

## EL CERN

Tenía 23 años cuando oí hablar por primera vez del CERN, en realidad lo leí, fue en la “Historia del Tiempo” de Stephen Hawking. Bueno, cuando oí hablar o cuando quise escuchar, o las dos a la vez. Por aquel entonces yo era un estudiante de ingeniería en telecomunicaciones y quedé completamente maravillado con cada cosa que leía sobre este centro de investigación y sobre la física de partículas. Ese amor a primera vista aún dura y ha marcado completamente mi vida profesional. Tan directo fue ese flechazo que poco después me estaba matriculando en ciencias físicas por la UNED y al acabar la ingeniería no lo dudé: tenía que licenciarme en físicas para algún día ser investigador del CERN.

Ese sueño se hizo realidad en 2008 cuando gané una beca predoctoral en el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) en Madrid. Justo en esa época ya era físico y estaba estudiando un master en física fundamental. Fueron 5 años de mucho trabajo, estudio y dedicación para obtener los dos títulos, ingeniero y físico, pero finalmente había llegado la recompensa, como investigador del CIEMAT iba a formar parte del experimento CMS (Compact Muon Solenoid) del LHC (Large Hadron Collider) que ese mismo año se iba a poner en marcha.

Lo que para un cinéfilo supone ir a Hollywood, para un futbolero Maracaná, para un ingeniero la NASA o para un cantante Eurovisión... bueno, esto último no, algo así es para un físico viajar al CERN, ese centro que sueñan visitar Sheldon Cooper y Leonrad en la serie The Big Bang Theory.

Su nombre es francés y referencia al antiguo Conseil Européen de Recherche Nucléaire (consejo europeo de investigación nuclear, literalmente), un consejo que se formó en los años 50 motivado por la UNESCO y algunos científicos europeos muy influyentes para la creación de un laboratorio europeo de investigación básica (y sin fines militares) que pudiera evitar la salida masiva de científicos que en los últimos años estaban emigrando hacia los Estados Unidos. La guerra en Europa había sido muy dura y había debilitado mucho a países como Francia, Inglaterra y Alemania, que habían sido siempre líderes mundiales en ciencia y la salida de científicos como Fermi o Einstein había posicionado a Estados Unidos por primera vez en la historia a la cabeza del mundo científico. El apoyo de grandes físicos como De Broglie o Bohr además del empeño de la UNESCO finalmente tuvo recompensa, poniéndose la primera piedra del laboratorio en 1954. Aunque mantuvo el nombre de CERN tras la disolución del consejo, ya no se hace más referencia a él como un consejo de investigación nuclear, sino como un laboratorio de física de partículas. Desde su creación hasta nuestros días el CERN ha conseguido ser referente mundial en física de partículas y ha sido testigo de grandes logros, descubrimientos, inventos, ha sido punto de encuentro de grandes físicos, de interesantísimas discusiones y más de una anécdota. Por aquí han pasado ganadores del premio Nobel en física como Carlo Rubbia, Samuel Ting o Jack Steinberger, con quienes no es difícil coincidir en la cafetería o en los pasillos; se han hecho descubrimientos históricos como las corrientes neutras, los bosones electrodébiles o el bosón de Higgs; y se han llevado a cabo importantes desarrollos tecnológicos como las cámaras multihilo, el enfriamiento estocástico o la world wide web (www). Es a este lugar al que llego como un recién graduado en física en verano de 2008, poco tiempo antes de

que se pusiera en marcha el colisionador de partículas más energético del mundo, el LHC.

Ginebra (Suiza) es una ciudad muy tranquila, muy “europea”, bastante pequeña, con poco tráfico, muy limpia. Si así es el centro, imagínense el extrarradio. El CERN está a las afueras de la ciudad, a unos 7 kilómetros del centro. Su entrada principal está a unos 100 metros de la frontera con Francia, se encuentra literalmente en pleno campo, en medio de la nada. De noche, en este entorno uno se siente totalmente aislado del mundo, especialmente en fin de semana. Recuerdo que llegué al CERN un sábado noche, muy tarde, sería sobre medianoche cuando me acerqué a su entrada principal. Por ser fin de semana habían retirado las banderas, en la oscuridad no se veía gran cosa y el lugar no contaba con el glamour que igual uno podría esperar de un centro histórico como este. Quizás fuera que yo esperaba una entrada como la de Disneyland, o focos y alfombra roja como en Planet Hollywood y confeti. Lo que sí es cierto es que tras esa primera impresión, y nada más pasar el control de seguridad con la tarjeta de mi habitación del hotel en mano (sí, iba a dormir dentro del CERN) comencé a ser consciente de dónde estaba, un lugar muy diferente al resto en los que había estado, un lugar histórico. Las calles no tienen nombre de generales franquistas, como en España, sino de grandes científicos: Einstein, Bohr, Curie; los edificios no son una muestra de alarde de riqueza o poder, más bien al contrario, son muy humildes, viejos pero funcionales, sin ninguna ostentación, la verdadera riqueza se encuentra en su interior, en esas mentes brillantes y en esas máquinas, esto es algo muy propio de la naturaleza humilde de la ciencia y generalmente, los científicos; además los edificios guardan una numeración que parece extraña pero que inmediatamente te hace pensar que estás en una ciudad, una ciudad de frikis, una ciudad de la ciencia: el edificio 23, el 450, el 1092..., ¡el CERN es enorme!; incluso en algunos casos uno puede intuir que algo grande se está llevando a cabo en su interior, como el edificio que muestra las siglas CLIC (el futuro acelerador lineal) o esas dos pequeñas colinas o remotes en medio de una carretera recta que no son capaces de disimular que debajo hay un acelerador circular histórico, el PS Booster. Caminar por el CERN es hacer un recorrido por la historia reciente de la física.

Esa naturaleza humilde uno la observa desde el primer día, pasar por el restaurante principal del CERN, el R1, directamente te lo demuestra. Es lo segundo que uno hace nada más llegar allí: después de dormir plácidamente (como digo, ni el más mínimo ruido en toda la noche) en uno de los 3 hoteles que hay dentro del CERN uno baja a desayunar a la cafetería. De hecho, cuando le preguntas a mi amigo Mick Storr, una de las personas que mejor conoce el laboratorio y que fue durante mucho tiempo jefe del servicio de visitas del CERN, cuál es el lugar más especial del CERN, él te señala el R1. Es un punto de encuentro de científicos de todas las partes del planeta, entre ellos se encuentran algunos de los mejores especialistas en física de partículas del mundo. Allí se discuten teorías, se cuentan chismes, cada uno tiene una visión particular y especial sobre este o aquel experimento y muchas de las grandes ideas han surgido de estas discusiones. Discusiones totalmente horizontales, allí todo el mundo habla y escucha, no importa si eres premio Nobel o un estudiante recién llegado, cada día tienes la posibilidad de acercarte a algunos de los mayores expertos del mundo en física de aceleradores, criogenia, física de partículas, cosmología... y compartir tus pensamientos o expresar tus dudas. Los científicos

casi siempre están dispuestos a discutir, explicar y por supuesto también escuchar. Claro siempre que no les pilles con la *tartiflette* en la boca. Así que simplemente te acercas a Jack Steinberger, te presentas como estudiante y le pides permiso para sentarte en su mesa, tan fácil como eso. De esta manera he podido conocer en persona a científicos como Peter Higgs, Samuel Ting, John Ellis, Luis Álvarez-Gaumé,... disfrutar de conferencias en el auditorio del CERN como la del descubrimiento del bosón de Higgs, o aquella jornada en que asistimos a presentaciones de 13 premios Nobel de física, en un solo día, como Gerard N'thoof, Abdus Salam o Sheldon Glashow y un cocktail final con todos ellos, o dialogar con grandes científicos que no tienen tanto reconocimiento pero que tanto admiraba y de quienes tanto aprendía cada día como mis compañeros (Óscar, Silvia, Dani, Carlo, María...) y mis tutores de tesis Juan Alcaraz, Begoña de la Cruz e Isabel Josa. Acercarte a un gran científico con tu duda estúpida de estudiante y ver cómo se toma el tiempo para ayudarte a resolver tu problema, de pensar cuál es la mejor forma de que lo entiendas y explicártelo con paciencia y sin hacerte sentir lo tonto que eres es de las cosas que recuerdo con más cariño de aquellos años. Fue maravilloso encontrarse día a día a gente con la puerta siempre abierta a tus dudas, dispuestos a escuchar nuevas ideas y con muchísima pasión por lo que hacen, una pasión muy contagiosa. Les hablo de personas que viven lo que hacen, gente que llora de emoción con un descubrimiento, que quiere a sus detectores como a un hijo y sin duda también de muchos despachos encendidos un sábado a las 11 de la noche.

