La Física Experimental de Altas Energías

Enrique Fernández

Arbor CLIX, 626 (Febrero 1998), 205-214 pp.

A mediados de los 70 existía en España una base científica razonable (para nuestros standards) en Física Teórica. La estructura era, sin embargo, muy precaria. En este artículo se intenta explicar la evolución de la comunidad experimental, con dinámica y problemas específicos, relacionados muchos de ellos con la dificultad para contratar técnicos e ingenieros en la Universidad, y con la falta de «tamaño crítico» de muchos de los grupos de investigación existentes en la actualidad.

El objetivo de la Física de Partículas, o Física de Altas Enegías, es entender la estructura de la materia al nivel más fundamental posible, lo cual conlleva el estudio de sus constituyentes elementales y el de las interacciones entre los mismos. El comienzo de esta ciencia suele situarse hace ahora un siglo, en el año 1897, en el que se descubrió el electrón.

Los electrones forman parte de los átomos de los elemento químicos. Los átomos se agrupan en moléculas y los agregados de moléculas constituyen las substancias que forman nuestro entorno. En este entorno, y en nosotros mismos, se producen constantemente reacciones químicas, en las que los átomos se reagrupan en unas u otras moléculas, pero, haciendo honor a su nombre, se mantienen indivisibles. Sin embargo, ya a comienzos del siglo, se llegó a la conclusión de que los

(C) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://arbor.revistas.csic.es

átomos no eran objetos elementales. Experimentos realizados en los años diez mostraron que los átomos estaban formados por un núcleo masivo, muy pequeño con relación al tamaño del átomo, y por electrones, moviéndose en órbitas alrededor del núcleo. En los años treinta, tras el descubrimiento del neutrón, se llegó a enterder la estructura del núcleo tal como lo entendemos hoy, es decir, formado por protones y neutrones. Experimentos llevados a cabo en los años setenta pusieron de manifiesto que protones y neutrones tampoco eran elementales, sino constituidos por entidades llamadas quarks, el protón por dos quarks *u* (del inglés, «up») y uno *d* (de «down»), y el neutrón por dos quarks *d y* uno *u*. Por lo que sabemos hoy, los quarks, y el electrón, son partículas sin estructura (propiamente partículas elementales).

¿Qué fuerza (o qué tipo de interación) mantiene unidas a unas moléculas con otras en los substancias químicas? ¿Qué mantiene unidos a los electrones con los núcleos en los átomos? ¿Y a protones y neutrones en los núcleos? ¿Y a los quarks en protones y neutrones? La respuesta a las dos primeras preguntas es que la interacción responsable es la electromagnética, mientras que en los dos últimos casos es la interacción fuerte. Estas dos interacciones, junto con la interacción gravitatoria, asociada a la masa de los entes interaccionantes, y la interacción débil, responsable por ejemplo de algunas desintegraciones nucleares, son, por lo que sabemos hoy, las únicas interacciones fundamentales que ocurren en la naturaleza.

La interacción electromagnética está asociada a la carga eléctrica, la cual es de dos tipos: positiva y negativa. A nivel macroscópico cargas iguales se repelen y cargas opuestas se atraen. La atracción, o repulsión, disminuye con el cuadrado de la distancia, pero tiene un alcance macroscópico y es por eso por lo que tenemos una imagen intuitiva de la misma. La ley del cuadrado de la distancia de la fuerza eléctrica, y otras propiedades de la interacción, fueron formuladas por Maxwell en 1865. En esta formulación los fenómenos eléctricos y magnéticos, considerados hasta entonces como distintos, se describen de forma unificada: la fuerza magnética está asociada a cargas eléctricas en movimiento. De ahí que hablemos de interacción electromagnética. La formulación de Maxwell (o leyes de Maxwell) es uno de los pilares de toda la física clásica.

