

Física de Altas Energías y Gran Ciencia

Luis Álvarez-Gaumé

Arbor CLIX, 626 (Febrero 1998), 185-192 pp.

Para adquirir datos experimentales en la FAE, es necesario dotarse de enormes y costosas instalaciones, de las que el laboratorio europeo CERN en Ginebra es un ejemplo paradigmático. Sobre el papel y la necesidad de la «gran ciencia» se hilan unas reflexiones en esta contribución. El autor es precisamente uno de los dos españoles que trabajan permanentemente en la división de Física Teórica del CERN.

Durante la última década, y sobre todo desde que terminó la guerra fría, la actitud de algunas agencias gubernamentales responsables de financiar la investigación en occidente se hace cada vez mas crítica con toda investigación cuya finalidad no sean las aplicaciones prácticas a corto plazo. Contrasta esta actitud con la mantenida por algunos países, como Japón, que ha duplicado recientemente sus inversiones en investigación básica.

Parece haber enraizado en el juicio y decisiones de muchos responsables de la política científica la opinión según la cual, en época de crisis, nuestra sociedad no debe financiar proyectos motivados por la curiosidad de comprender la Naturaleza (*curiosity-driven research*, por emplear la expresión supuestamente peyorativa de unas recientes recomendaciones estadounidenses [BUSCO CITA PRECISA]).

Un ejemplo reciente en la citada dirección ha sido el gran acelerador SSC (Superconducting Super-Collider) en el estado de Tejas, que fue cancelado por el congreso norteamericano cuando ya iban invertidos más de mil millones de dólares. Mas recientemente su competidor europeo, el LHC (Large Hadron Collider) que deberá entrar en funcionamiento en el CERN (Centro Europeo de Física de Partículas, cerca de Ginebra) en el año 2005 ha sido finalmente aprobado después de un largo proceso de escrutinio y control. Aprobado por los pelos, es decir, con un acompañamiento de medidas restrictivas —como la parálisis de la investigación en el CERN durante un lustro— cuyas consecuencias se harán sentir.

El apoyo o la crítica a proyectos de gran envergadura, en una u otra rama de la ciencia, debe hacerse desde una perspectiva general que permita también valorar la importancia de los aspectos culturales, tecnológicos y económicos que la ciencia básica pueda tener. En los párrafos que siguen esbozaremos algunas de las razones que se utilizan (al menos entre científicos) para justificar la investigación fundamental.

Ciencia Básica

La especie humana se distingue de otras, entre otras pocas razones, por su capacidad de utilizar la naturaleza en su propio beneficio. Para utilizarla, debe comprenderla, y para comprenderla debe investigarla. La inteligencia ayudó (probablemente) a nuestros ancestros del paleolítico a sobrevivir en un medio adverso, e ir progresivamente controlando su entorno en beneficio propio. En las últimas décadas hemos aprendido también a destruir el medio ambiente con eficacia creciente (entre otros, obvios ejemplos son, sin duda, los residuos radiactivos, principalmente los militares, el problema más acuciante). Cabe esperar que la razón y la investigación nos ayuden a salir del considerable entuerto de convertir el planeta en un lugar literalmente inhabitable.

No sólo los científicos comparten los beneficios de la ciencia o la responsabilidad de sus fechorías. Y, no sólo por esto, opinamos que a toda persona culta las motivaciones para comprender el Universo en que vivimos deben parecerle de una evidencia palmaria. Dicho sea admitiendo el riesgo de adoptar posturas corporativistas (hay también quien, más arrogantemente, pretende que la distinción medieval entre personajes cultos —letrados— y analfabetos ha dejado paso a la distinción actual: cultos o analgebraicos).

Puede definirse una ciencia como básica si las respuestas a las preguntas que en un cierto momento plantea se encuentran fuera del esquema que permite formularlas (son «mas fundamentales»). Aunque daremos luego un ejemplo, es fácil encontrar contraejemplos.

En la realidad práctica, la investigación básica es aquella cuyos resultados no pueden patentarse. El cálculo diferencial, las leyes de la gravitación, o de la evolución de las especies, el electromagnetismo, la síntesis de la urea, la teoría de la relatividad, la mecánica cuántica, la doble hélice, la geometría no euclidiana, o el modelo estándar de las partículas elementales no tienen quien cobre derechos de autor. A pesar de que las motivaciones de los respectivos autores no fuesen «prácticas», muchos de estos desarrollos han tenido posteriormente aplicaciones que han revolucionado la sociedad. Sobre ellos se basa una gran parte del producto nacional bruto de los países mas avanzados. Las teorías de la gravitación y el electromagnetismo y, menos obviamente, la mecánica cuántica, son necesarias para construir un satélite de televisión digital. No sería muy coherente intentar controlar este medio sin contribuir con igual empeño a investigaciones como las que lo hicieron posible, por dar un ejemplo a boleo.

