

*Facultad
de
Ciencias*

**LA FÍSICA DE PARTÍCULAS EN CANTABRIA,
1969 - 2017
(Particle Physics in Cantabria, 1969 - 2017)**

**Trabajo de Fin de Grado
para acceder al**

GRADO EN FÍSICA

Autor: Eduardo Ripoll Cabarga

Director: Jónatan Piedra Gómez

Codirectora: María Montserrat Cabré i Pairet

Septiembre 2024

Resumen

En este trabajo se ha reconstruido la historia de la Física de Partículas en Cantabria, específicamente aquella desarrollada en la Universidad de Cantabria (UC) en colaboración con el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Desde la creación del grupo de investigación por Eugenio Villar (Valencia 1922 - 2012) se estudia su evolución y se revisan acontecimientos clave en su desarrollo como el Plan Movilizador de Altas Energías de 1983, la participación del grupo de Cantabria en colaboraciones internacionales como CDF en Fermilab y las colaboraciones DELPHI y CMS en el CERN. Asimismo, se ha analizado el impacto de la incorporación de la científica Teresa Rodrigo Anoro (Lérida 1956 - 2020) al grupo y su participación en los descubrimientos del quark top y del bosón de Higgs. A nivel metodológico, este trabajo ha sido realizado mediante entrevistas a personal investigador del grupo de Física de Altas Energías del Instituto de Física de Cantabria (IFCA), familiares de Eugenio Villar, así como a través de la recopilación y análisis de documentos históricos, bibliográficos y revisión de bases de datos.

Palabras clave: física de partículas, Cantabria, CERN, historia de la ciencia, género.

Abstract

In this work, the history of Particle Physics in Cantabria has been reconstructed, specifically focusing on the development at the University of Cantabria (UC) in collaboration with the Spanish National Research Council (CSIC). Since the creation of the research group by Eugenio Villar (Valencia 1922 - 2012), its evolution has been studied, and key events in its development have been reviewed, such as the 1983 High Energy Mobilization Plan, the participation of the Cantabrian group in international collaborations such as CDF at Fermilab and the DELPHI and CMS collaborations at CERN. Additionally, the impact of the incorporation of the scientist Teresa Rodrigo Anoro (Lérida 1956 - 2020) into the group and her participation in the discoveries of the top quark and the Higgs boson has been analyzed. Methodologically, this work has been carried out through interviews with researchers from the High Energy Physics group at the Institute of Physics of Cantabria (IFCA), family members of Eugenio Villar, as well as through the collection and analysis of historical and bibliographical documents and database reviews.

Keywords: particle physics, Cantabria, CERN, history of science, gender.

Abreviaturas

- AAR: Archivo de Alberto Ruiz
- ALICE: A Large Ion Collider Experiment
- ATLAS: A Toroidal LHC ApparatuS
- ATR: Archivo de Teresa Rodrigo
- CAICYT: Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica
- CBCAG: Community & Business Coordination Advisory Group
- CCD: Charge-Coupled Device
- CDF: Collider Detector at Fermilab
- CERN: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
- CIEMAT: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
- CMS: Compact Muon Solenoid
- CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique de Francia
- CSIC: Consejo Superior de Investigaciones Científicas
- DAMIC-M: Dark Matter in CCDs at Modane
- DELPHI: DEtector with Lepton, Photon and Hadron Identification
- DRD: Detector Research & Development
- ERC: European Research Council
- FAENET: Red Nacional de Cálculo de Física de Altas Energías
- IFCA: Instituto de Física de Cantabria
- IFIC: Instituto de Física Corpuscular de Valencia
- IP: Investigador/a Principal
- JEN: Junta de Energía Nuclear
- KIT: Karlsruhe Institute of Technology
- LAL: Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
- LGADs: Low Gain Avalanche Detectors
- LHCb: Large Hadron Collider beauty experiment
- LSM: Laboratoire Souterrain de Modane/Grenoble
- MEC: Ministerio de Educación y Ciencia
- MIT: Massachusetts Institute of Technology
- RES: Red Española de Supercomputación
- TOF: Time-Of-Flight
- UAM: Universidad Autónoma de Madrid
- UC: Universidad de Cantabria

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 6 |
| 2. Objetivos y metodología | 8 |
| 3. Los orígenes de la física de partículas en Cantabria | 10 |
| 4. El impulso del Plan Movilizador a la física de altas energías española y la participación en el experimento DELPHI del CERN | 16 |
| 5. La incorporación al experimento CDF en Fermilab | 22 |
| 6. La participación en el experimento CMS y el descubrimiento del bosón de Higgs | 26 |
| 7. La incorporación al experimento DAMIC-M | 32 |
| 8. Análisis y conclusiones | 34 |
| Referencias bibliográficas | 42 |
| Anexos | 45 |
| Anexo I: Certificado del Comité de Ética de Proyectos de Investigación | 45 |
| Anexo II: Documento informativo facilitado a las personas informantes | 46 |
| Anexo III: Declaración de consentimiento informado | 47 |
| Anexo IV: Asistentes a la II Reunión de Física Nuclear, Santander 1953 | 49 |
| Anexo V: Aprobación del MEC del proyecto de investigación para la colaboración en DELPHI | 50 |
| Anexo VI: Participantes en la 37ª Junta de Colaboración de DELPHI (momento de la integración del grupo de Cantabria) | 51 |
| Anexo VII: Participantes en la 61ª Junta de Colaboración de DELPHI | 52 |
| Anexo VIII: Noticias de prensa | 53 |
| Anexo IX: Autores y autoras en el descubrimiento del quark top en CDF | 60 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Personas que han realizado su tesis doctoral en el grupo de Cantabria | 39 |
| Tabla 2. Tesis doctorales realizadas en el grupo de Cantabria | 40 |
| Tabla 3. Integrantes actuales del grupo de Cantabria | 41 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Caricatura dibujada por Eugenio Villar | 10 |
| Figura 2. Imagen de las trazas que dejan partículas aceleradas | 11 |
| Figura 3. Asistentes a la II Reunión de Física Nuclear | 12 |
| Figura 4. Varios integrantes del grupo de Cantabria en los noventa | 20 |
| Figura 5. Colaboración CDF-I | 22 |
| Figura 6. Teresa Rodrigo Anoro junto con Alberto Ruiz | 23 |
| Figura 7. Representación esquemática del detector CMS | 27 |
| Figura 8. Imagen del detector CMS | 28 |
| Figura 9. Esquema de la planificación del proyecto LHC | 30 |
| Figura 10. Esquema de los cuatro detectores principales en el LHC | 31 |
| Figura 11. Evolución de defensas de tesis doctorales | 39 |
| Figura 12. Evolución porcentual de defensas de tesis doctorales | 40 |

1. Introducción

Se suele decir que la física nuclear nació en 1896, cuando Henri Becquerel descubrió accidentalmente el oscurecimiento de una placa fotográfica con una radiación invisible. Desde entonces, la investigación y el conocimiento del núcleo atómico, y posteriormente de las partículas elementales que lo componen, ha crecido sin parar, hasta llegar a las colaboraciones internacionales que hoy en día agrupan a miles de personas y decenas de países para realizar experimentos en la frontera de energías alcanzables, siendo el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) el ejemplo más representativo. Tradicionalmente, la física en general, y la física de partículas más concretamente, han sido áreas del conocimiento en las que:

