

El CERN (Centro Europeo de Investigación Nuclear) es el laboratorio de física de partículas más importante del mundo y, sin duda, es el ejemplo de cooperación científica europea e internacional de mayor éxito, no sólo por los resultados de sus investigaciones, sino también por su marco organizativo y su integración de las ciencias y tecnologías más avanzadas. El CERN ha contribuido decisivamente a una extensión prodigiosa de las fronteras del conocimiento científico en sus 40 años de actividad teórica y experimental, al tiempo que ha impulsado el desarrollo de un acervo de tecnologías avanzadas, en campos tales como aceleradores, ultravacío, superconductores, electrónica y mecánica de precisión, etc.

España ingresó en el CERN en 1962, a los 10 años de su creación, retirándose en 1968 y volviendo a reingresar en 1982. Actualmente, unos 300 físicos teóricos y experimentales españoles colaboran con el CERN a un nivel similar al de otros miles de físicos europeos. La industria española ha suministrado equipos y participado en la construcción del acelerador LEP, en la pasada década, y ha comenzado estudios y prototipos para el LHC (Large Hadron Collider) propuesto, como se mostró en el pabellón del futuro de la Expo'92 de Sevilla, al que el CERN contribuyó significativamente. Recientemente, el Gobierno español había ofrecido albergar un acelerador relativamente pequeño, pero de mayor precisión que el LEP, denominado "Fábrica de Taus", para producir y detectar un elevado número de estas partículas elementales a altas energías, encargando al CERN el proyecto correspondiente, que fue presentado en junio de 1992. Sin embargo, tras los cambios del equipo de dirección científica del Ministerio de Educación y Ciencia de otoño del 92, éste retiró la propuesta y solicitó una reducción de la cuota española que se adeudaba desde 1991.

El interés científico y tecnológico para España de esta Fábrica de Taus ha sido subrayado por la carta abierta que han dirigido 14 premios Nobel de Física al Presidente del Gobierno español, que se reproduce en la sección de noticias de esta Revista, ampliando la información técnica del artículo monográfico de dos físicos del grupo de diseño que publicamos a continuación. Como profesionales del sector nuclear e interesados en la convergencia científica y tecnológica, nos preocupa el fondo y la forma de esta contradicción. En el fondo, porque supone un retroceso en la participación española en uno de los proyectos y organismos científicos europeos de mayor impacto estratégico en la ciencia y tecnología básicos. En la forma, porque no se han dado explicaciones suficientes, evidenciando la prevalencia de las luchas internas en el reparto de los presupuestos de I+D, sin criterios objetivos, que conducen al reparto indiscriminado, en detrimento de los necesarios grandes proyectos de excelencia y arrastre. Asimismo nos preocupa el desánimo que estos vaivenes producen en los científicos y técnicos españoles que participan en los centros europeos e internacionales, que ya de por sí son muchos menos de los que serían necesarios.

JUNTA DIRECTIVA DE LA SNE

Carlos FERNANDEZ FIGUEROA es Graduado en Ciencias Físicas por la Universidad de Salamanca. En 1987 es becado por el CIEMAT, donde trabaja en el grupo de Física de Partículas. En 1989 obtiene un contrato del CERN para trabajar en Física de Aceleradores. Desde 1992 ha formado parte del grupo de diseño de la Tau-Charm Factory en el CERN.

LA FABRICA DE TAUS

C. FERNANDEZ-FIGUEROA - J. GALVEZ

José GALVEZ es Graduado en Ciencias Físico-Matemáticas en Moscú. En 1982 ingresa a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima) como docente de la Facultad de Ciencias Físicas. Desde 1984 trabajó durante varios años en la Universidad Nacional de Ingeniería (Lima). En 1989 obtuvo un contrato del World Laboratory para trabajar en el CERN. Desde 1992 ha formado parte del grupo de la Tau-Charm Factory en el CERN.