Hay en la ciencia básica una sana tendencia al reduccionismo. Se pretende obtener un conjunto de leyes y conceptos fundamentales que permitan comprender la enorme diversidad de comportamientos que encontramos en la Naturaleza, tan parca en sus principios como rica en estructuras. Pero nadie en su sano juicio llevaría el reduccionismo hasta pretender, por ejemplo, explicar el comportamiento del clima o de una simple célula en términos de las ecuaciones de la Mecánica Cuántica que describen el movimiento y las interacciones de los electrones y núcleos que los forman. Al aumentar de tamaño y complejidad, el comportamiento cualitativo de la materia puede cambiar de forma tan drástica que no somos capaces (y quizás nunca lo seamos) de leer este comportamiento detallado directamente de la descripción microscópica del sistema en cuestión. De ahí que la química y la biología sean tan «básicas» como la física fundamental, sin que sea esto un juicio de valor sobre las ciencias que no citamos.

Hacia el summum de la ignorancia

El lenguaje adecuado a la expresión de las leyes básicas de la Naturaleza es la llamada *teoría cuántica de campos*, uno de los logros intelectuales más importantes del siglo XX. Este lenguaje unifica la

relatividad «restringida» con la mecánica cuántica y constituye el instrumento de comprensión más fundamental del comportamiento de la materia. «Instrumento» o «lenguaje» en el sentido de que hay que completarlo con un contenido y unos detalles concretos, que van precisándose con el aumento de nuestros conocimientos. Los detalles, hoy en día, los proporcionan la teoría de la relatividad «general» (o de la fuerza o interacción gravitacional) y el modelo estandar del resto de las interacciones (fuertes, electromagnéticas y débiles).

La ventaja adicional de escribir las leyes fundamentales en términos tan sucintos es que al mismo tiempo nos proporcionan una visión clara y precisa de la profundidad de nuestra ignorancia; una parte importante de la investigación actual en Altas Energías está destinada justamente a intentar explicar y aclarar los múltiples ángulos oscuros del Modelo Estándar. Para poder explicar nuestra falta de conocimiento, podemos resumir brevemente los ingredientes elementales que constituyen este modelo.

En el Modelo Estándar, se pueden distinguir dos tipos básicos de partículas, los fermiones y los bosones. Los fermiones son los que componen la materia que observamos, y los bosones son responsables de las fuerzas observadas y, en general, de la masa de las partículas elementales. Hasta ahora sólo hay cuatro fuerzas conocidas. El Modelo Estándar se ocupa fundamentalmente de las fuerzas electromagnéticas, débiles y fuertes, pero no hay que olvidar una cuarta fuerza, la primera conocida, que es la gravedad y que todavía escapa a una descripción coherente dentro del marco de la teoría de campos.

Los fermiones se dividen a su vez en quarks y leptones. Los quarks son partículas que sienten todas las interacciones fundamentales: la fuerte responsable de las fuerzas nucleares, la electromagnética responsable de la totalidad de las propiedades químicas de la materia, y la débil, responsable de muchos canales de desintegración de los núcleos. Los leptones son sólo sensibles a las interacciones débiles y electromagnéticas. La primera sorpresa con la que la Naturaleza nos presenta es con el hecho de que los quarks y leptones forman tres familias, que se diferencian única y exclusivamente por la masa de sus constituyentes.

La primera familia está compuesta por dos quarks *u*, *d*, conocidos a veces por «up y down», el electrón y su neutrino asociado, una partícula

que por lo que sabemos tiene masa nula, y con carga eléctrica cero, con lo cual sólo interacciona débilmente. Esta partícula es tan elusiva, que un neutrino típico producido en un reactor nuclear podría atravesar el espesor equivalente de miles de kilómetros de materia antes de dignarse a interaccionar con alguno de los núcleos que se encuentran en su camino. A pesar de la debilidad de su interacción, el neutrino juega un papel fundamental en la explicación de la estructura estelar y de las supernovas. Los quarks u , d forman los protones y neutrones de los que están compuestos todos los núcleos. Éstos, junto con el electrón, forman los átomos, y así son los constituyentes de toda la materia observada.