Así que el CERN es una ciudad científica: restaurantes, guardería, banco, supermercado, médico, instalaciones deportivas y mucho más. En total unas 10 mil personas trabajan de forma directa o indirecta para el CERN, desde personal de plantilla hasta científicos de otras Universidades o laboratorios que van allí a pasar unos días, unas semanas o unos meses. Por esto el tráfico de personas (los frikis también somos personas) en el CERN es constante, llegan y se van continuamente de todos los rincones del planeta. El CERN es un centro internacional, está formado por 50 países (en dos categorías, miembros y no miembros) y participación de 250 institutos, Universidades y laboratorios de los 5 continentes. Es por eso que el CERN es además un ejemplo de colaboración internacional y demuestra la utilidad de la ciencia como lenguaje universal y para la paz, siendo la cooperación internacional uno de los 4 grandes pilares del CERN. Una "fiesta" organizada por científicos israelíes y palestinos en el CERN en el momento de mayor intensidad en el conflicto entre los dos países es una muestra del poder de integración de la ciencia.

Como investigador realicé mi labor en el CERN como estudiante de doctorado del CIEMAT (España) y miembro del experimento CMS, uno de los grandes detectores del LHC. Durante esos 4 años mi humilde labor fue encaminada a la calibración y a realizar medidas de rendimiento en uno de los subdetectores de CMS, las cámaras de deriva y, en los dos últimos años, al estudio de la producción de bosones electrodébiles (W y Z, precisamente descubiertos en el CERN 30 años antes) en las colisiones de protones. Pero claramente mi paso por el CERN estuvo marcado por la puesta en funcionamiento del LHC y los detectores, el descubrimiento del bosón de Higgs y por los años que hice de guía voluntario en el servicio de visitas del CERN, que me permitió conocer a grandes científicos de todas las áreas y a descubrir otros grandes experimentos dentro de este

histórico centro de física de partículas. Pero empecemos por la joya de la corona, la guinda del pastel, el mayor colisionador de partículas del mundo, el LHC.

## **El Gran Colisionador de Hadrones (LHC)**

Aunque lo primero que le viene a la cabeza a uno cuando le hablan del colisionador de partículas de Ginebra es ese agujero negro que va a devorar primero Ginebra, luego Francia, el pilón de la plaza, la panadería de la Paqui, la casa de mi vecino que es del Rayo, mi perro, mi casa y posteriormente el resto del planeta Tierra, las intenciones de todos los físicos de partículas están muy lejos de ser esas. Cuando en 2008 fue a ponerse en marcha el acelerador el mundo se agitó como si fuera a acabarse. Todos los medios de comunicación hacían referencia a la posibilidad de que una colisión de alta energía pudiera producir un agujero negro que aniquilaría toda forma de vida en la Tierra. La noticia saltaba después de que un profesor de ciencias en Estados Unidos llevara al Tribunal de Derechos Humanos de la Haya una carta en la que pedía la detención urgente del experimento. La petición se desestimó y el LHC se puso en marcha sin ningún incidente.

¿Por qué no se detuvo?, ¿cómo permite la comunidad científica que se ponga en riesgo a toda la humanidad?, ¿por qué nos atrevemos a jugar a ser Dios? Estas son algunas de las preguntas que nos hicieron a los investigadores del LHC inmediatamente los días que siguieron a la noticia en los medios. A todas se responde de la misma manera: los motivos que se alegaban para parar el experimento no tenían ningún fundamento científico. Me explico. Una colisión de tan alta energía como la que iba a producirse en el LHC es algo único en la historia de la humanidad, no por ser la primera vez que ocurre en la Tierra, sino por ser la primera que se hace de forma controlada, en un laboratorio. En estas condiciones los procesos que ocurren se pueden estudiar con mayor precisión lo que nos permite entenderlos mejor. Pero como digo, no es ni mucho menos la primera vez que suceden colisiones así en la Tierra, es más, suceden continuamente y a una energía muchísimo mayor que la que se da en el LHC. Son los rayos cósmicos.

Como hemos visto ya varias veces en este libro, los rayos cósmicos son partículas de alta energía que vienen de diferentes partes del cosmos (no se sabe bien) y que impactan con la atmósfera terrestres. Se han detectado rayos cósmicos con miles y millones de veces más energía que la que llevan los protones en el LHC. En ese sentido las colisiones del LHC son un pequeño pellizco, una birria, comparado con lo que ocurre en el Universo, e incluso en nuestra propia atmósfera. Y si las colisiones en la atmósfera no producen un agujero negro que engulla la Tierra... ¿cómo lo van a hacer nuestras raquílicas colisiones? Una vez más el ser humano se cree más grande y poderoso de lo que realmente es, una nimiedad en la inmensidad del cosmos.

Aún así podrían producirse lo que se llaman microagujeros negros, agujeros negros de tamaño microscópico, lo cual sería un grandísimo logro, aunque es improbable. Estos agujeros negros solo son posibles si vivimos en un mundo de más de 4 dimensiones (3 del espacio y la del tiempo) cosa que está en duda. Además estos agujeros negros, como vimos en el capítulo dedicado a ellos, serían inestables, por radiación Hawking, y se desintegrarían en una fracción mínima de

segundo, antes de que fueran capaces de incrementar su masa, engullendo materia alrededor suyo.

Así que los científicos del LHC, al contrario de lo que aparecía en las noticias y en la serie 'El Barco', no tienen intención de acabar con el mundo. Entonces, ¿para que sirve un colisionador de partículas? Cuando quieres ver el interior de algo para entender su funcionamiento, por ejemplo, lo puedes abrir, si eres paciente y hay forma de hacerlo. Digamos que quieres saber cómo funciona un reloj, o una calculadora, pues tomas un destornillador, lo abres y puedes estudiar lo que hay dentro. Con un iPhone es más difícil, o si ya quieres saber lo que hay dentro de un cerdo-hucha puede ser imposible, no hay tornillos. En esos casos lo mejor es lanzarlos contra la pared, romperlos. Lo que estas haciendo técnicamente, aunque no lo pienses así, es dotar al bicho en cuestión (el cerdo o el iPhone) de mucha energía cinética, el choque que luego tiene contra la pared lo detiene bruscamente distribuyendo esa energía (conservación de energía) por su superficie, que es lo que produce que se rompa. Una vez roto ya podemos mirar que había en su interior. Te has quedado sin iPhone pero... ahora sabes un poco más, eres un gran científico.

Con la materia, como las células, los tejidos, las moléculas o los átomos pasa algo similar, por ejemplo si quieres saber las partes de un átomo lo mejor que puedes hacer es colisionarlo. De hecho es así como se estudian las partes del átomo, como hizo hace más de un siglo Ernest Rutherford, bombardeando una lámina de oro con partículas alfa (núcleos de helio, es decir, dos protones y dos neutrones). También es así como se puede ver que un protón está compuesto en realidad de 3 tipos de partículas, quarks up y down y gluones. Pero romper partículas es todavía mejor que romper iPhones, especialmente si estos no están en garantía, gracias a los efectos cuánticos que se producen en la materia.

Ya saben lo especial que es la teoría cuántica: extraña, contraria a nuestra intuición,... Muchas de estas propiedades vienen por uno de los principios más curiosos de esta teoría, el principio de incertidumbre. Según la teoría cuántica de un estado de energía cero (sin energía), lo que vendría a ser el vacío más absoluto, pueden surgir partículas de forma espontánea. ¡Pero una partícula tiene masa y por lo tanto energía, esto viola la conservación de energía! Ciertamente, pero como establece el principio de incertidumbre y hemos visto ya en este libro, esto se puede hacer, y de hecho se hace, siempre que esta situación sea muy rápida, durante un tiempo muy corto. Vamos, que durante ese tiempo el Universo puede saltarse una de sus leyes fundamentales, la ley de la conservación de la energía, como haciendo la vista gorda, muy español todo esto. Ya saben ese "yo a ese concejal no lo conozco", "yo no sé que hacen esos Jaguars en mi garaje", "esos billetes de 500 no son míos, espera que voy a por la trituradora de papel". Algo así pasa con esta ley de conservación en el vacío. Las partículas se crean y se destruyen casi inmediatamente, como delfines que salen a la superficie a respirar y vuelven al mar rápidamente, por eso se las conoce como partículas virtuales, sabemos que están ahí, por medidas indirectas, pero no se pueden llegar a ver. Y solo existen el justo tiempo que les permite el principio de incertidumbre, tras lo cual, como si no hubiera pasado nada, se vuelve a un estado de vacío. Así, en vez de imaginar el espacio vacío como algo inerte, aburrido, hay que imaginarlo como algo frenético: pares de partículas y antipartículas que se crean y se destruyen continuamente, partículas de todo tipo, en todas las direcciones y en cada momento. No se ven, pero están ahí.