INTRODUCCION

La física de partículas tiene por objeto el estudio de los más pequeños componentes de la materia de los cuales el mundo y nosotros mismos estamos constituidos. En este siglo se han realizado los descubrimientos más sorprendentes. Empezaron a construir máquinas capaces de producir haces de protones y de electrones y acelerarlos a muy altas energías, llamadas aceleradores de partículas. Los resultados de su utilización revelaron la existencia de más de 200 partículas. Aunque éstas parecieran ser fundamentales, existía aún la convicción de estar frente a una

complejidad que ocultaba elementos más simples aún no detectados. Y así fue: se descubrieron los quarks. Se sabe hoy que el protón, el neutrón, el pión, el kaón y muchas otras partículas están, de hecho, constituidas por otras más pequeñas, los quarks y sus correspondientes antiquarks. Los resultados experimentales actuales muestran que el universo parece estar constituido por seis tipos de quarks agrupados en tres familias: la primera, "up" y "down"; la segunda, "charm" y "strange", y la tercera "top" y "bottom". La primera familia se encuentra en la materia habitual (protones y neutrones), mientras que los otros se generan en colisiones como las que

QUARKS

Top
Bottom
Charm
Strange
Up
Down

LEPTONS

Tau neutrino
Tau
Muon neutrino
Muon
Electron neutrino
Electron

Produced in
Particle
Accelerators
and
the
Cosmos



F I Los componentes fundamentales de la materia han sido catalogados en dos categorías: los quarks y los leptones.

ocurren en los aceleradores de partículas o que tuvieron lugar en el origen del universo.

Por otra parte, existen otras partículas elementales denominadas leptones, de momento invisibles. Los leptones son el electrón (e^-); el muón (μ); el tau (τ), una partícula mucho más pesada que las otras dos, y los neutrinos correspondientes a los tres leptones anteriores (ν_e , ν_μ , ν_τ), que carecen de carga eléctrica y, aparentemente, de masa. El electrón, el muón y el tau, con sus correspondientes neutrinos, integran, junto con las parejas de quarks, cada una de las familias (Fig. 1).

Entre estas partículas, el quark top aún no ha sido descubierto. Tampoco el neutrino tau ha sido detectado directamente, si bien sus propiedades han podido deducirse a partir de la desintegración de los leptones tau. Existen, además, tres componentes sobre los cuales, aunque ya descubiertos, aún nos queda mucho por aprender: los quark charm y bottom y el leptón tau.

Identificar las partículas elementales es sólo la mitad de la tarea, la otra mitad consiste en comprender las fuerzas que actúan entre ellas y que dan lugar a las diferentes formas de materia que conocemos. Parece haber cuatro tipos básicos de fuerzas, que pueden caracterizarse por su diferente intensidad: la gravedad, la fuerza débil, la fuerza electromagnética y la fuerza fuerte. La gravedad es la menos intensa, pero es predominante a grandes distancias, atrayendo las estrellas y galaxias en el cosmos. La fuerza electromagnética tie-

ne un gran alcance y es mucho más intensa, de ella depende la cohesión interatómica. En cambio, la fuerza débil y la fuerte actúan a distancias del tamaño de un núcleo. La fuerza débil rige las reacciones nucleares como las que se producen en el sol. La fuerza fuerte es la más intensa que conocemos y mantiene unidos, los quarks dentro del protón y del neutrón.

Las fuerzas no son un simple concepto abstracto, sino que cada una de ellas está asociada con una o más partículas fundamentales llamadas "bosones gauge". Estos bosones actúan como mensajeros, transportando la fuerza de interacción entre dos partículas. En el caso de la gravedad, el bosón mensajero es el gravitón, aún no observado; en el electromagnetismo es el fotón. La fuerza débil es transportada por las célebres partículas W y Z, descubiertas por Carlo Rubbia y sus colaboradores en el CERN, en 1983; la fuerza fuerte está mediada por los gluones, descubiertos en 1979 en el anillo de almacenamiento PETRA, de DESY, Alemania.

