoras de la interacción débil, las *W* y *Z*, tenemos una descripción sencilla y coherente de la materia.

Sin embargo, casi desde el principio, desde ya 1974, comenzaron los intentos por ir más allá del modelo estándar. Intentos que, hasta hoy, se han saldado con un fracaso: a pesar de lo cual vamos a discutir brevemente uno de los más interesantes. Aun sin éxito por el momento, podrá tal vez integrarse en la física de partículas en el siglo XXI.

Este intento de ir más allá del modelo estándar lo constituyen las llamadas "teorías de gran unificación". Teorías que vienen sugeridas por un hecho indudable: tanto las partículas como las interacciones que componen el modelo estándar presentan unas notables similitudes. Electrones, neutrinos y quarks son todos ellos fermiones, esto es, obedecen la estadística de Fermi-Dirac y el principio de exclusión de Pauli. También tienen el mismo valor para el número cuántico de espín, $1/2$ (en unidades de la constante de Planck, \hbar).

Con respecto a las interacciones, las similitudes son también claras. Las interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes son las tres de tipo gauge, y están mediadas por partículas (fotones, *W* y gluones) que son todas ellas *bosones* y tienen el mismo valor del espín, 1. Finalmente, resulta que las interacciones electromagnéticas y débiles están, en el modelo de Glashow-Weinberg, parcialmente unificadas. Parece,

pues, natural intentar completar esta unificación, e intentar extenderla para incluir también las interacciones fuertes.

En efecto, esto es (teóricamente) posible. Y así, a mediados de los años setenta Pati y Salam y, especialmente, Georgi y Glashow, construyeron modelos en los que las tres fuerzas (débiles, electromagnéticas y fuertes) se unificaban en una *única* interacción; y las cuatro partículas (quarks *u*, *d*, electrón y neutrino electrónico) resultaban ser diferentes estados de una *única* partícula elemental.

Las teorías de gran unificación propuestas por Georgi y Glashow tenían importantes consecuencias. En primer lugar, explicaban por qué todas las cargas son múltiplos enteros de la del quark *d*, que a su vez es 1/3 de la del electrón. En segundo lugar, eliminaban algunos de los problemas de autoconsistencia de la electrodinámica cuántica. En tercer lugar, la intensidad relativa de las fuerzas resultaba una *predicción* de la teoría, predicción que estaba de acuerdo con los resultados experimentales, dentro de la precisión alcanzable en los años setenta-ochenta.

Finalmente, la gran unificación implicaba que el protón (o, en general, toda la materia) tenía que ser inestable, siendo su tiempo de desintegración de un poco más de 10^{29} años. Esta última predicción llevaba a impactantes consecuencias cosmológicas, ya que ofrecía una posible explicación de la aparición de la materia en el big bang, a partir de energía pura, por el proceso inverso al de desintegración, algo sobre lo que volveremos más adelante. Y lo que es más importante, las teorías de gran unificación ofrecían resultados *cuantitativos* sobre ritmos de desintegración del protón, los que, además, resultaban estar al alcance de la tecnología experimental de la época. Y, de hecho, varios grupos experimentales en la India, Japón, Estados Unidos y Europa habían comenzaron al final de los años setenta una frenética carrera por detectar la posible inestabilidad de la materia.

Pero, desgraciadamente, los experimentos realizados en varios laboratorios del mundo para intentar encontrar la desintegración del protón (sin duda la predicción más importante de estas teorías de gran unificación) no dieron fruto, llegándose a establecer en la actualidad la vida media del protón como superior a

10^{33} años, decididamente incompatible con los modelos de gran unificación.

Nos quedan, sin embargo, una serie de preguntas abiertas. ¿Es posible reformular las teorías de gran unificación guardando sus importantes atractivos, pero haciéndolas compatibles con la vida media del protón? ¿Existen otros procesos (además de los debidos a gran unificación) que impliquen desintegración de la materia? Sólo el futuro podrá responder a estas cuestiones, sobre las que volveremos brevemente más adelante.