- La participación mayoritaria corresponde aparentemente a hombres. Decimos aparentemente porque se ha demostrado que el relato histórico no ha recogido de forma justa todas las aportaciones de las mujeres, y esa falta de visibilidad del trabajo científico femenino hace aparecer mayores las contribuciones masculinas. Este fenómeno Margaret Rossiter lo llamó efecto Matilda [1] y un ejemplo significativo en la física de partículas es el caso de Lise Meitner y el borrado de sus aportaciones [2].
- Históricamente, se han delegado actividades más mecánicas y que requieren mayor atención y minuciosidad a mujeres [3]. Entre los años sesenta y mediados de los ochenta, decenas de mujeres trabajaron en el CERN como *scanners*. Su labor consistía en encontrar sucesos interesantes entre las muchas trazas depositadas por partículas en fotografías capturadas en cámaras de burbujas. Estas tareas, al igual que las de las calculistas o las de las analistas de placas astronómicas, resultaron fundamentales para el desarrollo de algunas disciplinas científicas, si bien han sido invisibles y por ello desvalorizadas en el relato histórico que registra los avances científicos y tecnológicos de las diversas disciplinas [2].
- Más allá de relatos sobre descubrimientos fortuitos y pioneros de la investigación, o del papel de las grandes instituciones científicas, narrativas que todavía acaparan la mayoría de los manuales de historia de la ciencia, la investigación científica se impulsa desde múltiples espacios y se sostiene en un trabajo cotidiano condicionado por una gran variedad de factores. El objetivo de este TFG es ofrecer una mirada contextualizada a la historia reciente de la física de partículas [4,5] desde la mirilla que nos ofrece la Universidad de Cantabria [6]. En el marco del final del franquismo y durante la configuración del sistema científico desarrollado en la incipiente democracia en España, en un entorno geográfica y científicamente periférico se ha ido desarrollando la trayectoria de un grupo de investigación en altas energías, grupo que ha participado de modo activo en múltiples avances que se han producido durante el último tercio del siglo XX y durante el siglo XXI [7,8].

La reconstrucción de la evolución del trabajo de este grupo, así como la participación en el mismo de mujeres y hombres y su protagonismo en diversos hitos de la historia reciente de la física de partículas, constituirán el nodo fundamental de este trabajo. Además de las contribuciones del grupo en la puesta en marcha y desarrollo de experimentos internacionales, se buscará identificar a protagonistas menos visibles, como las personas que realizaron su formación investigadora en el marco de las líneas de investigación del grupo, o las microscopistas que realizaron las tareas de detección de trazas de partículas en las placas antes de que se automatizara su análisis. Sus nombres, así como las labores por ellas realizadas, han empezado a ser investigados en algunos grupos de física españoles, como el del Instituto de Física Corpuscular de Valencia [9], pero ese esfuerzo para rescatar y visibilizar su labor no se ha desarrollado todavía para el caso de Cantabria.

2. Objetivos y metodología

El principal objetivo de este trabajo es la construcción de un relato histórico mediante la búsqueda y análisis de fuentes que aporten información contrastable sobre cómo se ha desarrollado la Física de Partículas en Cantabria a lo largo de los años, más concretamente aquellos archivos que traten sobre la comunidad científica nuclear y de partículas española, tanto del pasado como actual, y sobre las decisiones que tomaron, que hacen que a día de hoy el grupo de Física de Partículas e Instrumentación de Cantabria del IFCA sea reconocido por sus contribuciones a nivel nacional e internacional.

Para el desarrollo del proyecto hemos combinado el trabajo documental y bibliográfico con la realización de entrevistas semi-estructuradas a informantes, métodos propios de la investigación cualitativa [10]. Por ello, se ha procedido a la identificación y análisis de fuentes que permitieran delinear el relato histórico que buscamos reconstruir.

En primer lugar, se ha procedido a la identificación y análisis de bibliografía relevante para contextualizar el desarrollo de la historia de la física de partículas en España, a través de la búsqueda de historiografía disponible en torno a la historia de la física en España durante el último tercio del siglo XX y principios del XXI. Igualmente, hemos buscado trabajos que nos permitieran comprender la dinámica de la historia de las mujeres en la ciencia en España durante esa misma época. Para ello hemos utilizado los recursos de recuperación de documentos que nos ofrece la biblioteca de la Universidad de Cantabria, así como las bases de datos de DIALNET e *Isis Current Bibliography of the History of Science* [11,12].

En segundo lugar, hemos consultado la documentación del grupo conservada en los archivos de Alberto Ruiz Jimeno y Teresa Rodrigo Anoro¹.

En tercer lugar, hemos entrevistado a personas que participaron (y participan) activamente en el grupo que desarrolló la física de partículas en Cantabria, a familiares de estas y a colegas de la Facultad de Ciencias y del IFCA. Las entrevistas han abordado cuestiones de carácter científico y académico vinculadas al desarrollo de la investigación en física de partículas y a la organización del trabajo, además de valoraciones sobre los efectos que la actividad investigadora hubiera podido tener en las biografías de las personas entrevistadas [13,14]. La investigación se ha diseñado atendiendo a la perspectiva de género, que se ha buscado implementar en todas y cada una de sus etapas [15].

Se han realizado un total de ocho entrevistas semiestructuradas con el permiso del Comité de Ética para proyectos de investigación de la UC, mediante la firma de un consentimiento informado [ver Anexo III] con la intención de definir un marco histórico a lo largo de los años del grupo. Entre estas entrevistas están las de Alicia Calderón, profesora titular de la UC; Aurelia Bonet, científica jubilada y mujer de Eugenio Villar, creador del grupo de Física

¹ El Archivo de Alberto Ruiz Jimeno consta de tres archivadores, que se conservan en su despacho del IFCA, y que contienen documentación oficial relativa a los proyectos de investigación ordenados cronológicamente. El Archivo de Teresa Rodrigo Anoro consta de dos cajas sin clasificar, incluyendo separatas, material docente, libros y recortes de periódicos. En este momento se encuentran localizadas en el despacho de Rocío Vilar.

de Partículas en Cantabria; Jesús Marco de Lucas, investigador científico del CSIC; Celso Martínez Rivero, investigador científico del CSIC; Alberto Ruiz Jimeno, catedrático y profesor emérito de la UC; Iván Vila Álvarez, investigador científico del CSIC, actual coordinador del grupo de Altas Energías del IFCA; Rocío Vilar Cortabitarte, contratada doctor de la UC; y Eugenio Villar (hijo), catedrático del Departamento de Ingeniería Microelectrónica de la UC. Estas entrevistas fueron grabadas con el consentimiento de las personas entrevistadas con el motivo de su posterior transcripción, análisis, recopilación e implementación en el estudio de la información relevante para nuestro trabajo.

3. Los orígenes de la física de partículas en Cantabria

La historia de la física de partículas en Cantabria está íntimamente ligada a la historia de la Universidad de Cantabria, una institución fundada formalmente en 1972 con profesorado, lógicamente, formado en otras universidades, que se establecieron aquí para organizar las nuevas facultades y poner en marcha la investigación en las diversas disciplinas. En el caso de la física de partículas, el actor principal fue Eugenio Villar (1922-2012), licenciado en química por la Universitat de València, quien después de trabajar en el sector privado y dar clases particulares a jóvenes estudiantes de secundaria, en 1950 se encontró por azar con un antiguo amigo y compañero de clase, José Casanova.

Por aquel entonces, Casanova ya formaba parte del grupo de Física de Partículas de Valencia creado en 1949, cuyo catedrático era Joaquín Catalá. Casanova, al ser conocedor de la situación de Eugenio Villar, y dado el interés de este por la educación, le propuso incorporarse como profesor en la Universitat de València, propuesta que Villar aceptaría.



Figura 1. Caricatura dibujada por Eugenio Villar del laboratorio de la Universitat de València, conocido como el *Ice Laboratory*, nombre acuñado con humor debido a sus frías temperaturas. De izquierda a derecha: José Casanova, Joaquín Catalá, Fernando Senent, José Aguilar, Francisco Busquets, Aurelia Bonet y Eugenio Villar [16].