Estas partículas virtuales podrían escapar de este destino atroz, la aniquilación, de esta condena perpetua al vacío, si consiguen el aporte energético suficiente para no necesitar cumplir ese principio de incertidumbre y desaparecer. Esa energía de alguna forma rompe las cadenas que atan estas partículas al vacío cuántico, volviéndolas visibles, medibles. Lo más interesante de todo esto es que esas partículas que podemos liberar pueden ser cualesquiera, partículas incluso que nunca hemos visto y que nunca podremos ver en la Tierra. Y esto gracias a que en el vacío hay de todo.

Imagínate que en nuestro pequeño huerto solo tenemos lechugas, pepinos y tomates. Todos los días comiendo de esta ensalada, uno acaba hasta el gorro, se le queda cara de grillo. Pero por suerte con algo de dinero podemos ir al supermercado y comprar otros vegetales, cebolla, pimientos, puerros, zanahorias... muchos de ellos no están en nuestra huerta, incluso algunos de ellos nunca podrían crecer allí, por el tipo de clima por ejemplo. ¡Qué experiencia más deliciosa para el que está acostumbrado a alimentarse de esta ensalada tan aburrida durante todos los días de su vida poder probar algo distinto! ¿No creen? Algo similar pasa con las partículas del vacío cuántico. Nuestra huerta es la Tierra y el supermercado es el Universo, donde están todos los tipos de partículas que pueden existir, pero escondidas para nosotros, están en el vacío. Dadas las condiciones especiales de la Tierra, solo podemos ver unas pocas de ellas, protones, neutrones, electrones, fotones... si queremos ver otro tipo de partículas habrá que ir al supermercado y pagar por ellas, es decir, comprarlas con energía. De esta forma podemos crear partículas que de otro modo no podríamos ver, como kaones, taos, hiperones, bosones electrodébiles o el mismísimo bosón de Higgs. Frótate los ojos, léelo las veces que sea necesario, esta es parte de la “magia” de la cuántica y de los colisionadores de partículas: colisionando protones se obtienen partículas que no son parte de los protones, las partículas que colisionan, lo cual es equivalente a que al destrozar tu iPhone contra la pared salga una goma, un peluche, o una taza de Kaleeshi. Esto, además de sorprendente, es muy interesante porque enriquece nuestra ensalada, nos permite entender mejor la naturaleza ya que tenemos acceso a partículas que de otra forma no podríamos estudiar. Son partículas muy importantes para comprender el Universo, existieron muy al inicio, en el Big Bang, antes de que el Universo se expandiera rápidamente y se enfriara, cuando el mecanismo de Higgs aún no estaba activo y las partículas no tenían masa. Era una gran fiesta, un auténtico carnaval, todas estas partículas estaban por doquier. Pero al enfriarse el Universo con la expansión estas partículas comenzaron a desaparecer, primero las más masivas y finalmente las más ligeras hasta que todos los invitados de la fiesta se fueron. Como sucediera hace 60 millones de años con la desaparición de los dinosaurios, estas partículas también se extinguieron sin dejar rastro. ¿Te imaginas que pudiéramos crear un dinosaurio, un Tiranosaurus Rex o un velociraptor, como en Jurassic Park? Con los dinosaurios parece difícil, pero con las partículas sí se puede, lo hacemos continuamente. Así podemos acercarnos un poco más al Universo primitivo para poder entenderlo y nos alejamos un poco de este Universo de hoy frío y aburrido, de lechugas y tomates, nuestros protones, neutrones y electrones, que junto con los fotones, son las únicas partículas que podemos hoy ver en la Tierra.

Para llevarte lo pimientos del supermercado a casa hay que pagar por ellos. Nuestra forma de pagar es aportando energía, y con una relación muy sencilla.

¿Recuerdan que  $E=mc^2$ ? Igual que en un supermercado, pagamos por peso, más masa tiene una partícula, más energía hay que aportar. Por eso las partículas más masivas son más difíciles de obtener, requieren más energía. Así que cargados de energía vamos a nuestro supermercado, el Carrefour de las partículas y nos disponemos a hacer la compra del mes. Pero antes... ¿de donde sacamos el dinero para la compra, la energía extra que tenemos que aportar?

Cuando un objeto lleva mucha velocidad acumula energía, ya lo vimos antes en el caso del reloj, del iPhone y de la hucha de cerdito. Esta energía es la que hace que se rompan los enlaces del sólido y se resquebrajen las cosas que tiras, incluso se partan en añicos. De nuevo la relación es simple, cuanta mayor velocidad más energía lleva. Así que si queremos una colisión capaz de romper la materia, tendremos que hacer una colisión de muy alta energía para lo que necesitaremos acelerar partículas a muy altas velocidad antes de hacerlas chocar. Cuanta más energía lleven los protones seremos capaces de generar partículas con más masa, aquellas que solo existieron cuando el Universo era muy caliente, con lo cual nos estaremos acercando más y más al origen del Big Bang. Miren que cosa más bonita: aumentando la energía de la colisión retrocedemos en el tiempo hacia un Universo primitivo, cuanta mayor sea la energía de colisión estamos viajando a un Universo más caliente, lo cual es una nueva muestra de la maravillosa conexión entre física de partículas y cosmología.

Perfecto, entonces tenemos que acelerar partículas para hacerlas luego colisionar. Producto de esta colisión surgen otras partículas que son las que queremos estudiar, de ahí que un experimento de colisión de partículas requiera dos elementos: un acelerador que haga que las partículas acumulen energía, y un (o normalmente varios) detector que estudie los productos de la colisión. Pues vamos a lanzar partículas unas contra otras para verlas colisionar... pero antes ¿qué partícula elegimos para colisionar?

Ha habido una gran evolución en los experimentos de colisión en los últimos 100 años. Desde los primeros aceleradores de partículas (ciclotrones que caben en la palma de tu mano) hasta los más potentes que tenemos hoy en día (sincrotrones de unos 10 kilómetros de diámetro). El objetivo de todos ellos es que el proyectil que se lanza alcance la máxima velocidad posible (o energía, como saben, lo mismo es). ¿Cómo se acelera una partícula? Pues con un campo eléctrico, de una manera muy sencilla. Podemos usar “una pila”: una partícula positiva se siente atraída por la carga negativa y viceversa, y va acelerándose en ese camino de un polo al otro. Ya tenemos una primera restricción: solo podemos utilizar como proyectil partículas cargadas eléctricamente, *ciao* neutrones, ya les llamaremos, si eso. Sigamos descartando. El LHC acelera protones hasta que cada uno de ellos tiene una energía de casi 7 TeV (se lee teraelectronvoltio), donde un eV es la energía de un electrón cuando lo aceleramos con una pila de 1 voltio. Es decir necesitamos 7 billones de pilas de un voltio, una tras otra, para llegar a alcanzar esta energía de colisión. Si cada una de estas pilas mide 5 centímetros, haríamos un acelerador mayor que la distancia entre la Tierra y el Sol, lo cual no tiene mucho sentido, ni en la época de bonanza española, esa en la que se hacían mega puentes, mega túneles y mega rotondas y aún sobraba dinero para organizar un gran premio de fórmula 1. Pero hay una alternativa, si obligamos a la partícula después de atravesar una pila a volver al principio, puede volver a acelerarse con la misma pila, y si lo repetimos 7 billones de veces, si la pila es la de los conejos Duracell que no se gasta habremos alcanzado la misma energía, pero usando esta

vez una sola pila. Así tenemos un acelerador circular, en forma de anillo. ¡Conseguido! Bueno, no tan rápido porque esto presenta una limitación. Cuando una partícula cargada gira emite radiación, es lo que se conoce como radiación sincrotrón, son fotones de alta energía que las partículas lanzan cuando están dando vueltas. Y esto presenta un gran impedimento porque hay un momento en el que la energía que se le aporta a la partícula con la pila la pierde al emitir estos fotones y ya no se acelera más. Por eso cuanto menor es la pérdida de energía por radiación sincrotrón del proyectil mayor es la velocidad que puede alcanzar, y como la pérdida de energía por emisión es menor cuanto mayor es la masa de la partícula acelerada, habrá que buscar partículas con mucha masa. Un protón pesa unas 2000 veces más que un electrón, y por lo tanto tiene menos pérdidas de energía. *Ciao* electrón.

Podrían pensar que hay muchas otras partículas para colisionar, de las 100 que ahora se conocen. En realidad no es así. Si primero descartamos todas las que no son estables (casi ninguna lo es) y las que no tienen carga, nos quedan solo electrones, protones y sus antipartículas. Colisionar estas últimas presenta el inconveniente de que hay que producirlas a parte, con otro colisionador, lo cual dificulta aún más el experimento. Colisionar protones es la mejor solución para un experimento que pretende explorar los fenómenos que tuvieron lugar en el origen del Universo. Es verdad que colisionar protones tiene también sus desventajas, ya que al estar formados de quarks y gluones una colisión de protones es algo muy “sucio” y difícil de estudiar. De ahí que existan como alternativa a estos colisionadores circulares los lineales, donde se aceleran electrones en lugar de protones, con la desventaja de que se alcanza menos energía de colisión.