1.4. Gravitación, clásica y cuántica. Cuerdas

La gravitación es la única de las cuatro interacciones que operan en la naturaleza que no ha sido aún posible comprender a nivel microscópico. Una de las razones, indudablemente, es la de que no tenemos evidencia experimental en la que basarnos: las interacciones gravitatorias son tan extraordinariamente débiles que sólo la enorme cantidad de masa que hay en un cuerpo como la tierra permite que sus efectos sean observables; pero la interacción gravitatoria entre un electrón y un protón (por poner un ejemplo) en un átomo de hidrógeno es 10^{54} veces más débil que la electromagnética.

Es posible intentar atacar el problema en otra dirección, y trabajar con la teoría clásica (aquí la palabra *clásica* se utiliza en el sentido de no-cuántica) de la gravedad de Einstein, y realizar en ella cambios análogos a los que llevan de la teoría clásica de Maxwell del electromagnetismo a la electrodinámica cuántica; pero esta vía presenta varios problemas. En primer lugar, no está claro el papel de la teoría de la gravitación universal de Einstein, ni siquiera a nivel clásico, y su cuantización choca con dificultades notables. Pero, antes de discutir las, comenzaremos por considerar la teoría de la gravitación a nivel no-cuántico.

Diez años después de la formulación de la teoría de la relatividad especial por Lorentz, Poincaré y, sobre todo, Einstein, Hilbert y el propio Einstein obtuvieron las ecuaciones generales que gobiernan, en una teoría relativista, la interacción gravitatoria. Como se ha repetido muchas veces, la virtud principal de la formulación einsteniana de la gravitación es que reduce ésta a geometría: en efecto, la misma cantidad que propor-

ción la métrica del espacio representa también al campo gravitatorio.

De hecho, la formulación de la teoría de la gravitación de Einstein es la más general posible, si suponemos que el campo gravitatorio es único y que la teoría es predictiva. Pero si aceptamos la existencia de otros campos acompañando al gravitatorio ordinario (como ocurre por ejemplo en las teorías de cuerdas, de las que diremos algo después), entonces podemos añadir términos suplementarios, que modificarán las predicciones de la teoría de Einstein de la gravedad. Sin embargo, estas modificaciones son difícilmente observables. Por ejemplo, si consideramos el efecto más ajustado que se sigue de la teoría de Einstein, la precesión del periastro de un cuerpo sujeto a la interacción gravitatoria, tenemos un desplazamiento, a primer orden en la constante de gravitación universal k , de

$$\delta\phi = \frac{3\pi r_{\text{Schwar.}}}{a(1 - \epsilon^2)}.$$

Aquí $r_{\text{Schwar.}} = 2Mk/c^2$ es el llamado *radio de Schwarzschild* del objeto,¹ de masa M , que crea el campo gravitatorio; a es el semieje mayor, y ϵ la excentricidad de la órbita del cuerpo cuyo movimiento estudiamos. En el caso del planeta Mercurio, y comparando con el resultado observacional, tenemos, en segundos de arco por siglo,

$$\delta\phi = \begin{cases} 43.03'' & \text{(teoría)} \\ 42.11'' \pm 0.45'' & \text{(observado)}. \end{cases}$$

La coincidencia entre teoría y observación no se limita al movimiento del planeta Mercurio. También se da en otros objetos celestes en los que se ha medido: Venus, el asteroide Ícaro, la propia tierra e incluso un objeto alejado miles de años luz, el púlsar PSR 1913+16, en el que la precisión en $\delta\phi$ es todavía mejor que en el caso de Mercurio.

El acuerdo es indudablemente espectacular; pero nos dice poco sobre posibles correcciones, cuya influencia, a distancias grandes comparadas con el radio de Schwarzschild, son despreciables. Para detectar posibles términos suplementarios al lagrangiano de

Hilbert-Einstein necesitaríamos hacer observaciones a distancias comparables con el radio de Schwarzschild del objeto cuya influencia gravitatoria estamos estudiando: es decir, tendríamos que observar lo que ocurre en la vecindad de un agujero negro. Y tampoco está claro qué ocurre a muy grandes distancias, algo que discutiremos más adelante.²

Con respecto a lo que ocurre si intentamos cuantizar la teoría gravitatoria, la situación es aún más oscura. Las observaciones *clásicas* todavía nos permiten verificar la aproximación de primer orden deducida del lagrangiano de Hilbert-Einstein. Pero los efectos cuánticos, incluso de la teoría a primer orden, son completamente inobservables, y probablemente lo seguirán siendo durante muchos años. A las energías actualmente alcanzables son de menos de una milésima de billonésima de los efectos de las otras interacciones y, por tanto, indetectables.