Debido a la poca actividad en el departamento de óptica donde trabajaba Joaquín Catalá, y animado por el Secretario General del CSIC (1936-1936), José María Albareda Herrera realizó en 1949 una estancia en la Universidad de Bristol, en Inglaterra, con una beca de un año del CSIC. En ese laboratorio, los investigadores William Martin Gibson y Józef Rotblat le cedieron unas emulsiones para analizar y pudo así ser aceptado en el grupo que dirigía Cecil Frank Powell. Catalá se interesaría así por esta nueva técnica que analizaba las trazas dibujadas por partículas al pasar a través de emulsiones ionográficas, debido a su potencial

para el estudio de las partículas y su naturaleza, ya que además de ser una técnica barata, sencilla y eficiente, en ese momento ya contaba con una gran comunidad científica internacional detrás.

A su regreso a Valencia, además de las emulsiones expuestas en aceleradores, la Universidad de Bristol también cedió un microscopio con la capacidad de observar las trazas producidas. Con estos materiales Catalá fundaría su grupo como una sección local del Instituto de Óptica “Daza de Valdés” del CSIC, instituto localizado en Madrid y que ya dirigía José María Otero de Navascués. A principios de 1960, el grupo pasaría a llamarse Instituto de Física Corpuscular de Valencia (IFIC) dirigido por Catalá, quien desde 1944 era además catedrático en Física de Partículas. Así, Catalá fue el introductor de esta materia en España. Cabe precisar que en aquella época los rangos de energía con los que incidían las partículas rondaban los MeV mientras que en la actualidad esta magnitud es de TeV, es decir, seis órdenes de magnitud más alta. Por ello, con propiedad no debería llamarse Física de Altas Energías a la disciplina a la que se dedicaba el grupo de Catalá [17,18].

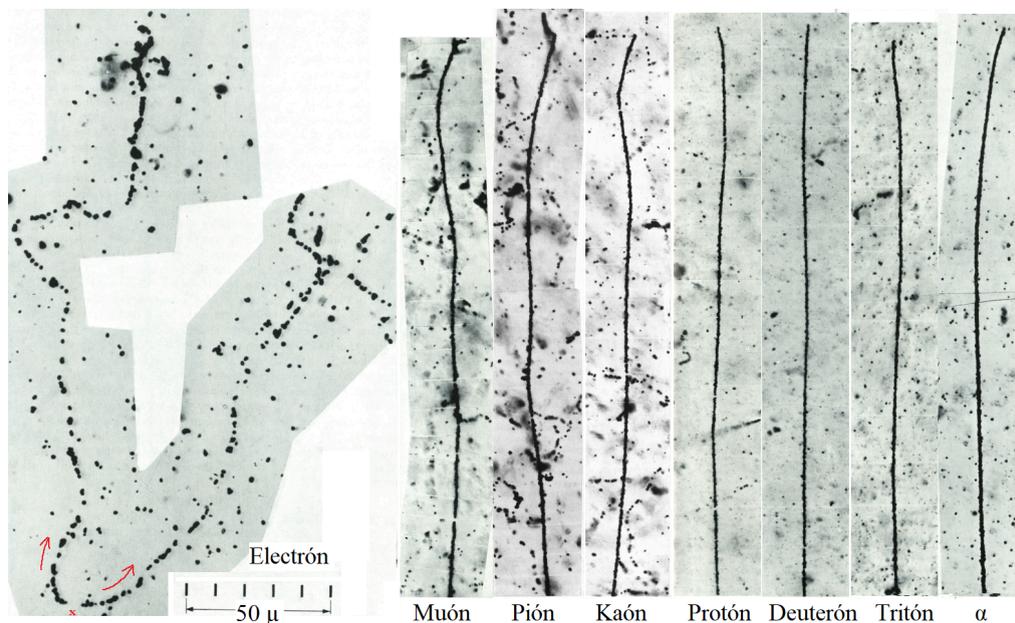


Figura 2. Imagen de las trazas que dejan partículas aceleradas al atravesar una emulsión ionográfica, vista a través de un microscopio [19].

Eugenio Villar, trabajando en el grupo de Catalá, conocería a quien fue su futura esposa, Aurelia Bonet, también licenciada en química en la Universitat de València. Antes de trabajar ambos en el grupo, Bonet y Catalá habían coincidido brevemente en el pasado, pues él fue uno de los jueces del tribunal que juzgó el examen de acceso a la universidad de Bonet, una prueba que superó brillantemente, pues Bonet fue la primera mujer española que recibió una condecoración por sus resultados en este examen [16].

Cuando Catalá se enteró de que Aurelia Bonet había terminado sus estudios universitarios, sabiendo que había suspendido el examen de química orgánica, el interés principal de Bonet

en aquel momento, la llamó para invitarla a formar parte del grupo gracias a su trayectoria previa de excelencia [16].

Junto con Villar, Bonet comienza a desarrollar su tesis doctoral sobre el estudio de los niveles excitados del carbono-13 producido en el bombardeo de deuterones al carbono-12 de la emulsión, pero no sin antes realizar un viaje a Madrid en 1946, ambos junto con Aguilar y Casanova. Todos eran químicos y necesitaban, por indicación de Catalá, examinarse para convalidar aquellas asignaturas necesarias para obtener la mención en física. Es interesante señalar que en el reparto de las tareas de investigación que desarrollaba el grupo de Catalá, la mayoría de las veces correspondieron a Bonet las observaciones en el microscopio [16], algo que entronca con la tradicional asignación a mujeres de las tareas de observación de todo tipo de fenómenos naturales [4].

Del 16 al 19 de septiembre de 1953 se celebraría en Santander la II Reunión de Física Nuclear organizada por la Junta de Energía Nuclear (JEN) y el IFIC, donde se expondrían, entre otros, los resultados obtenidos hasta el momento por el grupo de Catalá en una conferencia con un significativo impacto internacional [16].

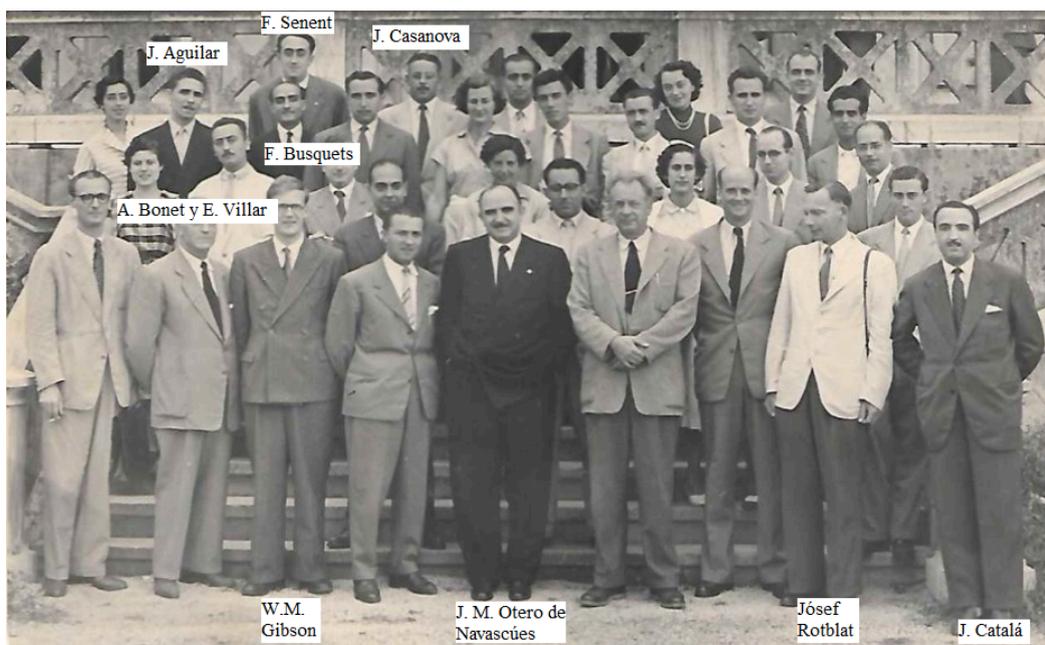


Figura 3. Grupo de asistentes a la II Reunión de Física Nuclear, Santander 1953. [ver Anexo IV]