Las cuatro fuerzas parecen comportarse de manera diferente en la materia común. En cambio, a energías elevadas, las fuerzas electromagnética y débil se funden en una sola llamada fuerza "electrodébil". Este descubrimiento ha estimulado a los físicos a investigar si todas las fuerzas podrían unificarse en una sola a muy alta energía, tal como la que existió al principio del universo.

Los quarks, los leptones y los bosones gauge están contenidos en una teoría conocida como "Modelo Estándar". Se

llama así porque explica cada hecho experimental establecido y puede realizar predicciones susceptibles de ser verificadas experimentalmente. Una de estas predicciones consiste en la existencia de una nueva partícula elemental, el "Higgs", propuesta por Peter Higgs de la Universidad de Edimburgo. El Higgs sería el responsable de generar las masas de todas las partículas elementales.

MOTIVACIONES FISICAS

A pesar del gran éxito del Modelo Estándar, aún quedan muchos problemas importantes por resolver. Por este motivo, es necesario realizar más experimentos con aceleradores. Casi todos los aceleradores recientes o en proyecto son del tipo "colisionador", es decir, son anillos de almacenamiento en los que se hacen colisionar frontalmente dos haces que circulan en sentido contrario. La mayor parte de las veces, los dos haces se cruzan sin que se produzca interacción alguna, pero de vez en cuando una partícula de un haz interacciona con una partícula del otro haz y de la violenta colisión se libera una energía que queda disponible para la creación de otras partículas.

Los colisionadores se van desarrollando en dos direcciones complementarias. La búsqueda de nuevas partículas elementales de alta masa, incluyendo las que puedan esconderse dentro de los quarks, o los leptones, requiere máquinas de mayor energía, como HERA en DESY, LEP y el propuesto Large Hadron Collider (LHC) en el CERN.

Por otro lado, para entender el comportamiento de las partículas ya conocidas, se requieren máquinas de mayor luminosidad (mayor intensidad), llamadas "fábricas" (por la abundancia de partículas producidas). Estas fábricas son, de hecho, microscopios de alta resolución que permiten estudios muy precisos sobre los más ínfimos detalles de las partículas seleccionadas. La Tau-Charm Factory es una de estas máquinas.

La Tau-Charm Factory es un colisionador electrón-positrón de doble anillo con un detector ubicado en el lugar donde se producirán las colisiones. La Tau-Charm Factory producirá cantidades ingentes de tres componentes fundamentales —el leptón tau, el neutrino tau y el quark charm— mediante colisiones entre electrones y positrones a una energía determinada, que es justamente la necesaria para crear parejas de leptones tau (que a su vez generan neutrinos tau) y parejas de quarks charm, pero no la suficiente como para crear partículas más pesadas que, de producirse, podrían no dejar ver las más sutiles características de las

partículas tau y charm. Una vez creadas, las parejas de taus y de charm sólo sobreviven durante un breve instante (una diez billonésima de segundo), para después desintegrarse espontáneamente en partículas más ligeras. Son los restos del charm y del tau los que son expulsados de la colisión para ser capturados y medidos por el detector. Así como las medidas precisas de los pesos de los elementos en los compuestos llevaron al descubrimiento del átomo hace doscientos años, del mismo modo las medidas del tau y del charm pueden proporcionar información esencial para nuestra visión de las partículas elementales y de las fuerzas que rigen su comportamiento.

El estudio del comportamiento del tau y del charm permitirá a los físicos de partículas comparar de forma minuciosa los resultados de sus experiencias con las predicciones teóricas del Modelo Estándar, para alcanzar así una mejor comprensión de la realidad. Por ejemplo, el Modelo Estándar predice que los productos de desintegración de un leptón tau contendrán siempre un neutrino tau, hecho que los experimentos actuales no contradicen. Pero, ¿qué sucedería si uno de cada millón de leptones tau no produjera un neutrino tau?; sólo una Tau-Charm Factory podrá descubrir esta "aguja en el pajar", obligando así a refinar sustancialmente el Modelo Estándar. Uno de los principales objetivos de la Tau-Charm Factory será buscar indicios de que el neutrino tau es una partícula con masa. Esta duda es de especial interés, pues los neutrinos son actualmente la justificación dada por los cosmólogos para explicar la misteriosa razón por la cual el 90% de la masa del universo no es observable.