Podemos decidir no hacer caso de la falta de información experimental, e intentar cuantizar directamente la teoría clásica, simplemente reinterpretando las variables como operadores. Si hacemos esto nos encontramos con lo que se llama una teoría no-renormalizable: al hacer cálculos de orden superior al primero encontramos infinitos, los que no podemos reabsorber en la definición de los parámetros de la teoría. Por todos estos motivos muchos físicos piensan que el lagrangiano de Hilbert-Einstein representa sólo una teoría efectiva, a ser utilizada únicamente a primer orden. Las claves de una teoría más fundamental serán difíciles de encontrar mientras no tengamos resultados experimentales sensibles a órdenes superiores (y a efectos cuánticos, lo que es de momento inimaginable).

Pero la situación no es, tal vez, tan desesperada. En las teorías de *supergravedad*, que no discutiremos, los infinitos que ocurrirían en segundo orden de aproximación desaparecen, lo que resulta un indudable avance; y en las teorías de cuerdas, que consideramos a continuación, los infinitos desaparecen, tal vez a todos los órdenes.

¹ El radio de Schwarzschild de un objeto es el radio tal que, si comprimiésemos el objeto en el interior de dicho radio, se convertiría en un agujero negro.

² Lo que no discutiremos son las indicaciones astronómicas, cada vez más fundamentadas, de la existencia de lo que se conoce como una "constante cosmológica," que implica una modificación de las ecuaciones de Einstein.

En 1984 John Schwartz en CalTech y Michael Green, en el *Queen Mary College* de Londres, publicaron unos trabajos resucitando las teorías de cuerdas, que se habían ya postulado quince años antes para explicar la dinámica de hadrones. En la nueva versión la dimensión de estas cuerdas no es ya el tamaño de los hadrones, digamos una billonésima de milímetro, sino muchísimo menor, de 10^{-32} centímetros. Esta es la llamada "longitud de Planck," y es la distancia a la cual los efectos cuánticos de la gravedad compiten con los de las interacciones, débiles, electromagnéticas y fuertes, del modelo estándar. Schwartz y Green propusieron interpretar las partículas elementales que conocemos como vibraciones de estas cuerdas. Es decir: el fotón y el electrón, los quarks, las partículas *W* y *Z*, etcétera, deben considerarse como los *quanta* de estas vibraciones.

Para que las teorías de cuerdas más sencillas sean consistentes es necesario suponer que el universo tiene diez dimensiones. El problema que plantean las dimensiones extra, que nadie por supuesto ha observado, se resuelve (?) suponiendo que están confinadas en una región muy pequeña, del orden del tamaño de las cuerdas.³ Podemos pues imaginar el universo como un tubo muy largo, pero muy estrecho. Unos seres filiformes que vivieran en este tubo (es decir, nosotros) serían conscientes de una dimensión, a lo largo del tubo, pero no de las otras dos, ya que no podrían apenas moverse a lo ancho.

Estas dimensiones extra son esenciales para las teorías de cuerdas; en efecto, aunque plantean problemas, exhiben indudables virtudes. En primer lugar, podemos identificarlas con las propiedades internas (isospín débil, color, carga eléctrica) de las distintas interacciones. En segundo lugar, proporcionan un mecanismo regulador de los infinitos que aparecen en el modelo estándar cuando se hacen cálculos a órdenes de aproximación superiores al primero: la teoría de cuerdas produce resultados *finitos*, sin necesidad de renormalización. Finalmente, el reflejo a escala microscópica de la existencia de estas longitudes elementales, las de las dimensiones extra y la del tamaño de

las cuerdas, es la interacción gravitatoria que así (por fin) aparece integrada con las demás.

Una propiedad extra de las teorías de cuerdas es que, para poder acomodar todas las partículas que conocemos, necesitan ser supersimétricas,⁴ por lo que en la actualidad a estas teorías se las conoce también como *supercuerdas*. A principios de los años ochenta, cuando la supersimetría era más popular e incluso parecía haber evidencia experimental de su existencia, esta característica era un punto más a favor de los cuerdistas.