En esta época, la institución que en España desarrollaba la investigación sobre Física de Partículas y Física Nuclear a nivel nacional era la JEN, presidida por José María Otero de Navascués desde 1958 hasta 1974, quien desde 1966 presidió también la Comisión Nacional de Altas Energías. Cabe destacar que en esta época el ambiente científico que se respiraba en el país era de aislamiento, y estaba profundamente influenciado por una política autocrática que dominó las primeras décadas de la dictadura franquista. Aunque España llegaría a vincularse con proyectos científicos de colaboración internacional, como el CERN, entre los

años 1961-1969, la falta de interés político por la ciencia y la tecnología y el alto precio que suponía para España esa vinculación hicieron que dicha colaboración fuera efímera [20].

Tiempo después, Eugenio Villar y Aurelia Bonet defienden sus tesis doctorales en 1960, siendo Bonet la primera mujer española en realizar una tesis doctoral sobre Física de Partículas, específicamente sobre la reacción descubierta por ella donde el carbono-12 bombardeado por deuterones² daba lugar a partículas alfa y boro-10. Bonet, tras defender su tesis, oposita para ser profesora titular en la Universitat Politècnica de València (UPV), lugar en el que estaría trabajando durante varios años más, mientras Villar se dedica a conseguir la agregaduría³. Ella fue la primera mujer en ejercer como profesora titular en la UPV. Por sugerencia de Catalá, a quien su estancia en Bristol había resultado fundamental en su formación, Villar dedicaría diversas estancias en el extranjero con la intención de obtener un enriquecimiento científico e impregnarse de la cultura científica extranjera. Entre estas estancias está una de seis meses en Milán con una beca, adquiriendo contactos con grupos italianos, y más tarde un verano en Ginebra con su familia, colaborando con el CERN en trabajos sobre interacciones de piones acelerados de 14 GeV. Estas estancias otorgarían a Villar una incipiente red de contactos a nivel internacional, comenzando así una colaboración a espaldas del país con el CERN entre otros, la cual ayudaría al sector investigador español en el período en que España deja de pertenecer a esta colaboración internacional, desde 1969 hasta 1983.

En Milán, Eugenio Villar se interesaría por unas nuevas emulsiones irradiadas por partículas con energías varios órdenes de magnitud mayores, del MeV al GeV, interés que le provocó un cierto miedo al rechazo por parte de Catalá. En cualquier caso, previo a su regreso, Catalá abandonaría el IFIC trasladándose a Madrid, ocupando su puesto en la cátedra de Valencia Fernando Senent.

A su retorno a España Villar fue a la Universidad de Santiago de Compostela por recomendación de Catalá, donde obtendría la cátedra vacante de Termología, mientras que Aurelia seguiría dando clases en la UPV. Al tiempo, Bonet viajaría a Santiago con sus hijos trabajando en el departamento como profesora no numeraria.

Estos años fueron importantes en la historia de la física de partículas en España, puesto que la disgregación del grupo inicial de Catalá determinó el traslado a otras universidades de personal investigador formado en física de partículas, configurando una red de contactos disciplinar a nivel nacional. De este grupo surgieron José Aguilar, quien primero obtuvo la cátedra de Física de Partículas en Murcia y luego la cátedra de Madrid de Julio Palacios Martínez; Fernando Senent, quien tomó la cátedra de Valencia sucediendo a Catalá, y que más tarde se trasladaría a la Universidad Complutense de Madrid para trabajar en meteorología; y Casanova, quien consiguió la cátedra de Valladolid [16].

² Llamamos deuterón al núcleo del átomo de deuterio, un isótopo estable del hidrógeno con un neutrón en su núcleo.

³ Agregaduría: En la época, período de prácticas por el que pasaba un aspirante a catedrático para especializarse trabajando durante ese tiempo bajo la supervisión de un catedrático titular.

En 1971, Eugenio Villar recalca en la joven Universidad de Cantabria, cuyas primeras facultades fueron la de medicina y la de ciencias. Aquí, Villar inició tres líneas importantes de investigación: 1) una dedicada a la climatología, bajo la dirección de Jesús Soto, donde tanto Villar como Bonet colaboraron en proyectos futuros como el análisis de las consecuencias del accidente de Chernobyl y el estudio de los niveles de concentración de radón; 2) una segunda dedicada a la termodinámica, dirigida por Jaime Amorós; y 3) finalmente, la física de partículas, inicialmente dirigida por él mismo. En sus primeros años en Cantabria, Villar también ocupó el cargo de decano de la Facultad de Ciencias desde 1971 hasta 1976, además de ser director del departamento de Física Fundamental hasta 1987, año en que se jubiló y fue nombrado profesor emérito. Por su parte, Aurelia Bonet desarrolló también su carrera profesional como profesora de Física Fundamental en la Facultad de Ciencias de Cantabria y colaboró con Villar en la línea de trabajo sobre climatología.

En 1974 se produjo un nuevo impulso en la configuración de un grupo en Santander dedicado principalmente a la investigación en física de partículas. Ese año, Alberto Ruiz completó su licenciatura en la Universidad de Valladolid, donde realizó su tesina⁴ bajo la dirección de Francisco Fernández en el grupo de física nuclear liderado por José Nalda. Fue allí donde conoció a la física Teresa Barriuso, quien estaba realizando su tesis doctoral en ese grupo. Poco después, debido a la incorporación de Barriuso a la Universidad de Cantabria, donde finalizó su tesis con Emilio Santos, le sugirió a Ruiz la posibilidad de trasladarse a Santander para realizar su tesis doctoral con Villar, quien tenía la intención de formar un grupo de trabajo sobre altas energías. Ruiz estableció contacto con Villar y comenzó su tesis doctoral en el análisis de emulsiones ionográficas provenientes de laboratorios de Berkeley y Fermilab, que fueron cedidas al grupo gracias a los contactos italianos de Villar.

Poco después Ramón Niembro se unió al grupo, donde realizó su tesis sobre la interacción de protones en la emulsión, mientras que Ruiz desarrolló la suya analizando las interacciones entre oxígeno-16 y carbono-12. Estos estudios se complementaron con la intención de comprender la interacción nuclear y observar posibles efectos colectivos. En aquel entonces, el grupo estaba formado por tres personas: Niembro, Ruiz y Villar, quien supervisaba las tesis de ambos.

El grupo en esta etapa se encargaba de analizar emulsiones irradiadas en experimentos realizados en el laboratorio de Berkeley, California, utilizando microscopios operados por dos mujeres microscopistas que dedicaban su jornada a analizar muchos sucesos. Se trata de Pilar Velloso y Milagros Martín, tal y como se menciona en el apartado de agradecimientos de la tesis doctoral de Alberto Ruiz [21]. Más adelante, con el plan movilizador se incorporarían al grupo las microscopistas Pilar Built y Rosa María Barranquero, contratadas a través de la financiación de la CAICYT [22]. Con ello, identificamos el trabajo que estas mujeres han realizado también en el ámbito científico, y que solo recientemente ha empezado a ser visibilizado y valorado [9,23].