En la descripción clásica decimos que, en los átomos, los electrones de carga negativa, son atraídos por el núcleo, de carga positiva. El átomo se parece al sistema solar, en el que el núcleo es el sol, y los electrones son los planetas. De manera similar en una molécula los

(C) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://arbor.revistas.csic.es

electrones de un átomo ven en parte la carga de los núcleos de átomos adyacentes, lo cual permite que se mantengan unidos en la misma. Pero ya a principios de siglo se puso de manifiesto que la descripción clásica no era suficiente para explicar muchos fenómenos a escala atómica. Por ejemplo, una de las consecuencias de las leyes de Maxwell es el que una carga eléctrica sometida a una aceleración radia energía, en forma de ondas electromagnéticas. Los electrones moviéndose en órbitas alrededor del núcleo están sujetos a una aceleración (cambian constantemente de dirección) por lo que deberían de perder energía. Su trayectoria sería una espiral, y eventualmente se caerían contra el núcleo, lo cual es contrario a toda la evidencia experimental. Las leyes de Maxwell fallan estrepitosamente al tratar de aplicarlas a sistemas atómicos. Fue precisamente del estudio de fenómenos a escala atómica de donde surgió la mecánica cuántica, que es, junto con la teoría de la relatividad, el marco conceptual en el que está basada toda la física de actual. La descripción de las leyes físicas en este marco no siempre es intuitiva, simplemente no tenemos ninguna experiencia cotidiana que nos sirva de analogía. Algunos conceptos son particularmente importantes.

El primero es que en la descripción cuántico-relativista las interacciones se transmiten por el intercambio de partículas entre los entes interaccionantes. Si por ejemplo tenemos un electrón en reposo y lanzamos otro electrón hacia él, el primero empezará a moverse debido a la interacción electromagnética con el segundo. Éste perderá energía y el electrón en reposo la adquirirá. Este intercambio de energía (la interacción) se describe en la teoría cuántico-relativista del electromagnetismo, a la que se conoce como Electrodinámica Cuántica (o Q.E.D., del inglés Quantum Electro Dynamics), diciendo que se intercambian fotones entre los dos electrones. La formulación definitiva de Q.E.D. data de los años cuarenta. Desde los años setenta también existen teorías cuánticas de campos (existen en el sentido de describir los datos experimentales y de ser autoconsistentes) para las interacciones débiles y fuertes. De hecho, la interacción débil y la electromagnética resultan ser manifestaciones de una misma interacción subyacente (lo cual tiene cierta analogía con la descripción simultánea de las interacciones eléctrica y magnética por las leyes de Maxwell), por lo que se habla de interacción electrodébil y teoría Electro-Débil. A la teoría cuántico-relativista de la interacción fuerte se la llama Cromodinámica Cuántica (QCD), nombre que alude a una propiedad de los quarks (una especie de «carga fuerte», similar a la carga eléctrica de la electrodinámica) a la que se denominó carga de color, o simplemente

(C) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://arbor.revistas.csic.es

color. Los agentes transmisores de las interacciones son partículas con spin (una propiedad de cada partícula, con dimensiones de momento angular) entero, 1 concretamente en ciertas unidades. Los bosones de la interacción electrodébil son el γ (fotón), el Z, el W^+ y el W^-. El γ y el Z son eléctricamente neutros, mientras que los W^+ y W^- tienen la carga que su nombre indica. El fotón tiene masa cero, mientras que el Z, el W^+ y el W^- son masivos, el Z unas 90 veces más que el protón y los bosones W^+ e W^- alrededor de 80 veces más que el protón. Para la interacción fuerte existen ocho bosones que la transmiten, a los que se llama gluones. Todos ellos son eléctricamente neutros y de masa nula como el fotón. Los γ, Z, W^+ y W^- han sido observados directamente, y de los gluones también existe evidencia experimental, aunque no tan directa.