Todos estos motivos espolearon a una buena parte de la comunidad teórica de físicos de altas energías a explorar en detalle las teorías de cuerdas, exploración que no ha concluido, ni lleva visos de concluir. Pero el problema con estas teorías es que la plétora de dimensiones extra que predicen son tan extraordinariamente pequeñas que son inobservables. No sólo con los métodos de detección que poseemos hoy, sino con cualquiera de los que podamos imaginar: haría falta construir un acelerador que llegase a la energía de Planck, diez millones de *billones* de GeV, o ir a las proximidades de un agujero negro. Y por otra parte predicen la existencia de muchas nuevas partículas, entre ellas de los *compañeros supersimétricos*, todas ellas inobservadas.

Estos no son los únicos problemas de las teorías de cuerdas. Además de lo dicho, resulta que las teorías no son únicas; los mecanismos por los que las dimensiones extra se enrollan no son conocidos; y nadie ha conseguido demostrar que realmente contengan el modelo estándar. Y, lo que tal vez es peor, no resuelven ni uno sólo de los problemas que parecen básicos de este modelo. No proporcionan indicaciones de los valores de las masas de las partículas, ni de las intensidades de las interacciones, ni del mecanismo de Higgs.

Pero esto no detiene a los entusiastas de las teorías de cuerdas, fascinados por su consistencia y belleza interna (según ellos), y convencidos de que es posible descubrir la estructura última del universo por consi-

³ Este mecanismo había sido propuesto mucho antes, en otro contexto, por Kaluza y Klein.

⁴ No discutiré en detalle el significado de esta "supersimetría", pero sí indicare que implica la existencia, por cada una de las partículas y fuerzas conocidas de lo que se conoce como *compañeros supersimétricos*, que son otras partículas con propiedades similares excepto la masa y el espín.

deraciones de simetría. Sin embargo, mi opinión personal al respecto es bastante pesimista; aunque no tengo duda de que la investigación de estas teorías continuará a lo largo del siglo actual. Por supuesto no podemos demostrar que las teorías de cuerdas son falsas: y tal vez en el acelerador LHC, que producirá resultados a partir del año 2008, en el CERN, se encuentre algún "compañero supersimétrico", o alguna partícula de tipo Z , además de la familiar que contiene el modelo estándar. Pero lo que va a ser poco menos que imposible es hallar indicaciones de que estas partículas impliquen una estructura de cuerdas.

Mientras tanto, mientras no haya indicaciones *experimentales*, deberán permanecer estas teorías en los dominios de la fantasía, y de lo que podríamos llamar *física-ficción*, en que cada vez se adentran más sus practicantes.

2. MATERIA Y ANTIMATERIA. EL "BIG BANG". ¿UNIVERSO, O UNIVERSOS?

2.1. Desintegración del protón, y creación de materia a partir de energía pura

Ligado al problema de la posible desintegración del protón, que discutimos a propósito de las teorías de gran unificación, está el de la simetría entre partículas y antipartículas. Las leyes que rigen la naturaleza, resumidas en el modelo estándar, son simétricas bajo el cambio de materia en antimateria. (Para expertos diré que dicho cambio debe incluir el de "derecha" en "izquierda" y una inversión del movimiento). Sin embargo, en el universo que nos rodea la materia domina de forma aplastante: sólo producidas por algún raro rayo cósmico se encuentran antipartículas. Por supuesto, las partículas y antipartículas se aniquilan al encontrarse, por lo que no es sorprendente que no queden, por ejemplo en nuestro sistema solar, restos de una hipotética antimateria primigenia. Lo que sí es sorprendente es que al parecer, y como ya hemos comentado, no existen otros sistemas solares, ni otras galaxias, hechos de antimateria: la evidencia, en algunos casos aplastante, es que todos están hechos de la misma materia que nosotros, y contienen tan poca antimateria como el sistema solar.

No es posible afirmar nada definitivo con respecto a la pregunta que planteamos. Sólo podemos adelantar

posibles soluciones, desgraciadamente aún no contrastadas experimentalmente; tenemos que contentarnos con especulaciones alguna de las cuales, sin duda, adquirirán carácter de teorías con firme base empírica a lo largo del presente siglo. Paso a discutir con más detalle la cuestión.