Ya lo tenemos decidido, vamos a acelerar protones y lo vamos a hacer en un acelerador circular. Tendremos nuestras “pilas”, unas pocas, en un tramo recto que cerraremos con un “tubo” que hará que las partículas giren y vuelvan a entrar en la “pila”. Esta “pila”, por cierto, son cavidades de radiofrecuencia, unos aparatos que crean un campo eléctrico, lo que se llama una onda estacionaria, que es alterna y síncrona con el paso del protón (de ahí que este tipo de aceleradores se llamen también sincrotrón). Su funcionamiento es similar a cómo una ola hace que un surfista gane velocidad. Los protones se sitúan en la cresta de la ola (la onda de radiofrecuencia) y van ganando energía según se desplazan junto con la ola por la cavidad. A la salida de la cavidad los protones van a mayor velocidad, han ganado energía, y sin mojarse. Además tienen la ventaja de que en las cavidades de radiofrecuencia no hay tiburones.

Ahora toca hacer a los protones girar, es el turno de esos “tubos”. Su objetivo por lo tanto no es acelerar los protones, sino simplemente que completen una vuelta para volver a entrar en las cavidades de radiofrecuencia. Como las partículas cargadas giran en presencia de un campo magnético lo tenemos fácil, necesitamos un imán. Aquí llega un punto muy importante. Es parte de nuestra experiencia cotidiana darnos cuenta de que cuando queremos tomar una curva hay que frenar el coche, si no lo hacemos lo más seguro es que el coche se salga de la carretera y demos una cuantas vueltas: hay que adaptar la velocidad del coche a la curva que tenemos, o diseñar un coche que se agarre más a la carretera y no vuelque. De estas cosas saben mucho Carlos Sáinz y los ingenieros del LHC. Este es el papel que juegan los imanes en el acelerador, cuanto mayor sea el campo magnético de los imanes más “agarre” tendrán y mejor podrán



completar la curva, es decir, más rápido podrán ir. Esa es también la razón por la que se hacen aceleradores tan grandes, un acelerador muy grande presenta una curvatura muy ligera, forma curvas menos cerradas, y se puede alcanzar más velocidad. También tenemos un experto en curvas cerradas y velocidad, Fernando Alonso.

Necesitamos campos magnéticos gigantes, enormes, brutales. De hecho vamos a hacer un ejercicio científico, vamos a imaginar la situación en la que se encuentra un ingeniero del CERN, estamos entorno a 1980 y les llega un pobre físico ilusionado, un friki vamos. "Si consigo colisionar protones al 99.999999% de la velocidad de la luz igual encontramos algo nuevo, es fascinante", el ingeniero le diría "eso cuesta mucho dinero, amigo", y el físico le respondería "yo no soy tu amigo". Pero el ingeniero, que no tiene otra cosa que hacer porque no tiene ni amigos ni familia se pone a pensar en el problema. Tiene dos parámetros con los que puede jugar para que los protones alcancen esa velocidad, el tamaño del acelerador y la potencia de los imanes. Si hace un acelerador chiquitito, tendrá que hacer unos imanes muy potentes; si hace un acelerador enorme, no necesitará unos imanes tan potentes. Pero la solución parece fácil para él: el CERN ya tiene un gran túnel, donde se encuentra el Large Electron Positron Collider (LEP) que se había construido unos años atrás. LEP era un acelerador circular de 27 km a 100 metros bajo tierra, es perfecto, ¿para que excavar más? Así que mantenemos el túnel, por lo que toda la atención del diseño se tiene que centrar en los imanes. En ese momento, tras pensar en esto por un rato, el ingeniero paró un segundo lo que estaba haciendo, miró al techo y suspiró, lo tenía claro "necesitamos imanes que generen un campo magnético de 8 Teslas", dijo con un fuerte acento alemán, y siguió jugando al Minecraft.

Un imán, eso se consigue fácil, dirás mirando la nevera de tu casa. Esos que tienes colgando del frigorífico son lo que se llaman imanes permanentes, unas "piedras" que por sus propiedades naturales generan un campo magnético. El problema es que tendrías que arrasar con todas las tiendas de souvenirs del mundo, pizzerías, fontanerías y demás establecimientos que llamamos en caso de emergencia que tienen esos imanes tan chulos o útiles que luego ponemos en el frigorífico, y con todo ni siquiera llegarías a lo que necesitas porque 8 Teslas es mucho más. Necesitamos crear un campo magnético que es algo así como 100 mil veces el de la Tierra, el que hace que la brújula funcione. Por suerte hay otro tipo de imanes que son perfectos para la ocasión, son los electroimanes.

Si tu tomas una espira (un cable formando un circuito) y haces pasar una corriente por ella se crea un campo magnético como el que queremos. Y esto tiene muchas ventajas, porque además puedes regular el campo magnético adaptando la corriente. Imagina, puedes tener un regulador, como el del volumen de la radio, y subir o bajarlo para ajustar el campo magnético a tu gusto, todo es cuestión de pasar corriente por una espira, un conductor. Para generar el campo magnético de 8 Teslas necesitamos producir una corriente de unos 11800 amperios (una casa normal consume unos 100 amperios, la de Bertín Osborne igual un poco más). Lo que pasa es que los conductores tienen una manía que no nos viene nada bien, especialmente dada la intensidad de la corriente que necesitamos crear, es lo que se conoce como resistencia. Hacer pasar una corriente por un cable es como pasar agua con una tubería. El problema es que los cables normales son como tuberías agujereadas, según pasas corriente por ellas, va cayendo agua por los agujeros y, además de poner todo perdido, acabas

perdiendo todo el agua. Sí, en estos cables según pasa la corriente se va perdiendo energía, y lo que es peor, en forma de calor, que dada la corriente que tenemos que pasar por este electroimán hace que acabemos fundiendo el cable. La solución es: ¡la superconductividad! Esta es una propiedad de ciertos conductores que en unas determinadas condiciones no ofrecen resistencia al paso de la corriente. ¡Esto es maravilloso, el sueño de cualquier ingeniero! “¡Para!” te podría decir “no tan rápido vaquero. Para que un cable esté en condiciones de superconductividad tiene que estar muy frío”.

- Lo ponemos en una neverita azul de estas de playa
- No, amigo, mucho más frío
- Que yo no soy tu amigo... ¿en el congelador?
- No, mucho, mucho más frío
- ¿Soria?

Bastante más. En el LHC se usa como cable superconductor una aleación de niobio y titanio que es superconductor por debajo de los 8 grados por encima del cero absoluto, es decir, -265 grados centígrados. Esto es uno de los retos tecnológicos más grandes del LHC, mantener a esta temperatura los 27 kilómetros que tiene el acelerador, formando el sistema criogénico más grande del mundo. En realidad se enfría a 1.9 grados por encima del cero absoluto usando helio líquido para enfriar. ¿Pero no habíamos dicho que valía con 8 grados? ¿Por qué bajar a 1.9? ¿Son ingenieros vascos? No, hay otros motivos relacionados con la superconductividad que hacen que sea más eficiente hacerlo a esa temperatura. Y todo se enfría con helio. El helio fluye por cada uno de los imanes del LHC enfriando de una forma similar a como lo hace tu frigorífico o como se enfría el motor de tu coche. En total se utilizan unos 7 mil kilómetros de cable superconductor

Ya tenemos un prototipo de imán: un tubo de medio metro de diámetro y 15 metros de longitud, mayoritariamente de hierro (buen conductor magnético) y con dos tubos en el centro de unos 5 cm de diámetro cada uno. Rodeando cada tubo tenemos cables superconductores que se enfrían con el helio líquido hasta los -271 grados centígrados. Por estos dos tubitos circulan los protones en los dos sentidos opuestos mientras se aceleran antes de hacerse colisionar mutuamente. Y en el interior de estos tubitos... espacio vacío, unas diez veces mayor que el del espacio exterior, para evitar que nuestros protones choquen con cualquier partícula que pase por ahí. De hecho si algún día te preguntan por el lugar más frío y vacío del Universo tendrás que señalar Ginebra, bajo tierra, en el LHC. Cada imán (técnicamente se les llama dipolos) pesa unas 35 toneladas y en total se necesitan 1232 imanes como este para completar los 27 kilómetros de circunferencia que conforman el acelerador.