Otra consecuencia de la descripción cuántica tiene una incidencia muy importante en la manera en que buscamos estructuras más y más pequeñas en la materia. La técnica habitual consiste en hacer incidir una partícula que actúa como proyectil sobre un blanco que queremos explorar. Como hemos dicho antes la interacción entre proyectil y blanco tiene lugar por medio del intercambio de un bosón. En mecánica cuántica este bosón, como toda partícula, también se comporta como una onda, con una longitud de onda inversamente proporcional a su momento. La longitud de onda es una medida de la localización espacial de la partícula. Es intuitivo darse cuenta de que el bosón verá a las partículas del blanco como un todo, sin distinguirlas, si son más pequeñas que la longitud de onda del mismo. Esto significa que para una energía determinada del proyectil (y por lo tanto del momento máximo de la partícula intercambiada) no seremos capaces de resolver estructuras en el blanco si éstas son menores de un determinado tamaño. Es debido a este hecho el que la experimentación en física de partículas ha requerido el disponer de aceleradores capaces de acelerar proyectiles a mayor y mayor energía. Por ejemplo, a la energía de 100 GeV del acelerador LEP podríamos distinguir estructuras si son mayores de 10^{-18} metros.

Otra consecuencia de la descripción cuántico-relativista de las interacciones es que para cada partícula debe existir una antipartícula, ambas con las mismas propiedades, pero con cargas opuestas. Si existen electrones también deben existir antielectrones, con la misma masa que los primeros pero con carga positiva. El antielectrón, al que también se le llama positrón, fue descubierto también en los años treinta. En la actualidad, para cada partícula encontrada, también se ha encontrado la correspondiente antipartícula.

(C) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://arbor.revistas.csic.es

Antes hemos hablado de electrones como componentes de los átomos y de quarks como componentes de los nucleones (protón y neutrón). Los electrones tienen carga eléctrica negativa, y su valor absoluto suele tomarse como la unidad de carga eléctrica, es decir, el electrón tiene carga –1. Los quarks son también partículas cargadas eléctricamente, pero su carga es fracionaria, 2/3 para el quark *u* y –1/3 para el quark *d*. El protón tiene carga +1 al estar formado por dos quarks *u* y un quark *d*, es decir su carga es 2/3+2/3–1/3=+1, mientras que el neutrón tiene carga cero, al estar formado por dos quarks *d* y uno *u*. Los átomos son eléctricamente neutros pues están formados por un número igual de electrones y protones, además de neutrones. Los quarks interaccionan entre sí por medio de la interacción fuerte, débil y electromagnética, mientras que el electrón solamente interacciona electromagnética y débilmente. Dentro de los nucleones (protón y neutrón) la interacción que domina es la fuerte, lo cual hace que los quarks se mantengan unidos. También entre los neutrones y protones de los núcleos atómicos comunes la interacción predominante es la fuerte, lo que hace que los núcleos sean estables. Sin embargo, la interacción fuerte no afecta a los electrones, y la interacción que los mantiene unidos a los núcleos es la electromagnética. Electrones y quarks son partículas llamadas fermiónicas, ya que su spin es fraccionario, e igual a 1/2. Si no miramos con mucho detalle, o muy cuidadosamente, podríamos afirmar que toda la materia ordinaria, la que nos rodea y de la cual estamos hechos nosotros mismos, está formada por estas tres partículas: electrón, quark *u* y quark *d*.

Sin embargo, ya desde los años treinta, ha estado claro que las cosas no son tan sencillas. En la llamada desintegración beta de algunos núcleos se emite un electrón y una partícula neutra llamada neutrino (ν). Los neutrinos solamente interaccionan débilmente, por lo que son muy difíciles de detectar. Un neutrino puede atravesar toda la tierra (y toda la galaxia) sin interaccionar. De hecho, aunque su existencia había sido postulada en los años treinta para explicar las propiedades de las desintegraciones beta y, de manera más general, de la interacción débil, no fueron observados hasta los años cincuenta. En la desintegración beta el neutrino aparece asociado al electrón, ambos se crean simultáneamente. También cuando a los neutrinos así producidos se les hace incidir sobre un blanco, como en el experimento en que se descubrieron, en la colisión se producen electrones.