⁴ En España, antes de la implantación del Espacio Europeo de Educación Superior, se llamaba tesina al trabajo académico de investigación que se realizaba después de la licenciatura como paso previo al acceso a los estudios de doctorado.

Los microscopios con los que trabajaban fueron prestados al grupo gracias a contactos tanto internacionales como locales de Villar, incluyendo a Guido Begni, jefe del grupo de altas energías de Milán, quien además les proporcionó emulsiones, y a Fernando Val, catedrático de anatomía patológica de la facultad de medicina cántabra. Villar fue también en aquella época vicerrector de investigación de la Universidad de Cantabria.

Durante este tiempo, Ruiz estableció relaciones con el CNRS de Estrasburgo, facilitadas por la colaboración que mantenía la Universidad de Barcelona en el ámbito de la investigación de Altas Energías con los grupos franceses. Ruiz dedicó sus veranos a realizar estancias en el CNRS, financiado por la Fundación Botín, el Ministerio de Educación y la Universidad de Cantabria, así como programas de intercambio hispano-franceses. Aprovechó allí sus infraestructuras, más avanzadas que las españolas en aquel momento, enriqueciéndose académicamente con investigadores locales y aprovechando las relaciones existentes entre el CNRS y el CERN, donde grupos más potentes también investigaban emulsiones.

Durante su tiempo en el CNRS, Ruiz inició colaboraciones conjuntas con el CERN para estudiar la estructura nuclear analizando emulsiones irradiadas a energías cada vez mayores. Colaboró con los grupos de Valencia y Barcelona, además de con otros grupos italianos y uno francés. Esta última colaboración le permitió a Ruiz viajar al CERN y establecer contactos con grupos de investigación que trabajaban allí antes incluso de que España formalizase su participación como país miembro. Estas estancias fueron financiadas por el propio laboratorio europeo. Una de las contribuciones más significativas fue la mejora de las técnicas de análisis de emulsiones, incluyendo la automatización de los microscopios ópticos utilizados para acelerar estos procesos de análisis.

A principios de los años ochenta, el grupo cántabro comenzó a colaborar con el CERN en el desarrollo de los primeros detectores semiconductores de silicio, los cuales reemplazaron a los microscopios. Desde entonces la CAICYT se convirtió en el órgano financiador de la investigación en España, como resultado de las decisiones gubernamentales de 1982 en favor de la investigación científica y tecnológica, incluyendo el Plan Movilizador de Altas Energías en España. El grupo de Cantabria también contribuyó en esa época al desarrollo de detectores combinando las técnicas de emulsiones ionográficas como blanco y detectores de silicio como *trigger*, mejorando la eficiencia en la identificación de interacciones interesantes para su estudio.

Todos estos contactos y colaboraciones de Alberto Ruiz, tanto a nivel nacional como internacional, fueron decisivos para la realización de su tesis doctoral, y revirtieron en el enriquecimiento académico del grupo cántabro. Por lo tanto, las continuas estancias en el extranjero fueron fundamentales en ese periodo inicial para sentar las bases de trabajo del grupo en Cantabria, ya que abrieron sus líneas de investigación a las más punteras en el ámbito internacional.

Durante este período también desarrolló su tesis doctoral Mercedes López Quelle, dirigida por Eugenio Villar.

4. El impulso del Plan Movilizador a la física de altas energías española y la participación en el experimento DELPHI del CERN

Una segunda etapa en el desarrollo del grupo cántabro comienza en 1983 con el Plan Movilizador de las Altas Energías [24], impulsado por el gobierno de España en 1982 a través de la Dirección General de Política Científica del gobierno de España, dirigida por Emilio Muñoz (1982-1986) y coordinado por el catedrático de física teórica de la Universidad de Barcelona y coordinador del Comité de Selección y Seguimiento del Plan Movilizador, Pedro Pascual de Sans. El objetivo era promover la física de altas energías en España y su internacionalización. Este plan implicó una significativa financiación estatal para que los grupos de altas energías españoles pudieran colaborar en los experimentos del CERN, destinada al desarrollo de experimentos, construcción de detectores, viajes y sueldos, entre otros. Gracias a esta iniciativa, España se incorpora al colectivo de países miembros de la colaboración del CERN, hecho que supuso un gran impulso a la física de altas energías como disciplina en el ámbito español.

Pedro Pascual, junto con Francisco José Yndurain, creador del grupo de Altas Energías de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), y Juan Antonio Rubio, investigador de la JEN (actual CIEMAT), contrataron a tres científicos clave que estaban dispersos por el mundo: Enrique Fernández para la Universidad de Barcelona, Fernando Barreiro para la Universidad Autónoma de Madrid y Antonio Ferrer como investigador principal para el IFIC de Valencia. Junto con el personal investigador ya disponible en España, formaron una base muy competente para abordar las colaboraciones con el CERN [24,25].

En este contexto, una de las primeras colaboraciones del grupo de Eugenio Villar con el CERN fue en el estudio con emulsiones sobre los mecanismos de producción de partículas en los experimentos WA-58, que trataban la interacción entre iones pesados, y WA-71, sobre la interacción de partículas con un haz de π^- a 85 GeV/c. El objetivo era estudiar la producción de los quarks *charm* y *bottom*, respectivamente. En estos experimentos, Alberto Ruiz, Ramón Niembro, María Mercedes López Quelle, Laura María Bravo Sánchez, Juan José García Pérez y María Begoña Sánchez Madariaga desarrollaron sus tesis doctorales. Como consecuencia de estas investigaciones, el grupo mostró interés en participar en la colaboración ACCMOR sobre la experiencia NA-32 propuesta por el IP del experimento, el profesor Peter Weilhammer. Este experimento trataba sobre la producción de quarks *charm* en interacciones hadrónicas, aunque esta propuesta sería rechazada por Pedro Pascual.

Fue entonces cuando Pascual redirigió el interés del grupo de Cantabria al encomendar a Alberto Ruiz liderar al grupo en la colaboración del experimento DELPHI del CERN, junto con el grupo de Valencia (IFIC). Este experimento se extendió desde 1989 hasta el año 2000 y fue uno de los cuatro experimentos realizados en el acelerador de partículas LEP (*Large Electron-Positron Collider*). Esta decisión comportó que algunos investigadores del grupo inicial, como Ramón Niembro y Mercedes López Quelle, se separaran del grupo y se dedicaran a la física nuclear. También fue entonces cuando Laura Bravo dejó el grupo después de completar sus estudios en las experiencias WA-45 sobre la producción de

hiperones mediante la colisión de protones en un material pesado, y WA-58. Bravo encaminó su investigación hacia temas de matemáticas aplicadas en la Facultad de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de Cantabria.

El Plan Movilizador supuso un gran impulso al reforzar los grupos de Valencia, Cantabria y el CIEMAT de Madrid, además de crear otros dos grupos, uno experimental en Madrid y otro en Barcelona.

Los tres grandes grupos españoles —el de Barcelona, el CIEMAT de Madrid y el IFIC de Valencia— participaron en tres de los cuatro experimentos del LEP. Estas cuatro colaboraciones contaban con detectores con características distintas pero complementarias, con el objetivo de medir con gran precisión el bosón neutro Z , intermediario en la interacción nuclear débil. La idea era realizar análisis complementarios en estos diferentes experimentos para comparar y contrastar resultados, fortaleciendo así las conclusiones obtenidas.

A partir de entonces, se comenzó a producir un incremento sustancial de las colaboraciones españolas en la física de partículas y con el CERN, pasando de colaboraciones internacionales en grupos reducidos a colaboraciones que, en el caso de DELPHI, estaban formadas por aproximadamente seiscientas personas.