Con pilas e imanes podemos montar un acelerador de partículas. De hecho, igual ahora mismo ya no tengas, pero seguro que tu padre o el padre de tu padre sí tuvo un acelerador de partículas en su casa. Los antiguos televisores, aquellos tan grandes, los anteriores a los de pantalla plana, funcionan exactamente como un acelerador de partículas. Un campo eléctrico arranca y acelera unos electrones de un filamento (es lo que se conoce como tubo de rayos catódicos, es la razón de por que estos televisores son tan largos), con campos magnéticos se desvía este haz justo antes de llegar a la pantalla, haciendo que impacten contra esta. El impacto genera un punto de luz. Haciendo un barrido muy rápido por toda la pantalla con los electrones el espectador tiene la sensación de ver una

imagen continua (gracias a lo que se conoce como persistencia de la retina). Claro que es un acelerador de baja energía. Para alcanzar las energías que se logran en el LHC habría que usar 350 millones de televisores, dando la vuelta completa a la Tierra.

Un acelerador de partículas como el LHC tiene un tercer elemento, son los cuadrupolos. Un cuadrupolo es en todo igual a un dipolo (los imanes) pero, como su nombre indica, esta formado por 4 polos en vez de 2. Por lo tanto ya no tenemos una sola espira, sino que tenemos dos espiras, creando dos campos magnéticos perpendiculares entre sí. El efecto de este elemento es muy interesante: en las partes más alejadas del tubo por donde pasan las partículas aparece una fuerza que las empuja hacia el interior; en la parte interna del tubo la fuerza es nula. Con los cuadrupolos lo que se consigue es evitar que los protones se alejen del centro del tubo, los focaliza. Cada vez que un protón se aleja del centro hacia las paredes aparece una fuerza que los devuelve a su camino, es como un pastor con sus ovejas o un profesor de excursión con sus alumnos.

Con unas pilas (cavidades de radiofrecuencia), imanes (dipolos superconductores) y unos cuantos de esos pastores (cuadrupolos) podemos acelerar protones hasta alcanzar casi la velocidad de la luz y hacerlos colisionar. Pero este particular viaje de los protones hasta su colisión en el LHC comienza mucho tiempo atrás, hay que remontarse a los orígenes del Universo. Sí, todos los protones que hay en el Universo, incluidos los de tu cuerpo, se crearon poco tiempo después del Big Bang. Miles de millones de años después estos protones están en todas partes, el núcleo de cualquiera de los átomos del Universo está formado por protones. El aire tiene protones, el agua tiene protones, tú tienes miles de millones de protones... El problema es que estos protones están en el núcleo, junto con otros protones, muchos neutrones y están rodeados por otros tantos electrones. Extraer los protones uno a uno en estas circunstancias se hace complicado. Pero podemos recurrir al átomo más simple que existe, el átomo de hidrógeno. Este átomo está formado por un solo protón rodeado por un electrón. Como arrancar ese electrón es simple podemos conseguir protones a partir de átomos de hidrógeno, el elemento más abundante en el Universo, de una forma muy sencilla.

Muy bien, pero hay un problema y es que ni con los mejores cuadrupolos del mundo podemos encarrilar suficientemente bien los protones para que colisionen uno a uno: los protones son tan pequeños que con la tecnología actual habría que lanzarlos a colisionar 10 mil millones de veces para poder ver una única colisión. La solución es... a lo bruto, si con uno no se puede, pues lanzamos a miles de millones, los agrupamos en paquetes. En el LHC no se acelera un único protón sino que se crean 1000 paquetes de protones que viajan en ambos sentidos con 100 mil millones de protones cada paquete. Un paquete tiene una longitud de pocos centímetros y un diámetro unas diez veces menor que el de un pelo. En conjunto es como un tren formado por mil vagones, donde en cada vagón hay 10 mil millones de pasajeros, los protones. Cuando se enciende el LHC se están lanzando en realidad dos trenes, en sentidos opuestos, hasta que alcanzan la velocidad máxima, el 99.999999% de la velocidad de la luz, con lo que dan la vuelta al acelerador completo 11 mil veces por segundo. Cada "vagón" de este tren está separado de los siguientes por unos 7 metros, alcanzando una longitud total de unos 7 kilómetros. Aunque cada protón tiene una energía muy

pequeña (sus 7 TeV son una millonésima de julio, la energía que tiene un mosquito volando), un paquete de protones tiene la energía de una moto de 150 Kg viajando a 150 Km/h (más de lo que permite la DGT) y juntando todos los paquetes la energía total (365 MJ) es la equivalente a la de un AVE viajando a su máxima velocidad, capaz de fundir 5 toneladas de oro.

Los protones entonces giran en estos tubos mientras se van acelerando en dos haces que viajan en paralelo, sin contacto, como van los coches por la autopista, sin mezclarse los que van por los dos sentidos. Cuando alcanzan la velocidad adecuada se cruzan los haces para que colisionen los protones. En cada colisión del orden de 20 protones de cada paquete de 100 mil millones produce una colisión. Se pueden imaginar este cruce como una de estas batallas épicas, las del Señor de los Anillos, o de la película de Troya, solo que en vez de miles o cientos de miles hay miles de millones de guerreros (unas 15 veces la población mundial). Para decepción del espectador la mayor parte de los guerreros pasa como si nada y solo unos 20 se lían con la espada. Igual habría que imaginarlo como un ejército de adolescentes que en vez de espada llevan un móvil y en vez de flechazos lanzan Twits. Muy pocos muertos vería yo en esta lucha. Claro, una batalla así sería muy aburrida en el cine, pero no en el LHC, porque aunque solo colisionan 20 protones por cruce, como dan 11 mil vueltas por segundo hay sangre para rato. De este modo se van perdiendo protones vuelta a vuelta, hasta que al cabo de unas horas el haz ha perdido tantos que ya no da para seguir colisionando. El haz se desecha y se comienza de nuevo. Hagan cuentas: mil paquetes de 100 mil millones de protones para formar cada uno de los dos haces que se colisiona, que se elimina a las pocas horas para volver a inyectarse nuevos haces, se necesitan miles y miles de millones de protones para poner el LHC en funcionamiento. ¿De dónde sacamos tantos protones? Help!

Tenemos un número de emergencia que nos puede sacar de este atolladero. No, no es el número de protección civil, ni el de los bomberos... es el número de Avogadro:  $6,023 \cdot 10^{23}$  (no llamen, no contestará nadie). Este número nos dice cuántos átomos de hidrógeno hay en un gramo de esta sustancia. Y es miles de millones de veces mayor de lo que necesitamos en el LHC: ¡con una botella de hidrógeno tenemos para hacer colisiones de protones en el LHC unos cuantos miles de años! Obviamente no necesitamos tanto tiempo, pero es un alivio saber que con apenas un gramo de hidrógeno resolvemos nuestro problema. Se estima que en los 60 años de operación del CERN se ha utilizado un total de 9,8 gramos de hidrógeno, ¡suena a tan poco! Claro, esto es debido a que el número de Avogadro, el número de protones en un gramo de hidrógeno, sea tan grande. De hecho piensen que el LHC se llena con apenas un nanogramo de hidrógeno.

Algo así se diseñó en una tarde entorno a 1982, cuando en una conversación entre dos físicos de aceleradores muy reconocidos surgió esta idea de experimento que plasmaron en el reverso de una servilleta, como el fichaje de Messi por el Barça. La propuesta era clara: desarrollar un acelerador de protones, muy grande y con intensos campos magnéticos, para que la colisión sea de alta energía. Con tanta energía acumulada las colisiones recrearían el estado del Universo cuando solo tenía  $10^{-21}$  segundos de vida, cuando tenía una temperatura 100 mil veces mayor que la del interior del Sol. Para alcanzar tales energías se pensó en un acelerador de 27 kilómetros de longitud y estaría formado por unas cavidades de radiofrecuencia para acelerar las partículas (las pilas), más de mil dipolos superconductores de 8 Teslas para hacerlas girar en un

círculo de 27 km de longitud (los imanes) y unos 400 cuadrupolos para focalizar las partículas hacia el centro del tubo (los pastores). La partícula elegida sería el protón, una partícula estable, con carga y suficientemente masiva como para que la radiación sincrotrón no sea excesiva. Además es muy abundante y se consigue de forma muy sencilla a partir del átomo de hidrógeno. Se agrupan los protones en paquetes de 100 mil millones de protones formando dos trenes que viajan en sentidos opuestos en el anillo, como por la M-30 o la línea circular de metro, ocupando una longitud de 7 kilómetros cada uno.

El acelerador estaría en un túnel a 100 metros bajo tierra. El túnel ya existía, se había excavado para el LEP, lo cual abarataba el proyecto. Tenerlo bajo tierra ofrece importantes ventajas: las capas de tierra que lo separan de la superficie sirven para bloquear la radiación (por ejemplo, la radiación sincrotrón de la que hemos hablado) que resulta peligrosa para los humanos; también bloquea los rayos cósmicos e impide que muchos de ellos lleguen a interferir con los instrumentos de medida; es, además, más barato, puesto que no hay que tirar casas abajo, ni expropiar terrenos en esos 27 kilómetros de longitud que tiene; y finalmente el impacto medioambiental es mucho menor, tener un tubo azul gigantesco ahí en medio del campo... pues lo iban a confundir con una rotonda enorme, y luego en España se iban a picar para construir una aún más grande y ya tenemos lío.