Los bosones del Modelo Estándar son las partículas responsables de la propagación de las interacciones y de generar la masa. La partícula responsable de la interacción electromagnética se conoce como el fotón, la interacción fuerte está asociada a ocho análogos del fotón conocidos como gluones, y finalmente, las interacciones débiles se transmiten por medio de los bosones intermedios W^\pm , Z^0 , que pesan cerca de cien veces más que un protón.

Todas las partículas descritas hasta ahora han sido observadas. La última y hasta ahora más elusiva partícula del Modelo Estándar, es el denominado bosón de Higgs, con espín cero, y masa hasta ahora desconocida. Que más da una partícula más o menos?, se preguntarán algunos de los lectores. El problema es que sin esta partícula no podemos entender el origen de la masa. Éste, junto con el problema íntimamente ligado de la estructura de familias descrita anteriormente son dos de los misterios más profundos del Modelo Estándar. La descripción detallada del modelo en términos de una teoría de campos nos da simultáneamente nuestro grado de comprensión de la naturaleza a nivel básico, pero también las deficiencias de este conocimiento. El origen de los diferentes parámetros (masas constantes de interacción...) que aparecen en la teoría proporcionan este doble conocimiento de manera extraordinariamente sucinta.

A pesar de los términos abstractos en los que hemos descrito el Modelo Estándar, nos permite dar una explicación detallada de una infinidad de fenómenos que incluyen la Física Atómica y Nuclear, la estructura estelar, la formación de los elementos en el universo primitivo, y un larguísimo etcétera. Gran parte de los ingredientes del modelo se han obtenido a través del uso de aceleradores de partículas en los últimos cincuenta años con energías y luminosidades crecientes. En la actualidad para poder responder a las preguntas que se plantean naturalmente en el Modelo Estándar y en sus posibles extensiones,

es necesario utilizar una máquina de mayores proporciones que las construidas hasta ahora. Este nuevo acelerador se conoce como el LHC, y al igual que con los más recientes aceleradores, entramos en el reino de la Gran Ciencia, los proyectos multinacionales dada su carestía y la cantidad de científicos e ingenieros que participan en ellos. El precio aproximado del LHC es de tres mil millones de francos suizos, sin contar con el precio de todas las instalaciones necesarias para explotarlo, y que afortunadamente ya están construidas y en funcionamiento en el CERN, todo esto con dinero público. Muchos a estas alturas se harán la pregunta:

Y todo esto ¿para qué?

Hasta este momento hemos evitado esta pregunta a base de hacer una exposición del sistema del mundo tal y como lo entendemos en la actualidad. Ha llegado el momento de dar respuestas que no competen solamente a la ciencia, y que deben también cifrarse en términos de retornos industriales, culturales y económicos.

La investigación básica es una excelente inversión a largo plazo. Basta con considerar la producción industrial en los países desarrollados para darse cuenta que una buena parte es consecuencia de lo que en otras épocas se consideró exclusivamente como ciencia básica y generalmente alejada de problemas prácticos. Los ejemplos abundan. La Mecánica Cuántica en sus orígenes intentaba explicar propiedades paradójicas de la materia que poco o nada tenían que ver con aplicaciones prácticas en esa época. En particular, algunos de los problemas fundamentales eran: por qué el átomo clásico es estable, cuando las leyes del electromagnetismo clásico implicaban que cualquier partícula cargada (como el electrón) que girara alrededor de un núcleo perdería energía por radiación y así disminuiría su órbita hasta caer en el núcleo, o cuál es el origen del espectro discreto de emisión por diferentes materiales cuando se les calienta suficientemente para que emitan luz y se hace pasar esta luz por un prisma de difracción, o cuál es el origen de la radiación del cuerpo negro, o por qué ciertos metales emiten electrones cuando se les ilumina con luz de determinadas frecuencias (efecto fotoeléctrico), ... Cuando a finales de los años veinte se formuló la Teoría Cuántica, no sólo adquirimos una comprensión profunda de la materia, sino que también ha tenido aplicaciones industriales del más variado tipo: láseres, máseres, el transistor, ha revolucionado la química y la electrónica, y no es fácil encontrar procesos