El electrón y el neutrino electrónico (y sus antipartículas) constituyen lo que se denomina la primera familia de leptones que es el nombre con el que se conocen las partículas fermiónicas que no interaccionan

(C) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://arbor.revistas.csic.es

fuertemente (aunque el origen de la palabra es otro). Además de esta familia de leptones se han descubierto otras dos: una, formada por el muón y su neutrino asociado, y otra formada por el tau y su neutrino. El muón y el tau se comportan frente a las interacciones electromagnéticas de manera idéntica a como lo hace el electrón. En las interacciones débiles el muón aparece asociado a un neutrino muónico y el tau a un neutrino tauónico. En cierta manera, en la que no nos extendemos, en una interacción débil se produce una transición de un leptón cargado a su correspondiente neutrino (o a la inversa), pero nunca a un neutrino de una familia distinta. La prueba de que los neutrinos muónicos son distintos de los neutrinos electrónicos fue puesta de manifiesto al hacer interaccionar neutrinos producidos junto con muones contra un blanco formado por protones y neutrones (con núcleos de aluminio en concreto). En las interaciones se producían muones, pero no electrones. La interacción débil de cada leptón cargado y su correspondiente neutrino es idéntica para cada par leptón cargado – neutrino asociado. Las tres familias de leptones parecen réplicas exactas, la única diferencia es la masa, el muón es 200 veces más masivo que el electrón y el tau lo es unas 3500 veces. Los tres neutrinos tienen masas muy pequeñas, quizás exactamente cero.

Durante los años 50 y 60, con la llegada de los aceleradores, se descubrieron más de un centenar de partículas hadrónicas (término que se da a las partículas que participan en la interacción fuerte) como el protón y el neutrón, hasta el punto de producirse un cierto caos en este campo de investigación, tanto a nivel teórico como experimental. En la actualidad todos los hadrones observados pueden entenderse como formados por 6 quarks (y 6 antiquarks): el u, el d, antes mencionados, el c (de charm), el s (de strange), el t (de top) y el b (de bottom). Las combinaciones posibles son o bien del tipo quark-antiquark, a las que se da el nombre de mesones, o bien de tres quarks (o tres antiquarks), a las que se da el nombre de bariones, y de las que son ejemplo el protón y el neutrón. Los quarks nunca aparecen aislados, propiedad que tiene una explicación plausible, pero no estrictamente probada, en la teoría Cromodinámica Cuántica. En las interacciones débiles de los quarks, ocurre que los tres pares u-d, c-s y t-b se comportan de manera idéntica a como lo hacen las parejas leptónicas. Las transiciones débiles consisten en que un quark se transforme en otro de la misma familia, con propiedades específicas de la transición. Hay sin embargo, una diferencia notable, y es que las familias de quarks están «mezcladas». Existe una probabilidad (aunque pequeña) de que ocurran transiciones de una familia a otra. Por ejemplo, un

(C) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://arbor.revistas.csic.es

quark c, efectúa una transición débil a digamos un quark d (cambio de familia), pero la probabilidad relativa a la de la transición c – quark s (dentro de la misma familia) es muy pequeña.

La estructura de la materia que acabamos de mencionar y las teorías sobre las interacciones básicas (electromagnética, débil y fuerte) antes explicadas brevemente, constituyen el llamado Modelo Estandar, sin duda uno de los edificios conceptuales más importantes en la física de este siglo. En la actualidad no existe ningún dato experimental que esté en contradición clara con el Modelo Estandar.