Uno de los descubrimientos más fundamentales del siglo XX fue la existencia de la llamada "radiación de fondo" (Wilson y Penzias, en 1965): esto es, que todo el espacio está lleno de una radiación electromagnética, prácticamente isotrópica, constituida por fotones de muy poca energía correspondiente a unos 3 grados Kelvin —doscientos setenta grados centígrados bajo cero—. La cantidad de estos fotones es inmensa, mil millones de fotones por cada partícula material. El número de fotones, y las características de la radiación de fondo, son lo esperable si el universo comenzó con una gran explosión, conocida como el "big bang". La extraordinaria densidad de fotones sugiere que en tal comienzo nuestro universo pudo ser energía pura, y la materia que encontramos en la actualidad una mera fluctuación.

Para que esto sea posible es necesario que haya interacciones que conviertan energía en materia, sin necesidad de introducir antimateria: por ejemplo, que conviertan dos fotones en un átomo de hidrógeno. Si no existiesen tales interacciones, en el big bang se hubiese producido tanta materia como antimateria, lo que, como ya se contó, es contrario a la evidencia observacional. Si, por el contrario, efectivamente existen estas interacciones, también se podrá desintegrar la materia: más pronto o más tarde, el hidrógeno, y todos los elementos materiales se desintegrarían en radiación. El estado actual del universo sería pues una pequeña asimetría transitoria entre el big bang y el estado final, ambos consistentes en energía (radiación) pura sin presencia de partículas.

Como hemos visto con anterioridad, los mecanismos de gran unificación, de creación o aniquilación de materia (al menos los más sencillos) fallan. ¿Quiere esto decir que no es posible crear materia a partir de energía sin crear antimateria? En absoluto. Además de los mecanismos que aparecen en los modelos sencillos de gran unificación existen los que se dan en teorías de gran unificación *supersimétrica*. También hay conversión de materia en energía catalizada por monopolos

magnéticos o agujeros negros o, sin salir del modelo estándar, por los llamados instantones. Por ser de carácter muy técnico no discutiremos estos procesos. Por desgracia, las correspondientes desintegraciones son muy difíciles de observar experimentalmente en la actualidad, aunque hay propuestas que tal vez produzcan resultados positivos en el futuro.

2.2. El universo inflacionario

Consideremos el universo visible, es decir, la parte del universo del que nuestros telescopios y radiotelescopios nos dan noticia y que se extiende en una esfera con radio unos trece mil millones de años luz a nuestro alrededor. En él las galaxias se están alejando unas de otras, movimiento que es reliquia de la explosión del *big bang*. La cantidad de materia que contienen estas galaxias puede estimarse directamente, por observación telescópica o, indirectamente, por argumentos relacionados con la creación de elementos ligeros (en especial helio y deuterio) en el *big bang*. Pero esta cantidad de materia no es suficiente para, por atracción gravitatoria, frenar la expansión del universo al ritmo observado.⁵ Hace falta (tal vez) postular la existencia de materia *extra* que nuestros telescopios no detectan y que, por ello, se conoce con el nombre de *materia oscura*.

Otra indicación de la posible existencia de esta materia, invisible a la observación óptica, es la velocidad de giro, alrededor del centro de las galaxias, de las estrellas y, sobre todo, de las nubes de gas más periféricas. Estas masas gaseosas giran bastante más deprisa de lo que se podría esperar, dada la cantidad observada de materia en el interior de las galaxias: ¿quizás debido a la presencia de grandes cantidades de la misteriosa materia oscura?

¿Existe realmente la materia oscura? Y si existe, ¿qué es? Hay muchas sugerencias al respecto: los llamados *axiones* (que no discutiremos), neutrinos masivos, etc. Y, por supuesto, los compañeros supersimétricos.

El siguiente tipo de materia exótica que vamos a discutir está también relacionado con cuestiones cosmológicas, concretamente con el llamado *modelo inflacionario del cosmos*. Este modelo, propuesto por Alan H. Guth y desarrollado por Andrei D. Linde, entre otros, es una respuesta a dos importantes observaciones realizadas en 1960 por R. Dicke: ¿por qué el universo es casi exactamente plano? y, ¿por qué es casi completamente homogéneo?