El grupo cántabro trabajó estrechamente con el grupo valenciano en el experimento DELPHI, un detector diseñado para la identificación precisa de partículas, la obtención de información en 3D y la determinación precisa de vértices, tanto primarios (correspondientes a la colisión de las partículas aceleradas) como secundarios (desintegraciones de partículas). Este detector tenía como objetivo principal el estudio de las propiedades de los bosones intermediarios de la interacción nuclear débil Z^0 , W^+ y W^- .

Entre las tareas del grupo cántabro se incluyeron el diseño de detectores calorímetros y más adelante el desarrollo de algoritmos de *software* y simulación, aprovechando su experiencia en estos campos, mientras que el grupo valenciano se encargó del diseño y desarrollo de un detector de tiempo de vuelo para el experimento, entre otras contribuciones.

Inicialmente el grupo de Cantabria se dedicaría al desarrollo de algoritmos de simulación, donde su tarea era crear una simulación rápida del experimento. Aquí se simulaban con todo detalle los procesos de interacción y colisiones de partículas, y cómo estos se comportan en cada uno de los subdetectores, haciendo así una reconstrucción completa del experimento. Las simulaciones por lo general eran muy lentas, por lo que el grupo cántabro se encargó de recortar considerablemente el tiempo de simulación mediante algoritmos simplificados, de ahí el nombre de simulación rápida, lo que les permitía aumentar enormemente la eficiencia en el análisis de los datos, y que fue un gran avance para el experimento y un éxito en la colaboración. Esta tarea fue llevada a cabo por el subgrupo de análisis físico formado por Francisco Javier Cuevas y Jesús Marco de Lucas, dirigidos por personal investigador del Laboratoire de l'Accélérateur Lineaire (LAL) del Centre Scientifique d'Orsay en Francia.

El grupo cántabro, además, colaboró en 1986 con grupos italianos en la construcción de un tercio de la mecánica del calorímetro electromagnético de DELPHI con la ayuda de la empresa de equipos nucleares cántabra ENSA, trabajo realizado por Marco de Lucas, el cual acababa de entrar al grupo, junto con Ruiz y con María Ángeles López Agüera. El grupo cántabro también participó en la electrónica de otro detector identificador de partículas, el *Forward RICH* [24]. Además, Marco llegaría a coordinar el grupo en la búsqueda del bosón de Higgs en esta etapa [25].

Para finalizar, en DELPHI, el IFIC de Valencia se encargó de desarrollar un detector de tiempo de vuelo y el grupo cántabro colaboró con la simulación de este detector, es decir, el IFIC se encargó del *hardware* y el análisis, y el cántabro del *software* y la simulación.

En 1984, el grupo cántabro realizó una contribución sustancial al desarrollo tecnológico español liderando el desarrollo de la red FAEnet, terminada a finales de 1985, la cual ofrecía servicios de computación y comunicación a nivel nacional con la intención de que el personal investigador español tuviera la posibilidad de competir a nivel europeo. Esta red estaba integrada en la red internacional HEPnet, usada en los experimentos de LEP. La red FAEnet sería la precursora de la red IRIS, usada actualmente para la comunicación entre entidades científicas a nivel nacional. En el desarrollo de la red FAEnet contribuyeron también los grupos de Madrid, Zaragoza, Santiago y Valencia, siendo Ignacio Martínez, responsable del sistema de cálculo del grupo cántabro, el que lideró su desarrollo, y más adelante lideraría también el desarrollo de la red IRIS, trasladándose a FUNDESCO en Madrid. El puesto de Martínez lo ocupó Ángel Camacho, quien inició su tesis en el grupo cántabro siendo esta dirigida por Alberto Ruiz y el catedrático en electrónica Ángel Burón, cuyo departamento colaboraría con el grupo de Ruiz durante el desarrollo de DELPHI. Dicha tesis trataría sobre el desarrollo de un hiperlenguaje necesario para el sistema de comunicaciones interno de DELPHI, el cual haría que máquinas con diverso *hardware*, detectores y subdetectores pudieran comunicarse entre sí.

Al grupo cántabro se incorporan más adelante Mercedes Fernández, que dejaría el grupo para trasladarse a Castellón, y Juan José García Pérez, que procedía del subgrupo que analizaba emulsiones, pero que se quedaría en el CERN, en el grupo de desarrollo de aceleradores, a los cuales Ruiz dirigió la tesis. Por otra parte, María Ángeles López Agüera acabaría trasladándose a la Universidad de Santiago.

Con la instauración del Plan Movilizador en 1986 el departamento de física fundamental⁵ de la UC donde el grupo de física de partículas trabajaba, pasaría a dividirse en los departamentos de física moderna y física aplicada. El grupo de física de partículas pertenecería al departamento de física moderna, mientras que Eugenio Villar permanecería en el departamento de física aplicada, siendo el director de este por un año. El departamento de física moderna comenzaría entonces a estudiar sobre temas de física nuclear, cosmología y física de altas energías entre otros. En este departamento se situaría la actividad del grupo de

⁵ Desde su creación en 1972 hasta 1986 el departamento de física fundamental de la UC dirigido por Eugenio Villar centró su actividad en el estudio de las cuevas de Altamira y la física de partículas [22].

física de partículas, separándose sustancialmente de los temas estudiados en física aplicada [22]. Villar tomaría un papel secundario en la dirección del grupo, que pasó a ser liderado por Alberto Ruiz, aunque a efectos burocráticos Villar siguió durante un tiempo como jefe de grupo, hasta que finalmente en 1986 lo abandona también formalmente para dedicar todo su tiempo a trabajos sobre termodinámica y a estudios sobre el clima, líneas que desarrollaba desde sus inicios en Cantabria, así como a la supervisión de la preservación de las cuevas de Altamira. Además, Villar participó en las negociaciones con el IFIC para la distribución del trabajo del experimento DELPHI, pero una vez concretada la colaboración, este ya no participa, tomando Alberto Ruiz el papel de investigador principal. Villar selló su carrera con la autoría del libro *Una breve historia de la Física*, sobre la evolución de la ciencia en el transcurso de la historia de la humanidad, además de recibir varios premios por su trayectoria, como la Medalla Nacional de la Real Sociedad Española de Física, el Magíster Senior Honoris Causa 2000 por la UNATE y la Medalla de Plata de la Universidad de Cantabria, falleciendo el 4 de marzo de 2012 [26].

A partir de agosto de 1989 DELPHI comienza a tomar datos, por lo que la tarea ya no fue únicamente la de diseño y construcción de los detectores y del *software*, sino de hacer análisis de los sucesos y sacar física de ellos. En esta tarea el grupo cántabro tuvo responsabilidades sobre todo en la física del leptón tau y el proceso de desintegración del bosón Z a tau, siendo responsables de este grupo de análisis Ruiz y Francisco Matorras. Gracias a ello organizaron varios congresos, uno en Cantabria al que acudió el premio Nobel Martin Perl, el cual descubrió dicho leptón tau. Con Perl y su equipo el grupo cántabro compartió un proyecto de una factoría de tau en España, que al final no se llevaría a cabo ya que políticamente no se consideró, es por ello que finalmente esa factoría se haría en China. También colaboraron con Barry Barish y su grupo (premio Nobel en 2017 por las ondas gravitacionales) sobre el leptón tau en Stanford para la creación de la factoría previamente mencionada en España. Ambas colaboraciones fueron de gran importancia en el desarrollo y proyección internacional del grupo.

Mientras que hasta entonces se alcanzaban energías de 91 GeV, en 1995 comenzaría una segunda etapa del acelerador LEP mediante una actualización de este, aumentando así las energías con las que se operaba llegando a un máximo de 209 GeV. Un cambio clave se daría en el estudio de detectores de microvértices de silicio. Dichos cambios en el acelerador generarían en consecuencia un aumento de la calidad en la toma de datos [25].