La Física Experimental de Altas Energías en España

Llegado este punto podríamos preguntarnos por cuál ha sido el papel de la física de partículas en España, en particular en el aspecto experimental, en el desarrollo científico que acabamos de describir. Creo no exagerar al decir que la contribución de la física experimental española (entendiendo por tal la que se hace por instituciones españolas) a la física experimental de partículas fue esencialmente nula hasta los años 60. En 1961 España se unió al CERN (Centro Europeo de Física de Partículas) que había sido creado en 1954 por 12 estados europeos para aunar esfuerzos en la investigación en este campo. Como consecuencia de este hecho algunos investigadores españoles comenzaron a participar de forma muy modesta en alguno de los experimentos que se hacían en el CERN. Pero en 1968 España abandonó el CERN alegando dificultades presupuestarias, por lo que la incipiente comunidad experimental tuvo que seguir en condiciones precarias, esencialmente en la entonces Junta de Energía Nuclear (hoy CIEMAT) y en la Universidad de Valencia.

La presencia en el CERN en esta primera fase tuvo no obstante una incidencia notable en la física teórica y, como consecuencia, en la enseñanza universitaria de la carrera de física en varias universidades españolas. Quizá más que «incidencia notable» debería hablarse de «gran impacto» y de cambio cualitativo en la enseñanza universitaria, sospecho que sí, pero no es el tema de este artículo.

En 1982 España volvió a unirse al CERN y para hacer efectiva la participación se creó dentro de España, en 1984, el Plan Movilizador de la Física de Altas Energías. El Plan Movilizador funcionó con procedimientos y objetivos muy similares a los del actual Plan Nacional de I+D, y en efecto, cuando se elaboró el primer Plan Nacional (1988-1991) el Plan Movilizador pasó a ser el Programa Nacional de Física

(C) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://arbor.revistas.csic.es

de Altas Energías. Coincidiendo con el Plan Movilizador, e incluso antes de que éste funcionase plemamente, en el CIEMAT se hizo un esfuerzo muy considerable para participar en algunos experimentos importantes de altas energías a escala europea y en varias universidades se formaron grupos experimentales. Hace diez años existían ya en España grupos, más o menos desarrollados, en las universidades de Santiago de Compostela, Cantabria, Zaragoza, Autónoma de Barcelona, Autónoma de Madrid e IFIC (instituto mixto Universidad de Valencia/CSlC). El Plan Movilizador también financió a grupos experimentales de física nuclear en el IFIC y en el CSIC (Madrid), así como en la Universidad Complutense. Son estos grupos experimentales los que existen en la actualidad.

Desde 1985 a 1989 la actividad más importante de los grupos experimentales, por su tamaño, consistió en la preparación de los experimentos del acelerador LEP del CERN. En estos experimentos, que comenzaron a tomar datos en 1989, participan el CIEMAT (en el experimento llamado L3), el IFIC y la Universidad de Cantabria (en el experimento llamado DELPHI) y la Universidad Autónoma de Barcelona (en el experimento llamado ALEPH). En ellos se estudian, en una primera fase llamada LEP-I, las colisiones electrón-positrón a una energía total a la que es posible producir partículas Z y a casi el doble de energía, en una segunda fase llamada LEP-II que ha comenzado en 1996, donde es posible producir pares de partículas W+ W–. El grupo de la Universidad Autónoma de Madrid participa en el experimento ZEUS que se realiza en el acelerador HERA situado en el laboratorio alemán DESY, en Hamburgo. En este experimento se estudian las colisiones electrón-protón a la energía de 300 GeV en el centro de masa. Los experimentos de LEP y ZEUS son de un costo, capital y humano, parecido. En cada uno de estos proyectos participan entre 400 o 500 físicos e ingenieros de todo el mundo, el tiempo típico de preparación son de 8 a 10 años, el costo es del orden de 10.000 millones de pesetas y el tiempo de «explotación», es decir el análisis de los datos, pueden ser otros diez años. El CIEMAT también participó en las últimas etapas del experimento UA1 del CERN, en el cual se habían descubierto experimentalmente los bosones W^+, W^- y Z.

El grupo de Santiago de Compostela participó en el CERN en un experimento de colisión entre iones pesados llamado NA36 y en otro experimento, el SMC, donde se estudian las colisiones muón-nucleón con haces y blancos polarizados.

