

CUARENTA AÑOS DE FISICA

C. SANCHEZ DEL RIO*

Han pasado cuarenta años desde la fundación de *THEORIA* y Miguel Sánchez-Mazas me pide que contribuya al número extraordinario que publica la revista con motivo de esta efemérides. Agradezco la invitación y acepto con gusto en homenaje a mi viejo amigo Miguel cuyo talento y tenacidad son el origen de la revista, su prestigio y su recreación tras un intervalo en el que demostró la firmeza de sus convicciones ante adversidades de las que no era responsable.

Estoy seguro de que la tolerancia del fundador y director de *THEORIA* admitirá que no me ciña al tema específico que me propuso sino a uno más amplio: lo ocurrido en la física durante los últimos cuarenta años. Más modestamente, me limitaré, en forma necesariamente muy breve, a entresacar de un bosque inmenso lo que a mí me parece más importante.

Dado el carácter teórico de esta revista es importante señalar que nada comparable a las grandes revoluciones -relatividad y teoría cuántica- del primer tercio de esta siglo ha aparecido durante el período al que me refiero en este artículo. Tal vez una excepción sea el caos determinista que tiene importancia filosófica como corrección a un error que ha durado doscientos años.

A pesar de lo anterior, lo conseguido durante los últimos cuarenta años es mucho y variado. No en vano el esfuerzo en investigación -tanto en recursos humanos como económicos- es el mayor de toda la historia. Para mostrar adecuadamente los éxitos de la física en estos años me referiré en primer lugar a los avances en la física propiamente dicha y después haré algunos comentarios sobre los importantísimos adelantos técnicos muy directamente relacionados con la física.

En cuanto a los avances científicos quedan, en su mayor parte, englobados en tres grandes áreas relativas a lo muy pequeño, a lo muy grande y a lo muy complicado.

Empecemos por lo muy pequeño. Nuestro conocimiento de los átomos queda perfilado en líneas generales en los años veinte aunque el interés por la física atómica ha revivido en los últimos lustros porque nuevas técnicas permiten experimentos impensables hace unas décadas y los resultados que se obtienen tienen interés por sus aplicaciones prácticas (en plasmas y otras cosas) y en astrofísica. En cuanto a los núcleos atómicos se realizó su estudio sistemático y exhaustivo en las décadas de los treinta y los cuarenta con vistas a sus aplicaciones. La teoría del núcleo es más floja pero preveo un despertar del interés por la física nuclear cuando conozcamos de modo completo la interacción fuerte.

El conocimiento de esta interacción así como la interacción débil se está consiguiendo mediante el estudio de las partículas subnucleares. Esta novedosa parte de la física llamada por unos en física de partículas y por otros física de altas energías ha progresado de modo espectacular en los últimos decenios. Enormes

sincrotrones y anillos de almacenamiento unidos a cámaras de burbujas y de chispas y otros detectores y todo ello conjuntado con gigantescos computadores han permitido descubrir centenares de partículas de vida efímera y estudiar sus interacciones.

Se ha conseguido también su clasificación teniendo en cuenta su carga eléctrica, masa y nuevos atributos tales como la paridad, el isospin y la hipercarga. Esta clasificación junto a inteligentes propuestas teóricas nos permite hasta ahora afirmar que todas las partículas se reducen a los leptones (de las cuales hay seis) y a los hadrones (mesones y bariones) que son combinación de seis quarks diferentes. Estos doce elementos básicos se clasifican en tres generaciones de las cuales sólo la primera aparece en la materia estable que vemos y palpamos; esta materia está constituida por el electrón en su neutrino y por los quarks u y d que forman los protones y neutrones.

Las interacciones entre las partículas son de tres clases: electromagnética, débil y fuerte. La cuarta interacción fundamental que es la gravitación no interviene en los procesos que aparecen en la física de altas energías porque las partículas son muy livianas. La interacción electromagnética ocurre por intercambio de fotones y quedó aclarada al final de los años cuarenta cuando se formuló la electrodinámica cuántica en forma covariante y se descubrió el método de la renormalización. Las otras dos interacciones permanecieron misteriosas hasta que se descubrió que el éxito de la electrodinámica cuántica se basa en que es una teoría invariante gauge. Con este requisito se desarrolló con éxito un modelo electrodébil que incorpora la interacción electromagnética mediada por fotones y la débil mediada por bosones masivos que se han detectado. En la misma línea se ha desarrollado la llamada cromodinámica cuántica para describir la interacción fuerte entre quarks que ocurre por intercambio de gluones; esta teoría permite calcular muchos (aunque no todos) procesos debidos a la interacción fuerte.