Con este cambio en la dirección de la investigación del grupo, se produjo una segmentación en el departamento de Física Moderna de la UC, pues una parte de sus integrantes trabajó en DELPHI e investigaciones de física de partículas, mientras que otros decidieron pasar a investigar en temas de física nuclear como fue el caso de Niembro y López Quelle, hasta la creación del IFCA, momento en el que el grupo de Ruiz se trasladaría al nuevo instituto. A partir de esta etapa y como norma general, una de las obligaciones principales por parte del personal de todos los grupos colaboradores en estos experimentos han sido las estancias en el extranjero realizando gran variedad de tareas en el laboratorio del experimento en el que estuvieran.



Figura 4. Imagen con varios integrantes del grupo de física de partículas de Cantabria en la década de los noventa. De izquierda a derecha Ángel Camacho, Fernando Gómez Casademunt, técnico de la UC, Jesús Marco de Lucas, Alberto Ruiz y Javier Cuevas [Diario Montañés, 5/1/95].

En DELPHI se trató fallidamente de descubrir el bosón de Higgs, teorizado inicialmente en 1964, debido a que aunque se alcanzó una energía capaz para producir estos bosones, la probabilidad de su producción en colisiones entre electrones y positrones se suponía relativamente baja, esto sumado a los límites en la sensibilidad de los detectores de la época propició que no se obtuvieran resultados concluyentes en el descubrimiento de esta partícula excepto el límite inferior de su masa, unos 114.4 GeV. En el año 2000 LEP deja de producir colisiones electrón-positrón, pero no sería hasta entrar en la colaboración CMS que el grupo de Cantabria se detendría de trabajar con los datos obtenidos en DELPHI [25].

Fue en este segundo período cuando se desarrolla la tesis doctoral sobre emulsiones de Laura María Bravo Sánchez con las experiencias WA-45 y WA-58, dirigida por Eugenio Villar; Alberto Ruiz dirige la de Juan José García Pérez, con la experiencia WA-71 y Mercedes López Quelle dirige la de María Begoña Sánchez Madariaga con la experiencia NA-17 sobre la interacción de partículas subatómicas y la producción de quarks *charm* y *strange* colisionando protones con otros hadrones.

Por otra parte, desarrollarían sus tesis doctorales en la colaboración DELPHI, M^a Ángeles López Agüera sobre el diseño y puesta a punto del calorímetro electromagnético *Forward*, dirigida por Villar, mientras que Alberto Ruiz dirige las de Francisco Javier Cuevas Maestro sobre la aplicación al TOF (*Time of Flight*) y la simulación rápida, y de María Mercedes Fernández Alonso sobre la determinación de la constante α_s de acoplamiento fuerte, de Jesús Marco de Lucas sobre la calorimetría electromagnética en la zona *Forward* y la determinación de $\sin^2\Theta_w$ mediante la medida de la polarización del tau en el canal ro, de

Ángel J. Camacho Rozas sobre el desarrollo del soporte de comunicaciones para el entorno *online* del experimento, y junto con Francisco Javier Cuevas Maestro, Ruiz codirige la de Francisco Matorras Weinig sobre la determinación de parámetros electrodébiles por medio de la reacción $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \tau^+\tau^-$. Fue también en el marco de DELPHI en el que Jesús Marco de Lucas dirige la tesis de Celso Martínez sobre la búsqueda de bosones de Higgs neutros supersimétricos en el canal a cuatro jets y la de Isidro González Caballero sobre la búsqueda de bosones de Higgs en sucesos con dos leptones tau y dos jets, y Francisco Matorras codirige con Alberto Ruiz la tesis de José María López García sobre el estudio de las desintegraciones del leptón tau, y dirige la tesis de Guillermo Gómez-Ceballos y Retuerto sobre el estudio de las propiedades de bosones W y su aplicación a la búsqueda de nuevas partículas. También Francisco Javier Cuevas Maestro dirige la tesis de Javier Fernández Menéndez sobre la búsqueda de bosones de Higgs neutros supersimétricos hasta $\sqrt{s} = 209$ GeV en sucesos a cuatro quarks b [12].

Cabe destacar que de entre estas investigadoras e investigadores formados en Cantabria, Francisco Javier Cuevas comenzaría una nueva línea de investigación sobre Física de Altas Energías en la Universidad de Oviedo, grupo con el cual se ha mantenido un fuerte vínculo que perdura en la actualidad. Francisco Matorras sería director del IFCA, además de decano de la Facultad de Ciencias (2014-2021) y responsable del Tier-2 de CMS en España (centro de procesado de datos del LHC). Jesús Marco de Lucas, quien sería director del IFCA (2003-2007), crearía una línea de investigación en el grupo sobre computación avanzada en 2008, además de obtener el puesto de vicepresidente del CSIC en 2018. Celso Martínez estuvo trabajando en el Ministerio de Ciencia, en la Agencia Estatal de Investigación aprobando junto a un equipo de físicos la financiación a proyectos para Física de Partículas, además de ser el actual representante de CMS en España y el delegado español por cuarto año consecutivo de la RECFA (*Restricted European Committee for Future Accelerators*), un comité de representantes del CERN que desde 1962 viaja a distintos países europeos colaboradores con el CERN para informar sobre lo que invierte el país en ciencia, qué investigan en Física de Partículas, y después escriben un informe evaluando la situación científica al Ministerio de Ciencia de ese país; por lo general, cada país es visitado al menos cada ocho años. Alberto Ruiz fue el delegado español de la RECFA de 1996 a 1998.

5. La incorporación al experimento CDF en Fermilab

En 1994, mientras tenía lugar el desarrollo del experimento DELPHI, se incorporó al grupo cántabro la doctora Teresa Rodrigo Anoro procedente del CIEMAT, la cual había iniciado su período postdoctoral en 1988 en el CERN en el experimento UA1 sobre la búsqueda de los bosones W y Z, colaborando en el diseño del calorímetro de este. Inicialmente Teresa Rodrigo participó en la colaboración del experimento CDF como invitada científica de la Universidad de Pisa, Italia [27]. Tiempo más tarde, en 1990 obtendría una plaza como científica asociada en el Fermilab de Chicago gracias a su trabajo en el CERN. En Fermilab Rodrigo colaboró en el *Run I* del experimento CDF, correspondiente a la toma de datos que se desarrolló desde 1992 hasta 1996. La participación del personal español hasta entonces fue mediante becas del Ministerio de Educación y Ciencia de España, que financiaban periodos postdoctorales en este laboratorio, con la posibilidad de ser contratado como fue en el caso de Teresa Rodrigo. Cabe decir que otros países como Rusia, Italia, Alemania, Canadá, EEUU y Japón formaron parte de la colaboración CDF desde sus inicios, pero no fue este el caso de España.



Figura 5. Colaboración CDF-I, resaltada en rojo está Teresa Rodrigo Anoro [28].

La incorporación de Teresa Rodrigo al grupo cántabro partió de la oferta de una plaza de profesor titular en la UC y se debió a un interés mutuo por parte tanto del grupo de Física de Altas Energías de Cantabria, como por parte de Rodrigo [24], quien además aporta al grupo la introducción de la física hadrónica⁶ como línea de trabajo [29].

⁶ La física de hadrones estudia la naturaleza de las partículas hadrónicas, formadas por quarks, los cuales sufren un confinamiento debido a la interacción fuerte. Este tipo de partículas compuestas se dividen en bariones y mesones.