Otro ámbito de gran importancia que será igualmente objeto de estudio en la Tau-Charm Factory, lo constituyen las pruebas que deben efectuarse para descubrir las posibles sutiles diferencias entre partículas y antipartículas, efecto conocido como "violación de la simetría CP". Este efecto, de gran interés en cosmología, podría haber sido el responsable de decidir que el universo, a sus 10^{-35} segundos de vida estuviera hecho de materia en vez de antimateria.

La Tau-Charm Factory aportará nuevos conocimientos sobre las fuerzas electrodébil y fuerte. En particular, podría producir un nuevo tipo de materia compuesta únicamente de gluones, sin ningún quark.

Uno de los experimentos más interesantes investigará la transformación espontánea de un tipo de partícula "encantada" (que contiene el quark charm entre sus componentes), en otra. El Modelo Estándar afirma que este fenómeno puede producirse muy raramente, por lo cual la observación de un número eleva-

do de casos constituirá un nuevo campo de trabajo.

ACELERADOR

El complejo experimental de la Tau-Charm Factory está constituido por un acelerador o cadena de inyección, en donde se generan los haces de electrones (e^-) y positrones (e^+), llamadas partículas primarias, y un colisionador compuesto por dos anillos que se interceptan en un punto donde se hacen chocar los haces, produciéndose de esta manera una gama de otras partículas llamadas secundarias. En este punto es donde se ubica el detector, encargándose de observar estas partículas secundarias y enviar esta información a un sistema de ordenadores.

Las características más importantes son:

- El rango de energías en el centro de masa es de 3.0 a 5.0 GeV.
- La luminosidad de diseño es de $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a 4.0 GeV.

A continuación se describen con más detalle los distintos elementos.

INYECTOR

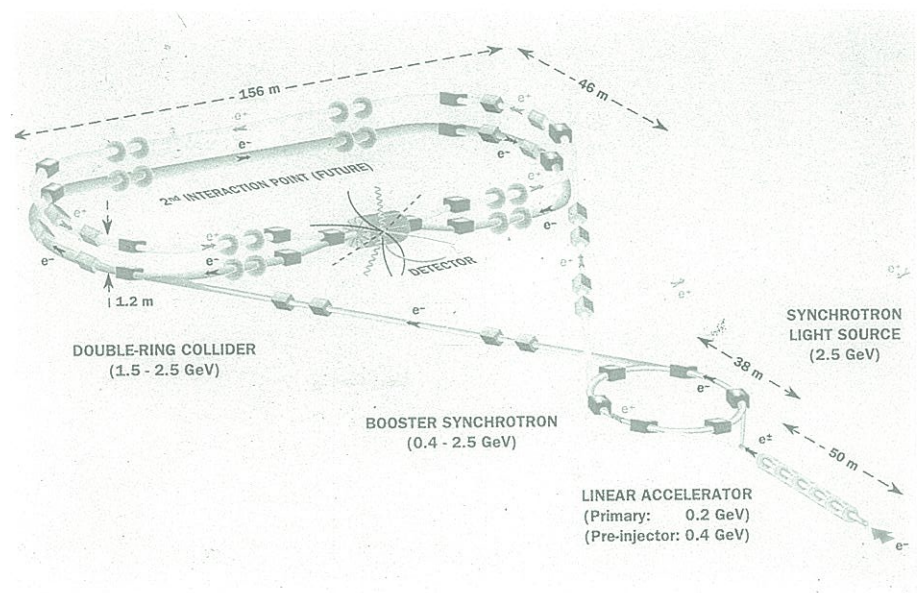
La cadena de inyección consta de un acelerador lineal (linac) de 200 MeV para la producción de los electrones y los positrones, seguido de un segundo linac