Los protones se extraen de una botella de hidrógeno y se inyectan en varios preaceleradores que los impulsan antes de llegar al LHC. Allí finalmente los protones van dando vueltas y aumentando de velocidad, poco a poco, hasta alcanzar el 99.999999% de la velocidad de la luz momento en el que están listos para colisionar, ha llegado el momento de recrear el origen del Universo.

### **Los detectores**

Una vez los protones tienen la energía suficiente se les hace colisionar. En todo momento han viajado los dos “trenes” en sentidos opuestos, sin ningún tipo de contacto por los dos tubos separados, pero ya es hora de chocar. En cuatro puntos de los 27 kilómetros del acelerador los haces se van a cruzar produciendo continuamente colisiones de protones. Esto ocurre en el interior de 4 grandes cavernas, la casa de 4 grandes máquinas, los detectores de partículas.

Sus nombres son ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), ALICE (A LHC Ion Collider Experiment), LHCb y CMS (Compact Muon Solenoid) y son los “ojos” del LHC. Su misión es rastrear los restos de la colisión de protones, analizando todo lo que ocurre en este choque, tomando una “foto” de la colisión. Como ya vimos, al chocar los protones parte de la energía cinética que estos llevan se transforma en materia, en partículas que no son parte de los protones que chocaron. Cada vez que se cruzan los haces, 40 millones de veces por segundo, de unos 20 puntos del haz (chocan en promedio 20 protones por cruce) empiezan a emerger partículas en todas las direcciones. Los detectores tienen que cazar todas las partículas que se producen en la colisión y medirlas para poder estudiar los procesos físicos que han tenido lugar. Como de una colisión pueden salir muchos tipos de partículas, un detector de este tipo tiene que ser sensible a todas ellas, por lo que tiene que estar formado por una combinación de muchas tecnologías. Así, un gran detector como los 4 del LHC es como una cebolla, pero una cebolla cilíndrica, ya que está formado por muchas capas, cada una diseñada para estudiar un tipo de partícula diferente, y en forma de cilindro. De esta manera

tenemos detectores específicos para medir electrones y fotones, otros para estudiar protones y neutrones, un detector para muones... todos ellos se sitúan de forma concéntrica entorno al punto de colisión, para evitar que ninguna partícula escape a la detección. A cada colisión (recuerden, 40 millones de veces por segundo) el detector toma una foto de lo que “ve” permitiendo distinguir de donde vienen todas las partículas que se crean, identificando de qué partícula se trata y determinando su trayectoria. Así un detector de partículas es equivalente a una gran cámara de fotos de unos cuantos megapíxeles.

El corazón de un detector como estos que hemos presentado es siempre un gran imán, algunas veces superconductor. Las partículas que surgen en la colisión salen despedidas en línea recta y a mucha velocidad. Un imán, como ya saben, hace que una partícula curve su trayectoria. La curva que dibuja la partícula será más pronunciada cuanto más lento vaya, así que midiendo el camino que toma podemos saber la velocidad que lleva o lo que es lo mismo, su energía, lo cual, como veremos más tarde, es sumamente importante.

Con todo, los detectores de partículas son máquinas monstruosas, como ATLAS, un cilindro de 22 metros de altura, 44 metros de longitud y 7 mil toneladas de masa; o CMS un cilindro también, más pequeño que ATLAS, de 21 metros de largo, 16 metros de altura, pero más pesado, de 12500 toneladas. Yo he podido bajar a ver ambos detectores muchas veces, a 100 metros bajo tierra, con mi casco, uno se siente una hormiga a su lado. Se ven cables por todos los lados, ordenadores, tarjetas electrónicas, es algo increíble de visitar. Alguna vez tuve que bajar de madrugada, en medio de la noche, a solas con el detector. Viendo todos esos cables y la cantidad de trabajo y esfuerzo que ha llevado hacerlo funcionar es imposible no quedar maravillado. Que tres mil personas (es el número de miembros que tiene la colaboración CMS, de la que fui parte) de diferentes partes del mundo, con diferentes culturas y muchas veces con diferentes ideas, se pongan de acuerdo y trabajen conjuntamente para poner a punto un detector como CMS es algo que sigue poniéndome la piel de gallina cada vez que me acerco al detector. No se entienden en sus lenguas maternas, seguramente sus países no cooperen, incluso algunos serán enemigos, pero la ciencia les une y les hace trabajar con un único fin. Ver cómo cuando dos protones colisionan CMS toma una preciosa foto de la colisión, identificando cada una de las partículas es algo asombroso. Es con cosas como estas con las que uno se siente orgulloso de ser científico.

Por cada colisión el detector es capaz de generar una imagen de lo que ha ocurrido, identificando cada partícula: piones, muones, taos, electrones, fotones... no hay ninguna partícula que escape a la detección. Pero... pensándolo bien, ¿qué interés puede tener detectar un electrón, que se descubrió hace más de un siglo, o un muon, partículas que se conocen hoy muy bien? Y a la vez, ¿no sorprende que haya detectores para electrones y no haya ninguno para bosones de Higgs? Esto me lo han preguntado más de una vez los visitantes que se acercan a conocer el CERN y no puedo evitar sonreírles de vuelta, pensando... ¡ahí has dado en el clavo, amigo!

No hay detectores de bosones de Higgs, o de partículas supersimétricas, o de materia oscura porque estas partículas, por diferentes motivos, no se pueden detectar. Como hemos visto anteriormente muchas de las partículas que existen en el Universo son inestables, algunas son “extremadamente” inestables, como el bosón de Higgs. Esta partícula apenas “vive” una mínima fracción de segundo,

entorno a los  $10^{-25}$  segundos, antes de desaparecer completamente. En ese tiempo, y dado también que se genera en las colisiones en reposo normalmente, no le da para alcanzar ningún detector por lo que su detección directa es imposible. Otras partículas, como las de materia oscura, si existiera, no dejan rastro porque no interactúan con nada, son invisibles, imposibles de observar. Y sin embargo... se ha podido descubrir el bosón de Higgs, y se busca intensamente la materia oscura y otras partículas “fantasma” en los detectores, ¿acaso nos engañan los científicos? O... ¿cómo puede ser esto?

La colisión de protones en el LHC es perfectamente simétrica: a la izquierda y a la derecha de la colisión tenemos lo mismo, dos protones con idéntica energía. Una de las herramientas más importantes de la física son las leyes de conservación, como la conservación de energía, que ya conocen, o la conservación de cantidad de movimiento, lo que viene a ser el producto de la masa de una partícula por su velocidad. Lo interesante de todo esto es que como partimos de una situación perfectamente simétrica, el producto, es decir, la situación después de la colisión, tiene que ser también simétrico: la energía resultante tiene que estar repartida por igual en direcciones contrarias del espacio. Es decir si tengo una partícula muy energética que sale en dirección este, tendremos otra partícula con energía equivalente que sale hacia el oeste; si hay otra que va hacia el norte, habrá otra similar viajando al sur... Si no la hay, bien puede ser que se están rompiendo todas las reglas de la física conocida, las sagradas (para los físicos) leyes de conservación del movimiento, o bien hay una partícula que no podemos ver, que no hemos detectado, pero que está ahí. Quizás les sorprenda esta forma de proceder, dirán “ya se están inventando excusas para salvar las leyes de conservación...”. Vale, es justo que piensen así, y estaría de acuerdo si fuera algo puntual, pero esto es algo que si se repite continuamente, si se observa muchas veces y apoyado en otras medidas, puede servir para confirmar que la ausencia de algo también es una forma de “ver” ese algo. Así se dedujo la existencia por ejemplo del neutrino, predicha por Wolfgang Pauli en 1930 para “salvar” la ley de conservación de energía 25 años antes de que se detectara directamente; o Neptuno, cuya existencia se intuyó por alteraciones en la órbita de Urano antes de poder ser observado; como ocurrió con las ondas gravitacionales antes de que se midieran en 2016, o como ocurre con la materia oscura, que se sabe que existe aunque nunca se ha “visto”. Hay muchas forma de “ver” en ciencia, y cuando se tiene mucha confianza en una ley, como ocurre con las leyes de conservación, aparecen nuevos sentidos con los que podemos explorar la naturaleza.