La primera cuestión se refiere a lo siguiente. Teniendo en cuenta la relatividad general de Einstein, se pueden clasificar las posibles estructuras del universo en tres tipos, clasificación debida a Alexander A. Friedmann.⁶ Según ésta, el universo podría ser de tipo *elíptico*. En este caso, ocurriría que, después de un período de expansión, que duró desde el *big bang* hasta nuestros días, y que continuará durante un tiempo indeterminado en el futuro, el universo volvería a contraerse, hasta llegar a un "big crunch" (*gran aplastamiento*). El universo podría ser del tipo conocido como *hiperbólico*, y entonces se expandiría a un ritmo cada vez más rápido. Y, finalmente, el universo podría ser plano. Esto es, la expansión del propio espacio

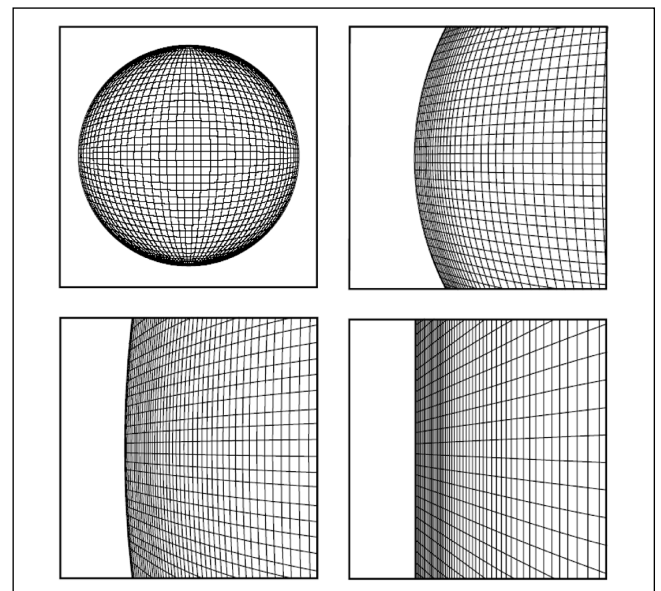


Figura 3. La superficie de una esfera hinchable se parece más y más, para un pequeño observador situado sobre ella, a una superficie plana.

⁵ De hecho, más que la propia expansión del universo es la dinámica de los cúmulos, globulares y galácticos, la que indica la necesidad de existencia de materia oscura, o modificar la teoría de la relatividad general de Einstein a gran escala.

⁶ Para expertos, añadimos que estas soluciones suponen ausencia de constante cosmológica.

(recuérdese que en la teoría general de la relatividad el espacio tiene propiedades dinámicas) estaría exactamente compensada por la atracción gravitatoria entre las estructuras materiales —galaxias, quásares, etc.— contenidas en él, de manera que el ritmo de la expansión del universo sería prácticamente constante. Por supuesto, parece muy poco probable, salvo que haya una importante razón, la existencia de tan delicado equilibrio.⁷

La siguiente cuestión es la increíble homogeneidad del espacio cósmico. La radiación electromagnética de fondo, que ya hemos mencionado, ha resultado ser, al medirse con más y más precisión, extraordinariamente homogénea e isotrópica. Tal homogeneidad parece incompatible con las irregularidades que se espera que se hubiesen producido en el big bang; por ejemplo, por efectos cuánticos amplificados. ¿Cuál es la razón de la falta de estructura?

El mecanismo de inflación resuelve ambos problemas de golpe, con el coste de una hipótesis fantástica y el postular partículas inobservadas. La hipótesis fantástica se basa en que la teoría de la relatividad prohíbe velocidades superiores a la de la luz, c , en nuestro espacio; pero, *el propio espacio* podría expandirse a velocidades muy superiores a c . El modelo inflacionario supone que esto es exactamente lo que sucedió en el principio del big bang: una expansión del universo extraordinariamente rápida que generó un universo curvado pero, con tan enorme radio de curvatura, que a una criatura que habita una pequeña porción de él le parece plano (ver Fig. 3); de la misma manera que la superficie de la tierra nos parece plana, si no nos desplazamos una gran distancia. Por supuesto, esto implica que el universo visible, diez mil millones de años luz, sería sólo una minúscula fracción del universo total.