Están en proceso de desarrollo teorías más ambiciosas de gran unificación que englobarían a todas las interacciones incluyendo eventualmente hasta la gravitación. el ideal es conseguir una **teoría de todo** que se intenta construir a partir de un principio de supersimetría que pondría a los fermiones y a los bosones dentro de un mismo esquema. Parecen prometedores los intentos de teoría de supercuerdas y supermembranas pero es prematuro anticipar nada sobre el futuro de lo que hoy son solo elucubraciones.

En el área de lo muy grande, el universo, se han alcanzado progresos muy notables tanto en astrofísica como en cosmología. Los nuevos descubrimientos son fruto de nuevos sistemas de observación muy elaborados como son los modernos telescopios ópticos y los radiotelescopios. Además la instalación de estos instrumentos en satélites artificiales permite observar todas las radiaciones para las cuales la atmósfera terrestre es opaca. No es preciso añadir que todas estas técnicas no serían posibles sin los progresos en telecomunicaciones y métodos de computación de las últimas décadas.

CUARENTA AÑOS DE FISICA

Con ayuda de estos nuevos instrumentos hemos conseguido una visión más completa de nuestra galaxia, de las galaxias del grupo local y de las muy lejanas. También se han observado supernovas, infrecuentes en cada galaxia, y se han detectado los neutrinos que se emiten en el proceso. Nuestros potentes instrumentos nos permiten llegar a los confines del universo en expansión y observar objetos antiquísimos como los cuásares. La radioastronomía nos ha proporcionado información muy importante sobre el universo no visible. En primer lugar se han descubierto los púlsares que interpretamos como estrellas de neutrones. En segundo lugar tenemos la radiación de fondo correspondiente a un cuerpo negro a la temperatura de 3 kelvin; las inhomogeneidades de este fondo (resto fósil del origen del universo) son un descubrimiento recentísimo que esclarece el proceso de formación de las galaxias.

Considerado el universo a gran escala, la gravitación es el más importante de las interacciones. Por eso ha renacido en los últimos lustros el interés por la relatividad general que se ha revelado como la mejor teoría de la gravitación; además nuevos experimentos han comprobado la validez de la teoría. Una predicción de la relatividad general son las ondas gravitacionales que no se han detectado directamente aunque la pérdida de energía de algunas estrellas dobles parece probar su existencia. Otra predicción es la existencia de agujeros negros como resultado final de la evolución de algunas estrellas muy masivas; son objetos invisibles pero se espera encontrar alguno acompañado a una estrella visible.

Estos y otros conocimientos han dado nuevo impulso a la cosmología que trata de describir el origen y evolución del universo. Hoy se admite generalmente que el universo surgió como una Gran Explosión hace unos quince mil millones de años. Las energías de los procesos que ocurrieron al principio debieron ser altísimas y por eso pensamos que tales procesos debieron ser parecidos a los que estudiamos en la física de altas energías. Esta conexión entre el origen del universo y la física de partículas ha permitido aplicar las teorías de gran unificación a los primeros instantes. La evolución inmediatamente después se describe mediante modelos cosmológicos del tipo de universo inflacionario.

En todos estos estudios queda un problema pendiente desde hace mucho más de cuarenta años. Usamos para unas cosas la relatividad general y para otras la teoría cuántica. Y el caso es que nadie sabe como compaginar ambas doctrinas. A pesar de ello hay quienes trabajan en campos como la supergravedad y la cosmología cuántica.

Pasemos ahora al área de lo muy complicado. Sabemos que los átomos se combinan para formar moléculas y que las moléculas o los átomos directamente se asocian para dar lugar a gases, líquidos o sólidos. Estos cuerpos que son los que manejamos a nuestra escala presentan propiedades que no se deducen obviamente de las propiedades de los átomos constituyentes. Son propiedades emergentes que resultan de fenómenos cooperativos cuya descripción puede ser de enorme complejidad.

Tan complejos pueden ser los fenómenos que a veces cuando creemos haberlos comprendido aparecen sorpresas. Tal es el caso de la superconductividad bien

descrita por la teoría CBS para los metales pero inaplicable a los nuevos materiales superconductores a alta temperatura.

Durante el período al cual nos referimos se han descubierto nuevos fenómenos como los efectos Josephson y Hall cuántico con importantes aplicaciones. En el dominio teórico conviene destacar los estudios de las transiciones de fase mediante el grupo de renormalización.

En otro orden de cosas, y a partir de la termodinámica de procesos irreversibles, es muy interesante lo conseguido en el estudio de fenómenos autoorganizativos espontáneos en sistemas lejos de equilibrio. Por primera vez vislumbramos fenómenos físicos que tienen parecido con lo que se observa todos los días en los seres vivos.