industriales hoy en día que no hayan heredado de una u otra forma elementos cruciales de la Mecánica Cuántica. Si a esto le añadimos las investigaciones básicas del siglo pasado sobre electromagnetismo, ondas electromagnéticas, termodinámica y teoría del calor nos encontraremos con que una gran parte del producto nacional bruto en muchos países es consecuencia de las modestas inversiones hechas en ciencia básica en los últimos doscientos años. A veces las consecuencias industriales sucedieron con mayor rapidez, como en el caso de la fisión nuclear. Entre su descubrimiento y la construcción del primer reactor nuclear pasaron solamente tres años. En otras ocasiones el intervalo de tiempo puede ser mas grande, por ejemplo, la superconductividad fue descubierta a principios de este siglo, y hasta ahora las aplicaciones industriales son relativamente escasas, aunque la situación puede cambiar drásticamente cuando se entienda el mecanismo de superconducción a altas temperaturas.

Si volvemos a los grandes aceleradores de partículas, nos encontramos con que también han tenido un impacto tecnológico no despreciable, se pueden citar contribuciones que van desde la geodesia hasta la terapia hadrónica y tomografía de positrones, pasando por la superconductividad, la criogenia, alto vacío, electrónica rápida, robótica y manipulación a distancia, fuentes de alimentación de alta potencia, transmisión y tratamiento de datos.... Cabe citar aquí el hecho de que el World-Wide-Web (WWW), la red de comunicaciones que ha revolucionado el Internet y la comunicación entre ordenadores fue inventado en el CERN por Tim Berners-Lee y Robert Cailliau. El lenguaje que crearon (HTML, o hypertext markup language) que es de dominio público estaba pensado para facilitar la transmisión de datos entre los miembros de un mismo experimento, cuyo número es cada vez mayor, y en la que participan instituciones diseminadas por todo el mundo. El desarrollo de este lenguaje y la facilidad de uso han revolucionado completamente el mundo de la comunicación, y pronto también el de la publicación de textos o imágenes. Es posible que en un futuro no muy lejano, la noción de bibliotecas tradicionales, e incluso la de libros impresos en papel y difundidos por librerías sean cosas del pasado. La aldea global de Marshall Macluhan está aquí, pero de una forma muy distinta de como él la imaginó.

Es probablemente cierto que la mayoría de los físicos que trabajan en la construcción y estudios relacionados con el LHC estén esencialmente motivados por despejar los interrogantes del Modelo Estándar y averiguar qué sucede a energías aún mayores. La fascinación que produce la comprensión del origen de la masa, el estudio del universo

primitivo poco después del Big Bang, por qué el Universo es tan grande, o por qué tiene la estructura que observamos, o cuál es la estructura cuántica del espacio-tiempo, como la gravitación cuántica resuelve el problema de las singularidades que se esconden detrás de los horizontes de sucesos de los agujeros negros, etc. es irresistible, y cada vez tenemos más evidencia de que las respuestas a muchos de estos interrogantes se encuentran escondidas en los aspectos que hasta ahora no hemos podido explorar experimentalmente en el Modelo Estándar, pero que se podrá hacer utilizando el LHC y máquinas similares. Para muchos de los ingenieros y técnicos de las industrias que colaboran en la construcción de la maquina, el proyecto presenta una oportunidad única de aunar esfuerzos para resolver problemas técnicos de primera magnitud, y es de esperar que (como ha sido el caso en el pasado) tenga consecuencias prácticas en la innovación tecnológica de primera magnitud. El caso de la invención del WWW es ya un ejemplo claro.

Hay también un impacto que es difícil de exagerar, y que está relacionado con la riqueza cultural, educativa e intelectual que la investigación básica proporciona. Las universidades que se han distinguido por la calidad de su enseñanza son casi siempre aquellas en las que se desarrollan programas de investigación de calidad. Este ambiente genera y estimula la creatividad de las nuevas generaciones de científicos e ingenieros que pueden ir transformando áreas enteras de la actividad industrial.

El público siente con frecuencia fascinación por las grandes exploraciones, y por los desafíos científicos. Hemos intentado explicar en estas breves páginas por qué la ciencia básica es una actividad fascinante y rentable (a corto o largo plazo). Sería deseable que entre los lectores de este artículo se encuentren algunos de los responsables de la financiación de los grandes proyectos científicos, y que se les haya pegado algo el entusiasmo por las empresas que pretenden responder a los grandes interrogantes que permanecen abiertos en nuestro conocimiento de la Naturaleza.

Agradecimientos: Es un placer agradecer al Profesor A. De Rújula su interés y cooperación en este artículo. Sus sugerencias y contribuciones han mejorado sin duda su contenido y presentación.