3. LA FÍSICA APLICADA

3.1. Las aplicaciones de la física

No es exagerado decir que nuestra civilización actual depende de la física para su propia existencia.

Esto es literalmente cierto; gracias a la física (tal vez sería mejor decir *por culpa de la física*) somos capaces, desde hace más de cuarenta años, de destruirnos utilizando armas nucleares. Que, no es necesario recordar, fueron desarrolladas primeramente por físicos. Pero aparte de esta influencia, sin duda importante pero hasta hoy (afortunadamente) tan solo virtual, tenemos otras mucho más presentes. El fenomenal desarrollo de aparatos electrónicos, desde televisores hasta ordenadores, pasando por un largo etcétera, se debe a descubrimientos e invenciones de la física del siglo XX y (en un caso, el tubo de rayos catódicos) de finales del XIX: cristales líquidos (para pantallas), efecto fotoeléctrico (para tomavistas) o diodos y transistores. Hasta algo tan aparentemente alejado de la ciencia como la música ha recibido un importante impulso de la física del último siglo: los CD, cuya baratura y calidad para la reproducción musical han posibilitado un desarrollo espectacular de ésta, son posibles por el uso del laser y el transistor.

Indudablemente los últimos desarrollos deben ser considerados como beneficiosos; pero mucho más beneficiosos aún han sido los avances en biología y medicina hechos posibles por la ciencia física. Sin los microscopios de rayos X o los electrónicos, estos últimos basados en el comportamiento ondulatorio de la materia, el descubrimiento de la estructura del ADN, los estudios de virus o el desciframiento del genoma humano hubiesen sido imposibles.

Las aplicaciones directas de la física en medicina también son innumerables; mencionaré sólo dos avances en el estudio de la medicina interna basados en física del microcosmos. El primero son los escáner por resonancia magnética nuclear, a los que la un tanto absurda mala prensa de la palabra *nuclear* en la actualidad ha hecho que pasen a llamarse *resonancia magnética*, a secas. En estos análisis unos fuertes campos electromagnéticos interaccionan con el momento magnético de los núcleos de los átomos del paciente, permitiendo una detallada imagen de su interior.

El segundo método es la *tomografía de positrones*. Aquí se introduce (bucal o intravenosamente) un fluido, ligeramente radiactivo, en el paciente. Este fluido

⁷ La "llaneza" del universo constituye una de las indicaciones de existencia de la materia oscura, como ya hemos dicho; pero la existencia de la materia oscura no es suficiente para explicarla.

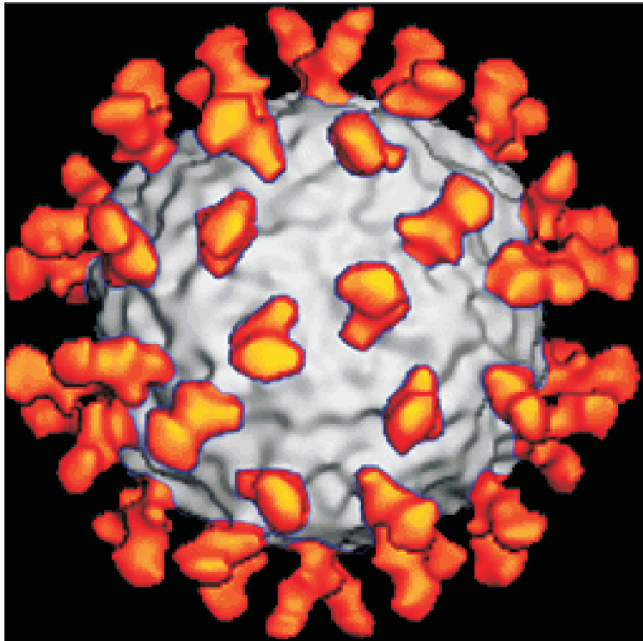


Figura 4. Imagen de un virus (conocido como *rhinovirus*) obtenida por medio de un microscopio electrónico. La calidad de la imagen depende no sólo del poder resolutorio del microscopio, sino de la técnica de enfriamiento instantáneo que congela al virus sin destruir su estructura, a diferencia de los métodos tradicionales químicos.

emite positrones (que son las antipartículas de los electrones) los que se aniquilan con los electrones de los átomos del paciente, emitiendo rayos gamma. Estos rayos son muy penetrantes y escapan del cuerpo del paciente prácticamente sin interactuar, siendo detectados en el exterior por unos aparatos conocidos como "cámaras de hilos", desarrollados originalmente por el franco-polaco Charpak para experimentos de física de partículas. Sin duda este es el método menos invasor y más preciso para explorar el interior del cuerpo humano.