En cuanto a su impacto epistemológico el descubrimiento más importante de las últimas décadas es el caos determinista. Gracias al uso de computadoras se ha comprobado que las ecuaciones clásicas de sistemas mecánicos complicados no permiten predecir el futuro porque dichas ecuaciones diferenciales (en general no lineales) son sumamente sensibles a las condiciones iniciales. En muchos otros sistemas estudiados el comportamiento es muy pronto caótico y su representación en el espacio de las fases conduce a atractores que son fractales. Esta dinámica caótica se va viendo que a largo plazo es la regla y no la excepción; la excepción son los sistemas dinámicos idealizados lineales en que se basó hace doscientos años la creencia en el determinismo.

Además de las tres grandes áreas en que he clasificado los descubrimientos y nuevas ideas que he reseñado brevemente hay otros avances importantes ocurridos durante las cuatro últimas décadas que podríamos añadir en un capítulo de varios. Entre estos avances, lo que pienso que han tenido más impacto en otras ramas de la ciencia y la técnica son los siguientes.

En primer lugar mencionaré la resonancia magnética nuclear. Inicialmente fue un método experimental cuyo modesto objetivo era medir los momentos magnéticos de los núcleos atómicos. Pronto se convirtió en herramienta fundamental de los químicos orgánicos y más recientemente se aprovecha el fenómeno para reconstruir imágenes internas del cuerpo humano con ayuda de un computador; es por eso un excelente método no agresivo para el diagnóstico clínico.

Después querría referirme al aspecto Mössbauer que ha resultado muy útil en estudios de física del estado sólido y que ha permitido comprobar en el campo gravitacional terrestre el desplazamiento hacia el rojo predicho por la teoría de la relatividad general.

Tampoco puede ignorarse la invención del láser hace treinta años. Sus aplicaciones van desde el mundo del espectáculo hasta el armamento pasando por la investigación, la medicina y la industria.

Más recientemente se han desarrollado los microscopios de barrido sea por efecto túnel, por fuerza atómica o por otros principios. Suponen el mayor avance en microscopía desde el microscopio electrónico de los años treinta.

CUARENTA AÑOS DE FISICA

Finalmente conviene recordar un tema aparentemente modesto pero importante desde el punto de vista práctico: la metrología. Nuevas técnicas, como los relojes atómicos por ejemplo, permiten medidas de sorprendente precisión. El establecimiento del sistema internacional de unidades (SI) adoptado legalmente en casi todos los países es también un hito del período que estoy recordando.

Pasemos ahora a los adelantos técnicos muy relacionados con la física. Solo me referiré y muy someramente a tres dominios: energía nuclear, tecnología espacial y computadores.

En cuanto a la energía nuclear su trayectoria a lo largo de los últimos cuarenta años es digna de estudio sociológico. Al principio se recibió la posibilidad de esta nueva fuente de energía, que se pensaba abundante y barata, como un nuevo maná que abría la puerta de una era feliz: la era atómica. Superadas las dificultades técnicas, se construyeron centrales nucleares precomerciales para la producción de energía eléctrica al final de la década de los cincuenta. Diez años después se tenían centrales nucleares a base de uranio económicamente competitivas que han funcionado bien hasta hoy. Después, y por razones oscuras, aparecieron los movimientos ecologistas que concentraron su oposición a la energía nuclear ignorando el resto de los problemas ecológicos creados por nuestra sociedad industrial. Los políticos hicieron el resto. En unos países como en Suecia la derecha se declaró antinuclear. En España fue la izquierda. En Italia, como los políticos son tan listos, todos los partidos son antinucleares. Y mientras esto sucedía se han seguido construyendo centrales nucleares a gran ritmo en Francia y en Japón. Ha disminuido el programa nuclear de otros países y se ha detenido -dejando incluso centrales sin terminar- en España. Lo ocurrido queda fuera de la lógica ordinaria.

También hace cuarenta años se veía con esperanza la posibilidad de obtener energía nuclear abundante, barata y limpia mediante la fusión de núcleos ligeros. Hasta ahora no se ha podido probar que ello sea posible ni por confinamiento magnético ni por confinamiento inercial de plasmas. Cuando se consiga demostrar la posibilidad habrá que resolver arduos problemas técnicos durante muchos años.

La tecnología espacial es otro de los avances de la época que estoy recordando. A finales de los cincuenta se puso en órbita el primer satélite artificial; fue un éxito de la tecnología soviética que cogió por sorpresa al mundo occidental. Estábamos en plena guerra fría y el impacto fue enorme. El público menos versado en cuestiones científicas y técnicas interpretó el hecho como una muestra de que los países socialistas avanzaban más deprisa que los capitalistas. Los norteamericanos reaccionaron y comenzó la carrera espacial. Una docena de años después los norteamericanos pusieron el primer hombre en la Luna que regresó a salvo a la Tierra. Los soviéticos habían perdido el desafío.