de 400 MeV y por último de un sincrotrón tipo "booster". Aquí se aceleran las partículas y, una vez alcanzada la energía de trabajo (hasta un máximo de 2,5 GeV) pueden ser transferidas al colisionador para ser acumuladas. Esta operación se repite hasta que cada anillo está lleno con 30 paquetes de $1,5 \times 10^{11}$ partículas cada uno, lo que corresponde a una corriente de haz por anillo de 0,6 A. Cuando los anillos del colisionador están llenos, los dos haces pueden entrar en colisión. La toma de datos se efectúa hasta que las corrientes de los haces disminuye, momento en que se debe inyectar nuevo haz. Con objeto de preservar un valor medio de la luminosidad elevado, y con una vida media estimada de dos horas, se ha fijado un tiempo de llenado de diez minutos para los positrones y del orden de un minuto para los electrones.

COLISIONADOR

El colisionador opera con dos haces de igual energía, uno de electrones y otro de positrones, inyectados según la figura II, de forma que ambos haces deben efectuar una vuelta completa al anillo antes de colisionar, con objeto de minimizar el fondo en el detector durante la inyección. Cada uno de los anillos, de 360 m. de longitud, está formado por dos arcos y dos secciones rectas; cada arco consta de 10 celdas regulares de tipo FODO y de dos supresores de dispersión (cada uno formado por tres celdas). Ambos anillos convergen en la

F II Disposición del complejo de aceleradores de la Tau-Charm Factory.



sección recta experimental donde se sitúa el detector. Los haces se separan verticalmente por medio de un campo electrostático. En el lado opuesto a la sección experimental hay otra sección recta, utilizable para colocar cavidades de radiofrecuencia, correctores, instrumentación, etc. El aumento de la luminosidad, con respecto a otras máquinas en el mismo rango de energías, es debido fundamentalmente a una mayor corriente almacenada y a una focalización más fuerte en el punto de interacción. La elevada corriente se consigue con 30 paquetes de partículas en cada anillo. Imanes de tipo "wiggler" mantienen una gran emitancia en el haz para permitir que colisionen elevadas corrientes. El diseño de dos anillos separados evita colisiones parásitas, así como efectos perturbadores entre ambos haces. La fuerte focalización de cada haz se alcanza por medio de dos cuadrupolos superconductores, próximos al punto de interacción -80 cm. de cada lado-, haciendo que los paquetes de partículas colisionen frontalmente. Estos cuadrupolos están dentro de un criostato común, pudiendo ser rotadas sus bobinas independientemente, con objeto de compensar el acoplamiento betatrónico inducido por el solenoide de 1.2 T del detector. Por otra parte, el tamaño del paquete

debe ser pequeño, lo cual se logra operando con cavidades superconductoras de 400 MHz y un voltaje de aceleración de 12 MV por anillo. Estas cavidades debe restituir la energía perdida por cada haz y por vuelta estimada de 130 keV. Potentes sistemas de refrigeración y de vacío asegurarán las condiciones normales de la operación; estos deben corregir el calentamiento y la desgasificación del tubo de vacío causados por la radiación sincrotrón y por las pérdidas de modos parásitos.

Finalmente, se dispondrá una variada gama de dispositivos instrumentales con objeto de suprimir las inestabilidades que podrían reducir la corriente máxima almacenada y, por ende, la luminosidad.

DETECTOR Y TOMA DE DATOS

La mejora de la precisión experimental en la Tau-Charm Factory es debido no solamente al incremento en la luminosidad, sino también al avance sustancial en las características de diseño del detector comparado con experimentos previos en esta región (Mark I, DASP, PLUTO, Mark II, DELCO, Crystal Ball, Mark III y BES).