En Zaragoza se realizan experimentos de búsqueda de desinteracción doble-beta (la existencia de las mismas dilucidaría algunas cuestiones

(C) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://arbor.revistas.csic.es

básicas sobre el neutrino) y de búsqueda de materia oscura en el universo. Estos experimentos se llevan a cabo en un laboratorio subterráneo situado en el tunel de Canfranc entre España y Francia.

La Universidad Complutense de Madrid también participa en un experimento de alta energía pero sin aceleradores, en concreto el experimento HEGRA que se lleva a cabo en las instalaciones del Instituto Astrofísico de Canarias en el Roque de los Muchachos en la isla de La Palma y el cual tiene por objetivo el estudio de radiación gamma ultraenergética de procedencia cósmica.

Dos grupos, en el CSIC de Madrid y en el IFIC de Valencia, llevan a cabo experimentos de física nuclear, en la instalación llamada ISOLDE, en el CERN, y en otros laboratorios europeos.

Balance de los primeros diez años del Plan Movilizador/ Programa Nacional de Fisica de Altas Energias

Creo que los experimentos con participación española en LEP y HERA son los que más nos pueden dar una idea de la incidencia del Plan Movilizador y del Programa Nacional de Altas Energías dentro de España. Más que ofrecer un análisis detallado, que está claramente fuera del alcance de este artículo, lo que hago a continuación es el emitir algunas opiniones cualitativas sobre una serie de aspectos concretos.

Al opinar sobre la física experimental de altas energías uno tiene que ser consciente, antes de nada, del contexto en el que se desarrollan los experimentos. En una primera etapa los participantes tienen que diseñar y construir el detector de partículas con el cual tomarán datos en el acelerador de que se trate, por ejemplo LEP en el CERN. Esta parte del proyecto se lleva a cabo de manera distribuida en las instituciones de los distintos grupos que participan, típicamente del orden de 40 en el caso de los experimentos de LEP, y dura varios años, unos 10 en este ejemplo concreto. Una vez construido el detector éste se instala en el acelerador, alrededor del punto de colisión de las partículas. Cuando el experimento comienza a tomar datos el personal del laboratorio se ocupa de que el acelerador funcione pero son los que hacen el experimento quienes se encargan de atender al detector, y esto incluye a todos los que participan. Una vez que los datos son acumulados y tratados (del detector solamente salen señales electrónicas) comienza el análisis de los mismos, que se lleva a cabo tanto en el propio laboratorio como en las instituciones involucradas. Todo

(C) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://arbor.revistas.csic.es

este proceso es muy complejo, como es fácil imaginarse. En el proyecto participan cientos de personas cuya labor tiene que estar altamente coordinada. La complicación técnica requiere conocimientos muy específicos y por lo tanto personas de varios campos, ingenieros y no solamente físicos, así como instalaciones adecuadas en los grupos correspondientes. En la división del trabajo hay que llegar a acuerdos internacionales y a compromisos temporales muy detallados. Es preciso viajar con frecuencia tanto en las etapas de diseño/construcción del detector como en la de toma de datos. Si uno reflexiona mínimamente y se pregunta el cómo hacer todo esto desde un grupo universitario típico, la respuesta no es desde luego evidente.

Otro punto importante en España, sobre todo en las universidades, es que en este campo se partía esencialmente de cero, con unos medios técnicos infinitamente menores, es decir nulos, que los utilizados por J. J. Tompson en el descubrimiento del electrón en 1897, y con unas estructuras administrativas bastante anacrónicas. Si no olvidamos estas circunstancias que son hoy, sólo diez años mas tarde, afortunadamente muy distintas, el balance de la participación española en LEP y en HERA es extraordinariamente positivo en todos los aspectos. Los grupos españoles han participado «codo a codo» y a nivel de total igualdad científica con grupos europeos, algunos de una gran tradición. Cualquier medida de la «rentabilidad científica», y hay varias, lo muestra claramente.

(C) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://arbor.revistas.csic.es