Ambos bandos disponían de cohetes semejantes; incluso eran más potentes los cohetes soviéticos. La victoria norteamericana se debió a su aplastante superioridad en electrónica. La carrera espacial supuso un desarrollo increíble en circuitería miniaturizada y segura. Los sistemas electrónicos que ahora usamos deben mucho al

esfuerzo que se puso entonces en el campo de la electrónica entendiendo este en sentido amplio, es decir, incluyendo los computadores y la robótica.

Como resultado de los avances en tecnología espacial disponemos ahora de un conjunto de satélites de telecomunicación que cubre todo el planeta y que permite la transmisión de todo clase de manejos y datos. Sería muy difícil y muy costoso conseguir lo mismo sin satélites. Otro resultado de la tecnología espacial son los satélites de observación. Desarrollados inicialmente con fines militares han resultado después de utilidad para fines no bélicos como son la identificación de fuentes de materias primas o el control de cambios climáticos.

Finalmente unas palabras sobre los computadores que ciertamente ya existían hace cuarenta años. Pero eran válvulas, consumían mucha energía, eran inseguros y difíciles de programar; por eso sus aplicaciones eran muy limitadas. Todo cambia con la aparición del primer computador transistorizado a mediados de los cincuenta. Nueva revolución hace veinte años cuando se fabrica el primer microprocesador de 4 bits; diez años después se dispone de microprocesadores de 32 bits. Además los circuitos son cada vez más rápidos y baratos.

Al mismo tiempo y al mismo ritmo se desarrollan los métodos de programación. A partir de los penosos métodos iniciales van apareciendo lenguajes de alto nivel cada vez más potentes y más sencillos de aprender.

Como resultado de estos adelantos disponemos ahora de una gama de computadoras que va desde los gigantes para aplicaciones especiales hasta los ordenadores personales que se compran en los grandes almacenes a precios que disminuyen de año en año. El material informático es el único producto de nuestro sistema económico que baja de precio en lugar de subir.

Las consecuencias de esta historia están a la vista de todos. La informática está presente en la administración, en la industria, en los servicios y en casi cualquier actividad que se nos ocurra. Es la segunda revolución industrial que está cambiando nuestras vidas tanto como lo hizo la primera. Y todo ha surgido de una aplicación inteligente de los conocimientos que nos proporciona la física. A principios de este siglo se sabía muy poco de la estructura de la materia. A finales, lo suficiente para cambiar radicalmente la vida en las sociedades industriales.

Por último y como conclusiones del esbozo que he presentado sobre la física de los últimos cuarenta años proceden algunos comentarios.

A partir de la última guerra la investigación científica que desde el siglo XVII se basaba en la iniciativa individual pasó a ser de iniciativa social. Los gobiernos y las grandes empresas dedicaron sumas muy importantes a la investigación científica que dio lugar a una expansión en el número de investigadores y en las publicaciones científicas como nunca se había visto antes. Como es natural al aumentar la cantidad bajó la calidad en promedio pero muchos pocos hacen un mucho y el resultado ha sido espectacular en todas las ciencias y técnicas.

Por lo que se refiere a la física hemos presenciado una explosión de avances de inmediata aplicación que superan ampliamente las esperanzas que se tuvieron hace medio siglo. Estos avances han contribuido sustancialmente a nuestro bienestar por

CUARENTA AÑOS DE FISICA

su incidencia en casi todos los aspectos de nuestra vida desde la salud hasta la más innecesaria de las comodidades. Que con ello los hombres seamos más felices es otro asunto que no voy a analizar aquí.

Pero la física tradicionalmente no nos ha proporcionado solo conocimientos que pudieran aplicarse con fines prácticos.

La física ha suministrado también abundantes datos para filosofar sobre el mundo material. Los fenómenos que observamos a nuestro alrededor son raros para una mente inquisitiva. Y una de las inclinaciones de los hombres de todos los tiempos ha sido meditar sobre lo que conocemos para tratar de comprender los misterios que nos rodean. Y en este sentido los avances en física durante las últimas décadas proporcionan nuevos datos para la meditación filosófica. Pero, en mi opinión, ha habido menos novedades de interés que en el gran siglo XIX y el primer tercio de éste. De todos modos como la física no es ciencia terminada hay fundadas razones para esperar que pronto aparezcan nuevas ideas que nos permitan seguir penetrando en el enigma de la naturaleza.

*** Real Academia de Ciencias
Colegio Libre de Eméritos, Madrid.**