En la actualidad, el detector está siendo desarrollado por un grupo de aproximadamente 100 físicos experimentales del CERN, Francia, Alemania, Portugal, España, Estados Unidos, Irlanda y otros países europeos. El diseño en estudio recoge las mejores propiedades de detectores previos en una sola máquina, resultando el primer detector a estas energías con una alta resolución y con una casi completa hermeticidad.

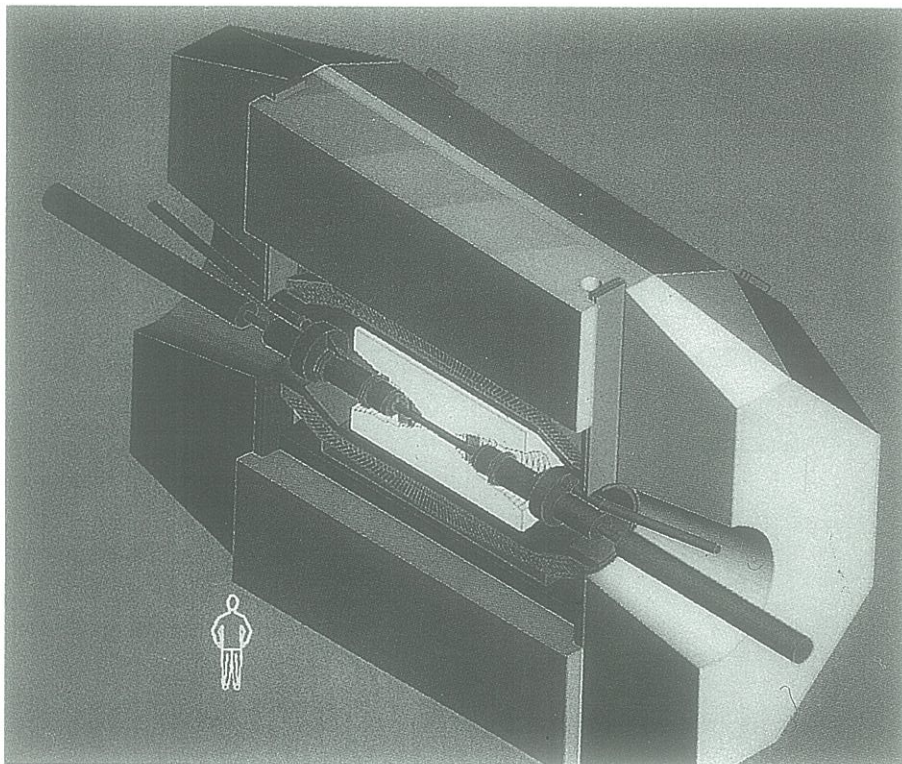
La tarea del detector, situado alrededor del punto de interacción, consiste en captar la mayor cantidad posible de los productos resultantes de cada colisión para reconstruir con ello una imagen electrónica del suceso.

El detector (Fig. III) comprende varias capas de subdetectores ordenados de forma que detectan las partículas siguiendo una densidad creciente a partir del punto de interacción. Cada una de estas capas desarrolla una función concreta de modo que el detector es capaz de identificar cada una de las partículas producidas en el suceso y medir su energía. Conectado al detector se dispone de un sistema electrónico de toma de datos y de ordenadores que deben "decidir" rápidamente si la colisión es de interés, en cuyo caso se procesarán las correspondientes señales eléctricas y se almacenarán los datos en cintas magnéticas para su posterior análisis.