Con esto justificamos la detección de partículas “fantasma” como los neutrinos, la materia oscura y otras partículas “fantasma” que podrían existir, como algunas partículas supersimétricas. Pero, ¿y qué me dicen de la detección de partículas inestables, como el bosón de Higgs? La importancia de este punto requiere mención a parte. Todas las partículas inestables cuando se desintegran dejan en su lugar diferentes partículas. Del mismo modo que cuando una granada estalla en pedazos, de la explosión aparecen en todas las direcciones trozos de la granada, cuando una partícula “estalla” surgen a partir de ella otras partículas que se dispersan en todas las direcciones. El espectáculo es muy parecido al de los fuegos artificiales, con muchos brazos que surgen después de la explosión del cohete. Estos brazos son partículas conocidas, como fotones, electrones, piones, neutrinos... Así un bosón de Higgs es como uno de esos cohetes, al poco tiempo de volar ya está explotando dando lugar a muchas partículas. Por ejemplo, podría

producir 4 electrones, o 4 muones, o dos electrones y dos muones... Es lo que se conoce como canal de desintegración (el canal electrónico, el canal muónico...). La principal diferencia entre los fuegos artificiales y el bosón de Higgs (o cualquier otra partícula inestable) es que mientras en los fuegos artificiales un mismo cohete siempre produce el mismo resultado de luces y colores, la desintegración del bosón de Higgs produce diferentes partículas, nunca las mismas, son los efectos cuánticos, la mecánica cuántica, esa teoría de probabilidades. Imagínense la situación, lanzas un cohete y sale una palmera roja, aplaudimos. Lanzamos el mismo cohete... ¡y sale una palmera azul! O peor, unas chispitas amarillas... ¡O nada en absoluto! Cada vez se obtiene algo diferente... así es la mecánica cuántica.

Pero no es todo tan caótico, aunque lo parezca. Si es cierto que nunca podemos saber el resultado preciso de una desintegración, estadísticamente la situación es mejor. En conjunto podemos saber el porcentaje de veces que se va a dar cada uno de los tipos: si lanzamos un cohete cuántico no sabremos si el resultado será una palmera roja o azul, pero sí sabemos que igual la roja se produce el 20% de las veces y la azul el 10%. Esta información es muy útil y la conocemos gracias a que tenemos una teoría que explica con mucha precisión el mundo cuántico. Genial. Entonces si sabemos que un bosón de Higgs se desintegra un 20% de las veces dando lugar a 4 electrones habrá que buscar entre los productos de la colisión 4 electrones. Es por esto por lo que tenemos un precioso detector de electrones en todos los experimentos, para cazar los electrones que se producen en la desintegración de partículas inestables, como el bosón de Higgs.

Vamos por buen camino, tenemos un detector de electrones que identifica cada electrón que se produce en la colisión y cuando se detecten 4 electrones que vienen del mismo punto... ¡zas! Lo hemos cazado. No es tan fácil porque hay muchos procesos que producen 4 electrones, podríamos caer en lo que se conoce como la falacia del consecuente: si llueve, el suelo se moja; el suelo está mojado luego... ¿ha llovido? No necesariamente. Esto hace que la situación sea muy compleja puesto que hay muchos procesos que producen electrones. Y la vida no puede ser más dura para un pobre friki científico... porque los procesos que producen 4 electrones que no vienen de un bosón de Higgs son muchísimo más frecuentes que los producidos por este. Esto es debido a que se generan muy pocos bosones de Higgs, algo así como uno por segundo, que no es nada en colisiones que se repiten 40 millones de veces por segundo. Tenemos un mar de impostores, procesos que parecen ser bosones de Higgs pero que no lo son, es como hacer una rueda de reconocimiento policial con mil chinos, o como encontrar a Wally en el Vicente Calderón, hablamos de algo muy difícil. Sin más que medir el volumen de una aguja y el de un pajar, y compararlo con el número de veces que tenemos sucesos impostores frente a las veces que tenemos el suceso buscado, podemos concluir que buscar un bosón de Higgs en las colisiones del LHC es como buscar una aguja en un millón de pajares.

Pero no todo está perdido porque los científicos somos incansables y ningún pajar va a detenernos. Además no todo está perdido porque hay una forma de filtrar, de ir descartando impostores poco a poco hasta acorralar al bosón de Higgs. Y es que esos electrones que vienen de la desintegración del bosón de Higgs guardan en sus propiedades características que indican que vienen indudablemente de esta desintegración, no pueden ocultar su pasado. Por ejemplo, como la energía se conserva y la masa es energía, los 4 electrones que



vienen de la desintegración de un bosón de Higgs tendrán tal energía que sumada será igual a la masa del bosón. Es por esto por lo que medir la energía de las partículas es tan importante, nos da muchísima información sobre los procesos que tienen lugar en la propia colisión.

Gracias a técnicas como esta y alguna más complicada es como el 4 de julio de 2012, 3 años después de la puesta en marcha del acelerador, los representantes de los experimentos CMS y ATLAS anunciaron el descubrimiento del bosón de Higgs. Se tardó 3 años en analizar todos los datos de millones y millones de colisiones, tuvieron que acumularse miles de bosones de Higgs para estar seguros de que detrás de esos 4 electrones, esos 4 muones y con cada canal de desintegración, había un bosón de Higgs. Y fue gracias al trabajo de más de 3 mil personas (esto solo en los experimentos CMS y ATLAS, sin contar todos los ingenieros, físicos y técnicos del LHC), al talento y dedicación de tantos científicos, que finalmente se pudo dar caza a una partícula que se resistía a ser descubierta durante más de 40 años.

Y es así como se descubren nuevas partículas hoy en día, no solo el bosón de Higgs sino otras partículas esquivas como podrían ser las partículas supersimétricas, los microagujeros negros, las dimensiones extra, la materia oscura y otras tantas partículas que podrían estar ahí y que ni siquiera imaginamos. Descubrir partículas en el siglo XXI es un proceso muy lento, meticuloso, que requiere mucho trabajo y repetición, máquinas muy precisas, mentes muy creativas y un toque de suerte que siempre está detrás de todo proceso científico.

## **EL CERN**

Como ya vimos el CERN es mucho más que el LHC, es una ciudad de la ciencia, una metrópolis de frikis, y con muchos experimentos en física de partículas. Es verdad que el LHC es el más importante y el que concentra más cantidad de recursos, económicos y humanos, pero hay otros experimentos en el CERN que merecen la atención.

De la fábrica de antimateria, el AD, ya hablamos en el capítulo sobre la antimateria, al igual que sobre AMS, el módulo de la Estación Espacial Internacional que estuvo un tiempo instalada en el CERN. Menos se ha hablado de CAST, un experimento que busca axiones, un candidato a materia oscura, producidos en el Sol. Con un dipolo del LHC se apunta al Sol, una supuesta fuente de axiones. Los axiones al llegar al dipolo, donde se encuentran un potente campo magnético, se desintegrarían en fotones, que pueden ser medidos con unos detectores.

También se investiga en neutrinos, esas partículas que atraviesan toda la materia sin apenas dejar rastro. El experimento se llama CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso) donde se producen neutrinos gracias a colisiones de protones contra un blanco. Mientras que las demás partículas son absorbidas tarde o temprano por la tierra, los neutrinos atraviesan todo lo que ven hasta llegar a un detector a más de 700 kilómetros de distancia, en el laboratorio de Gran Sasso, en Italia. Si los protones antes de chocar van a mucha velocidad y apuntan en la dirección correcta, los neutrinos saldrán enfocados hacia el laboratorio italiano, donde algunos de ellos, muy pocos, dejarán su huella en el detector.

Otro de mis favoritos es ISOLDE (Isotope mass Separator On-Line facility), una colaboración internacional que estudia isótopos radiactivos que son creados en

este experimento. Con ISOLDE se logra el antiguo sueño de los alquimistas, el de la transmutación de elementos, con lo que se puede estudiar átomos exóticos, algunos que solo existen en las condiciones más extremas, como en el interior de las estrellas.