3.2. Retos para el siglo XXI

¿Qué retos nos quedan para el presente siglo? Sin ánimo, por supuesto, de ser exhaustivo, y también sin querer exagerar, vamos a citar algunos de los que depende en buen aparte el futuro de nuestra civilización tecnológica, y otros que proporcionarían un incremento en el bienestar individual.

En primer lugar tenemos el problema de la energía. No es probable que la energía fotovoltaica o fototérmica

ca sean más que parches en un mundo cada vez más voraz de energía. El petróleo, gas natural y carbón nos llevan a un peligroso calentamiento global y, además, es poco probable que duren el siglo. Nos queda pues la energía nuclear: la única posibilidad sería de resolver, a medio plazo, el problema energético. Pero la energía nuclear presenta sus propios problemas. Sería necesario desarrollar un método barato de desactivar los desechos radiactivos y, además tendríamos que perfeccionar los métodos existentes (muy peligrosos) para poder utilizar como combustible materiales tales como el torio; el uranio fisionable no existe en cantidad suficiente para durar mucho más que petróleo, gas natural y carbón. Este programa es, en mi opinión, el que tiene más posibilidades de ser realizable. En efecto, la *fusión* nuclear que es, en principio, el mejor método de todos para obtener energía nuclear (ya que emplea un material superabundante, el hidrógeno, y no deja molestos residuos radiactivos) no está claro que sea utilizable de forma controlada. La experiencia de casi cincuenta años de experimentos es bastante negativa. Sin embargo, es seguro que seguirá intentándose a lo largo del siglo XXI.

El problema energético, y también el de transporte, podrían recibir un importante impulso si se desarrollaran, a nivel industrial, materiales superconductores a altas temperaturas; algo que está ya comenzando a ocurrir. Esto, nos permitiría transporte de electricidad prácticamente sin pérdidas, trenes sin fricción y (quizás) campos magnéticos suficientemente intensos para lograr el confinamiento necesario para la fusión nuclear controlada.

El desarrollo de supercomputadores y, sobre todo, de ordenadores miniaturizados, a nivel del milímetro o menos, es sin duda posible. Tal vez gracias a ordenadores cuánticos, o a desarrollos menos esotéricos, me atrevería a profetizar un fuerte progreso tanto en potencia como en miniaturización de computadores. La potencia podría —quién sabe— llegar a permitirnos construir ordenadores *inteligentes*. Este es un tema muy controvertido; no voy a discutirlo más y paso, para terminar, a decir unas pocas palabras sobre mecanismos, en particular basados en ordenadores, miniaturizados, con aplicaciones en medicina.

Las guías de ondas, ya en la actualidad, permiten la transmisión de imágenes a través de hilos muy delga-

dos, e incluso realizar operaciones a través de microsensores con controles remotos. Pero no solo esto; estamos ya muy cerca de poder construir pequeños ingenios que se podrían introducir y mover, *autónomamente*, en el interior de un cuerpo humano para allí realizar todo tipo de labores. Desde limpieza del interior de las arterias hasta eliminación de coágulos y tumores. E incluso realizar una labor de monitorización, analizando el flujo sanguíneo e introduciendo las sustancias correctoras necesarias. A poca suerte e ingenio que tengan nuestros sucesores, la fructífera

colaboración de la física y la biología continuará viento en popa a lo largo del presente siglo.

NOTA BIBLIOGRÁFICA

El lector interesado puede encontrar más información sobre los temas tratados, así como más bibliografía, en el libro del autor *Electrones, neutrinos y quarks*, Ed. Crítica, 2001, de donde se han extractado las primeras partes de este artículo.