La capa más interna del conjunto es un detector de trazas que revela las trayectorias de las partículas cargadas (ya que las partículas neutras no dejan huella). Un gran solenoide superconductor proporciona el campo magnético necesario para curvar sus trayectorias y poder así medir su energía. Recubriendo el detector de trazas hay una o dos capas de detectores específicos para identificar cada una de las partículas cargadas: pión, kaón, protón, etc. Superpuesto al anterior se encuentra otro subdetector formado por una gran número de cristales de yoduro de cesio, los cuales miden la energía de los fotones (que no dejan trazas en los detectores internos), electrones y positrones. Finalmente, cubriendo el solenoide superconductor se coloca un detector formado por placas de hierro intercaladas con delgadas capas de detectores de trazas. Este detector externo identificará el resto de las partículas neutras, al tiempo que distinguirá si alguna de ellas es un muón. Un detector de este tipo puede detectar de forma directa todas las partículas, excepto los neutrinos. Pero incluso los esquivos neutrinos pueden ser identificados indirectamente por la falta de energía resultante de la colisión.

La electrónica y los ordenadores son elementos de crucial importancia en los experimentos actuales. Todos los subdetectores producen señales eléctricas

F III El detector consta de varias capas de subdetectores situadas alrededor del punto de interacción y proporciona una imagen electrónica de cada suceso.



que han de ser procesadas y grabadas en cintas magnéticas. Cada segundo, los ordenadores conectados al detector escrutarán alrededor de 25 millones de colisiones, de entre las cuales seleccionarán unas 100 imágenes para grabar en las cintas magnéticas. Esta tarea requiere un potente sistema constituido por una red de procesadores en paralelo equivalente a unos 200 superordenadores actuales. Se prevé que tales sistemas estarán disponibles antes de que el experimento se ponga en marcha.

Los sucesos grabados serán almacenados en una librería de cintas y discos magnéticos. Esto implica una gigantesca cantidad de información. A partir de la librería digital, los sucesos serán analizados por físicos experimentales, en el propio laboratorio y también en los institutos colaboradores diseminados por todo el mundo, a los que se enviarán los datos por medio de redes de alta velocidad. Los ordenadores han de reconstruir primero lo que ha ocurrido en cada suceso; a continuación, combinando docenas de millones de colisiones, las sutiles imágenes de la física subatómica podrán ser visualizadas.

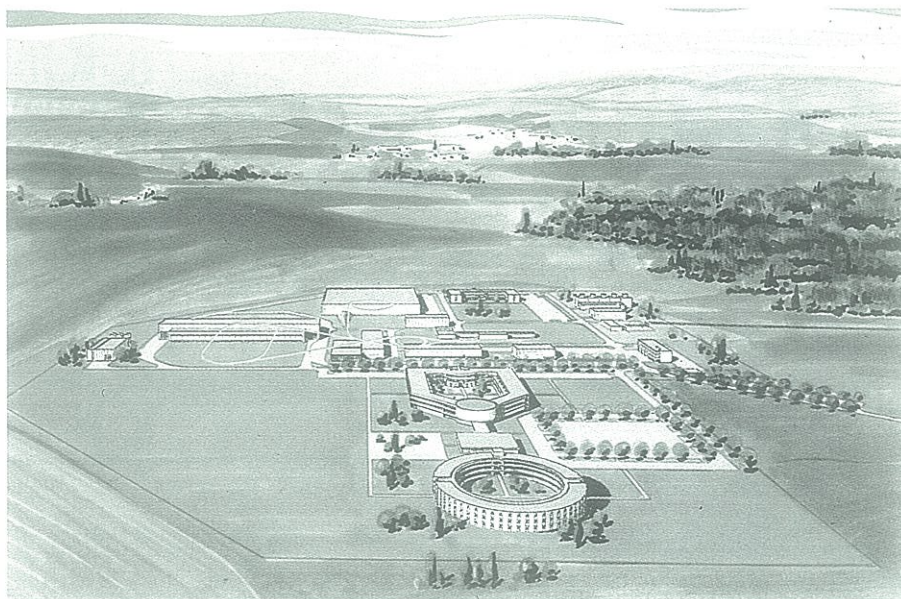
BENEFICIOS TECNOLÓGICOS Y CIENTÍFICOS

España pertenece al Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) desde hace nueve años. Durante este tiempo, España ha logrado un desarrollo significativo en la física de altas energías. Como resultado, la comunidad experimental española cuenta hoy con más de 120 físicos experimentales y un poco más de 180 físicos teóricos.