Estos son algunos de los experimentos que se llevan a cabo en este gran laboratorio. Aunque no todo en el CERN es investigación fundamental (no aplicada), también hay lugar para la innovación y la tecnología. Muchas de los avances tecnológicos que tienen lugar en los experimentos pueden aplicarse en distintas industrias que se benefician directamente de las investigaciones que tienen lugar en los laboratorios de física. Cuando se habla de aplicación, transferencia tecnológica o retorno industrial de la investigación básica en muchos lugares del mundo se pone como ejemplo lo que ocurrió en 1990 en el CERN. En aquel entonces acababa de ponerse en marcha el Large Electron Positron Collider (LEP) el que era en aquel entonces el acelerador de partículas más potente del mundo. Y nuevos experimentos traen nuevos retos, en este en particular se trataba de una gran colaboración internacional de científicos, de muchos rincones del mundo trabajando en un experimento localizado en Suiza. Los científicos llegaban, hacían su trabajo como mejoras en los detectores, ajustes en el acelerador, o simples pruebas y volvían a sus laboratorios o universidades nacionales. En estas condiciones la colaboración entre científicos era muy complicada y era quizás la primera ocasión en que esta situación era tan evidente. Un ingeniero del CERN, Tim Berners-Lee, se percató de esta situación: los libros no resultaban adecuados para llevar un registro preciso de estas operaciones, mucha información se perdía en el camino y no era fácil encontrar la información que cada uno buscaba. Por suerte en aquella época ya existían los primeros ordenadores personales, el mundo se estaba informatizando e incluso ya se había desarrollado en Estados Unidos un nuevo método de comunicación entre ordenadores, lo que conocemos como internet. Siendo consciente de esta situación, Tim desarrolla un nuevo protocolo para el intercambio de información, un servicio de ventanas donde la información estaría alojada en un servidor central que sería accesible desde otros ordenadores. Esta propuesta la recibió su supervisor que la marcó como “vague but exciting” (incompleto pero excitante) iniciando una nueva era en la historia del hombre, la de la información y la comunicación, había nacido la World Wide Web. Poco después crearía el primer navegador, la primera página web ([info.cern.ch](http://info.cern.ch)), el primer servidor (un ordenador NEXT). El resto es una historia que ya conocen, la multiplicación de servidores, aparecen múltiples servicios web, buscadores, navegadores, gifs de gatitos, mails que venden viagra,... Sería muy difícil imaginar un desarrollo tecnológico que haya tenido el efecto que tuvo la creación de las www en nuestra vida cotidiana, y más difícil imaginar aún que venga motivada por un experimento en física de partículas. Cada vez que ponen “www” en su navegador den gracias a que fue un desarrollo del CERN, un centro público y sin ánimo de lucro, donde todas las investigaciones son abiertas y las aplicaciones que surgen gratuitas para el uso ciudadano. Gracias CERN.

Y esto es solo un ejemplo, como las pantallas táctiles (también desarrolladas en el CERN) o las múltiples aplicaciones que tiene la investigación en aceleradores en la medicina, especialmente en los tratamientos contra el cáncer. O en computación. La cantidad de información que se genera en las colisiones del LHC es tal que se requieren nuevos sistemas de tratamiento de datos. Por segundo se

generan 40 TB de datos (una colisión ocupa algo así como 4 MB). Por suerte muchos de estos datos no requieren ser almacenados y pueden ser eliminados, dejando solo aquellos que dieron resultados más interesantes. Aún así, tras este filtrado, se producen unos 15 Pb (Petabytes) de datos en un año de colisiones, lo mismo que ocupan todos los vídeos de YouTube que se suben en un año, se necesitarían unos 20 millones de CDs para almacenar esta información, formando una columna de 20 kilómetros de alto. Para los datos que se producen en las colisiones se usa lo que se conoce como GRID, un sistema de computación distribuida. Es una red mundial de centros de computación, que comparten tanto capacidad de procesamiento como cinta para almacenar información. En GRID hay 160 centros conectados de 35 países distintos formando una red jerarquizada donde el CERN está en la punta de la pirámide. Uno de los 9 centros en el segundo nivel de esta pirámide está en Barcelona. En total se cuenta con más de 250 mil *cores*, que ejecutan unos 2 millones de códigos al día, incluso el día 31 de diciembre a las 23.59 hay gente mandando “scripts” al GRID. Eso lo he visto yo con mis propios ojos.

Todos estos datos sobre el impacto de la investigación básica en la ciudadanía y el desarrollo invita a reflexionar. Hace unos años, en 2012 concretamente, se propuso a nivel político un importante recorte en investigación y desarrollo (I+D). Entre las medidas que estudiaba la Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación (lo que queda como máximo organismo en ciencia ahora que no hay ministerio) se encontraba la salida de España de grandes centros de investigación internacionales, como el CERN, al considerarla una inversión, literalmente, “de dudoso retorno”. Con estas declaraciones tan intencionadas se ponía contra las cuerdas a la física de partículas en España, un campo de investigación que ha estado creciendo y consolidándose continuamente en estos más de 50 años de existencia, donde España siempre ha aportado grandes investigadores y científicos además de ser un elemento fundamental en el desarrollo de detectores y sistemas de medida en la mayoría de colaboraciones internacionales en física de altas energías. Con la retirada de España del CERN sería muy difícil la supervivencia de los pocos grupos de física de partículas que existen en nuestro país, produciendo una retirada masiva de científicos de este campo o lo que ya se lleva viendo unos cuantos años, el éxodo a otros países. La situación es grave, España no sólo es el único país moroso del CERN (paga su cuota con un año de retraso) sino que con estas declaraciones se pone en duda algo que es indiscutible en todos los países de mayor desarrollo económico del mundo: los países que más invierten en investigación son los que más prosperan. No hay más que ver los datos, el CERN produce una rentabilidad de entorno a un 300%: patentes, retornos industriales...; los países que más apuestan por la ciencia son los que se muestran más resistentes a la crisis económica, y los que antes salen de ella; al final los países más ricos son los países que invierten más y de forma más continuada en ciencia.

La ciencia y el conocimiento no se detienen, cientos de experimentos aguardan un golpe de suerte, o una idea brillante para volver a deslumbrarnos con un nuevo descubrimiento. Vamos respondiendo preguntas, resolviendo enigmas, dando pasitos hacia delante, abriendo nuestra mente, derrumbando barreras y descifrando los grandes misterios que esconde la naturaleza, mientras otros nuevos van apareciendo. Mientras grandes noticias como la detección de las ondas gravitacionales o el descubrimiento del bosón de Higgs siguen

deslumbrándonos yo me pregunto... ¿qué será lo próximo que descubriremos? ¿quién será el nuevo Einstein?

### **¿Y ahora qué?**

Es una de las preguntas que más me repiten en las entrevistas: ahora que se ha descubierto el bosón de Higgs... ¿qué hace un físico de partículas? Pues además de responder a preguntas como esta, la labor de un físico de partículas no se detiene con el descubrimiento del bosón de Higgs.

Descubrir algo en física es siempre el primer paso dentro de una labor de investigación apasionante. Cuando se descubrió el bosón de Higgs surgieron muchas preguntas de forma inmediata: ¿es el bosón de Higgs que se predijo hace 50 años o tiene propiedades diferentes?, ¿se comporta como esperábamos?, ¿habrá más bosones como este? Esto hace que tras el descubrimiento de una partícula siga una fase intensa de estudio de esta partícula, caracterización y análisis de sus propiedades. Esta fase puede durar varios años, hasta que se han podido estudiar en detalle estos aspectos, y es muy importante porque de no ser exactamente igual de lo que se había predicho podría abrir nuevas vías de investigación: en las anomalías podría haber pistas sobre nuevos fenómenos físicos que nunca se han observado.

Además de esto, como hemos visto anteriormente, cada vez que se responde una pregunta que antes estaba abierta normalmente surgen otras nuevas, muchas veces aún más difíciles de responder que la anterior. Es este el modo en el que avanza la ciencia. El descubrimiento del bosón de Higgs confirma la validez del Modelo Estándar, pero nos hace preguntarnos ¿qué habrá más allá del Modelo Estándar? Sabemos que el Modelo Estándar es incompleto y es por esto por lo que se buscan extensiones de este modelo que lleven a una comprensión mayor del Universo. Algunas de estas extensiones predicen que el bosón de Higgs encontrado no es sino el más ligero de toda una familia de bosones similares al bosón de Higgs. ¿Existirán otros bosones de Higgs con más masa? No lo sabemos pero merece la pena buscarlos.

Junto a las nuevas preguntas que surgen queda también el reto de responder las que ya existían. Preguntas que ya hemos analizado profundamente en este libro como: ¿qué ocurrió con la antimateria al inicio del Universo, dónde está?, ¿qué es la materia oscura, podemos producirla en el laboratorio?, ¿qué ocurrió en las primeras fracciones de segundo después del origen del Universo?, ¿cómo se expande el Universo y cuál es su futuro?, son algunas de ellas. Para responder a estas preguntas surgen teorías, como la teoría de cuerdas, o la supersimetría, que aguardan por experimentos que puedan confirmar su validez.

Ojalá en una colisión del CERN se pueda ver una partícula de antimateria, o una partícula supersimétrica. Igual algún día se puedan ver los efectos de las cuerdas o se cree un microagujero negro que nos abra las puertas a una futura teoría de la gravedad cuántica. En el CERN y en otros laboratorios en todo el mundo se sigue buscando e investigando, seguimos guiándonos por la curiosidad y el deseo de saber y se siguen superando retos y alcanzando nuevas metas. Laboratorios que necesitan nuevas ideas, nuevas mentes creativas, nuevos científicos y científicas que nos permitan avanzar y seguir resolviendo los misterios del Universo.

El día en que uno de estos grandes enigmas sea finalmente resuelto puede estar cerca, o puede ser lejano, pero seguramente acabará llegando, un día en el que demos un pasito más en la comprensión de nuestro mundo, nuestro Universo, un pasito que puede ser tú quien lo dé por todos nosotros