En este avance, la industria española ha proporcionado al CERN importantes bienes de equipos, que incluyen componentes de ultra-alto vacío, criostatos, imanes, sistemas de control, superconductores, transformadores de corriente y otros componentes con una calidad equivalente a la existente en el mercado europeo.

La Tau-Charm Factory en España hará a la comunidad científica española más compleja, aumentando nuevas líneas de investigación y abarcando un campo más amplio de investigación experimental y aplicada, posibilitando a la Universidad y a las empresas españolas una capacidad de experimentación y producción de la que carecemos hasta ahora.

La construcción de la Tau-Charm Factory en España permitirá colocar a la industria española al mismo nivel que la de los países de más alto desarrollo tecnológico, movilizandolos importantes recursos nacionales hasta incorporarlos acer-



F IV Perspectiva del laboratorio de la Tau-Charm Factory.

tadamente en las nuevas tecnologías de punta. Todo esto implica modernización y diversificación de las bases de la industria española.

Por este motivo, las autoridades españolas tomaron entonces la iniciativa de evaluar su interés, y para ello formaron las comisiones apropiadas, al mismo tiempo que varias Comunidades Autónomas (Andalucía, Aragón, Cataluña, País Vasco y Valencia) expresaron su deseo de albergar la instalación, dados sus previsible beneficios científicos y tecnológicos. Como consecuencia, el Ministro de Educación y Ciencia se dirigió al Director General del CERN, el Premio Nobel Carlo Rubbia, solicitándole la elaboración de un estudio de viabilidad del laboratorio, en base al cual se decidió la preparación de un proyecto, que fue presentado al CERN, para su aprobación, en junio de 1992.

En este proyecto, el Gobierno español proponía la construcción de la Tau-Charm Factory en España en un período de 5 años. Esta fase tendría la consideración de un programa especial del CERN, es decir, con una financiación compartida entre España, otros países europeos y el CERN (el costo total estimado es de 300 millones de francos suizos). El personal para la construcción del laboratorio estaría formado por medio centenar de expertos del CERN y un centenar de jóvenes físicos e ingenieros españoles que se formarían en tecnologías de aceleradores durante el período de construcción. La propuesta preveía también un trato favorable para la industria española y aseguraba la utilización internacional del laboratorio durante su explotación.

Por todos estos motivos es apropiado y muy positivo para España la llegada de la Tau-Charm Factory. España consolidaría su prestigio internacional alcanzado en estos últimos 10 años y reforzaría su papel internacional ante las naciones del mundo. La comunidad científica española vería abrirse ante ella nuevos caminos para la investigación experimental y de vanguardia. La industria española tendría una magnífica oportunidad para ver incrementada la demanda de sus productos de alta tecnología, como se ha puesto de manifiesto hasta ahora al ganar importantes adjudicaciones para la construcción de otras instalaciones del CERN en Europa; con ello los retornos de la contribución española al CERN serían sustancialmente incrementados.

Sin embargo, la sorpresa llegó en el mes de diciembre del año 1992, en el momento en que la propuesta española iba a discutirse. España retiró la propuesta y solicitó una reducción unilateral de dos tercios en su contribución al organismo europeo, a pesar de que, sin olvidar los difíciles momentos que atraviesa la economía española, no hay duda que iniciativas como éstas ayudan a preparar el futuro del éxito del desarrollo económico de un país.

Concluyendo, la Tau-Charm Factory es una instalación con muy alto interés científico y tecnológico. La propuesta española al CERN ofreció la oportunidad de que se ubicara en España, con todos los beneficios que conllevaría. Esperemos que las recientes decisiones respondan sólo a dificultades transitorias y que finalmente la Tau-Charm Factory nazca en España (Fig. IV).