En aquel momento, Fermilab disponía de un acelerador de hadrones protón-antiprotón, el Tevatrón, en funcionamiento hasta 2010, en el cual transcurrieron diversos experimentos también en el ámbito de la Física de Altas Energías y donde colaboraba personal científico español, habitualmente para realizar su período postdoctoral. Rodrigo, que procedía del CIEMAT, llevaba varios años de postdoc en Fermilab, desde la primera fase del Tevatrón. En Fermilab colaboró en la primera etapa del experimento CDF (CDF-I). Allí coincidió con Gervasio Gómez Gramuglio, miembro del experimento DZero y procedente de la Universidad de Maryland, quien a su vez se incorporó años después al grupo cántabro [27].

Antes de su incorporación en la UC, Teresa Rodrigo y Alberto Ruiz ya se conocían del CERN debido a que eran de los pocos españoles que trabajaban entonces en dicho laboratorio. Allí, Teresa participó en el experimento UA1 en el cual se descubrieron los bosones Z^0 , W^+ y W^- en 1983. Rodrigo no se incorporó al grupo inmediatamente después de conseguir la plaza en 1994, sino que esperó resultados del proyecto en el que trabajaba ya que estaba participando entonces en el descubrimiento del quark top en CDF-I de Fermilab, siendo en enero de 1995 cuando se descubrió.



Figura 6. Teresa Rodrigo Anoro junto con Alberto Ruiz [Alerta, 29/4/94].

En 1995 se aprobó la creación del Instituto de Física de Cantabria (IFCA), un instituto mixto entre la Universidad de Cantabria y el CSIC, que fue fundado bajo la dirección del doctor Xavier Barcons Jáuregui. En sus primeros años, el IFCA contaba con los departamentos de Astrofísica y Estructura de la Materia, siendo en este último donde trabajaron Ruiz y Marco de Lucas desde sus inicios. Paralelamente, en el Departamento de Física Moderna de la UC trabajaron Ruiz, Rodrigo y Matorras, entre otros. En la actualidad el IFCA está formado por los grupos de investigación en Física de Partículas e Instrumentación, Galaxias y AGNs, Cosmología Observacional e Instrumentación, Computación Avanzada, Dinámica No Lineal, y Meteorología y Minería de Datos [22,30].

Durante la segunda mitad de la década de los noventa los vínculos entre el grupo de Cantabria y Fermilab fueron muy intensos. Siendo alumna de la UC, Rocío Vilar desarrolló allí su tesis doctoral, codirigida por Teresa Rodrigo y Juan Antonio Valls Ferrer. Vilar conoció a Teresa Rodrigo en Fermilab, pues allí había desarrollado su tesina y donde comenzaría también su estudio de tesis doctoral en CDF-I sobre la búsqueda del bosón de Higgs y de partículas technicolor en colisiones protón-antiprotón a $\sqrt{s} = 1.8$ TeV. Pudo desarrollar la tesis en su totalidad desde allí gracias a una beca de la Fundación Botín en calidad de invitada científica de laboratorio en el Fermilab [27].

Además de Vilar desarrollando su tesis, estuvieron en Chicago de postdoc Iván Vila y Susana Cabrera, de Valencia. Vila colaboró con varios grupos, pero en concreto se unió formalmente al grupo del MIT allí para trabajar en el diseño y desarrollo de un detector de tiempo de vuelo innovador y de gran impacto científico para la época, además de trabajos con el calorímetro del detector [29]. En 2001, a la vuelta de Vila a la UC, Rocío Vilar y Gervasio Gómez viajarían de nuevo a Chicago para desarrollar allí su etapa postdoctoral realizando una estancia de un año en Fermilab con la intención de continuar su trabajo en CDF, lo que hicieron hasta 2004.

El grupo cántabro participó en el segundo *run* de toma de datos del experimento CDF, donde el detector dispuso de mayor luminosidad y mejores características. El IFCA sería la primera institución española en colaborar como tal gracias principalmente a la propuesta de Rodrigo para participar en dicho experimento, y de formar parte de Fermilab como miembro de la colaboración anterior, experimento al que Alberto Ruiz se dedicó íntegramente a partir de 1999. De la misma manera otras instituciones se integrarían a la colaboración CDF gracias a sus investigadores españoles postdoctorales que participaron en el primer *run* como es el caso de Mario Martínez de Barcelona y Jorge Fernández de Trocóniz de la UAM [27]. En esta época se incorporaron IFAE, CIEMAT y Oviedo, con la coordinación del IFCA (Alberto Ruiz) de la financiación española en Fermilab.

Después de este período de expansión, y gracias al contacto con grupos de investigación a nivel internacional, el grupo amplía el espectro de su trabajo, por lo que surge en este momento un desdoblamiento en la actividad del grupo. Rodrigo gestionaría el inicio de un subgrupo más que se dedicase al experimento CMS, incorporando así nuevo personal investigador al grupo.

Se crean entonces en el grupo de Altas Energías de Cantabria dos subgrupos, uno dedicado al experimento CDF liderado por Alberto Ruiz desde 1999, encargado de la construcción de uno de los subdetectores que midiera el tiempo de vuelo de las partículas, y otro en CMS liderado por Teresa Rodrigo, la cual a su vez se dedica a desarrollar todo el trabajo de iniciación para la colaboración [24], además del personal investigador que aún continuaba con trabajos en DELPHI, como es el caso de Rafael Marco de Lucas, actualmente en el grupo de computación del IFCA [29]. Aparte, existe personal del grupo que participa conjuntamente en más de una colaboración a la vez, como es el caso de Rodrigo, que se dedicó a CDF y CMS. Entre las tareas a realizar en CDF estaba la de la calibración *offline* del detector para obtener

medidas correctas, análisis de datos en la probabilidad de producción del quark top y desarrollo de métodos para la identificación del quark *bottom* [27].

Cuatro años después, en 2006 finaliza un tercer upgrade del Tevatrón dando comienzo al *run* IIb donde se actualizaría el *trigger*, el calorímetro, y se cambiarían los detectores de silicio aumentando considerablemente la luminosidad.

En CDF también se trató de observar el bosón de Higgs, fallidamente debido a que la señal recibida no era lo suficientemente fuerte respecto al ruido de fondo, siendo el estándar de cinco sigmas⁷. Pero aún así se obtuvieron resultados reveladores sobre los límites en su masa, resultados que fueron trascendentales para su posterior descubrimiento.

En CDF, Alberto Ruiz dirige las tesis de Jónatan Piedra sobre la determinación de Δm_d , a su vez codirigida por Vila, y la de Bruno Casal sobre la medida de la sección eficaz de producción del quark top y del elemento V_{tb} de la matriz CKM. Teresa Rodrigo además de la tesis de Rocío Vilar, dirige a varias personas que dejaron el grupo para seguir la investigación desde la Universidad de Oviedo. Aparte, en este mismo experimento, Cuevas dirige la tesis de Jesús Manuel Vizán, junto con Vilar codirige la de Bárbara Álvarez González de la Universidad de Oviedo sobre la búsqueda del bosón de Higgs asociado con un bosón W usando la técnica de elemento de matriz, y junto con Gervasio Gómez dirige la de Enrique Palencia Cortezón sobre la medida de la sección eficaz de producción de dos quarks top.

En 2011, el experimento CDF dejaría de recoger datos definitivamente.

Ambos experimentos, tanto DELPHI como CDF, fueron cruciales para el establecimiento del modelo estándar, ya que ambos eran complementarios: LEP era un acelerador de partículas leptónico, mientras que Tevatrón era un acelerador de partículas hadrónico.

⁷ Para declarar un descubrimiento en el Física de Partículas con el rigor científico necesario, dicho resultado debe superar un nivel de confianza estadística de cinco sigmas, es decir, que la probabilidad de que el resultado sea falso sea de uno entre tres millones y medio (probabilidad de error de 0.000057%).

6. La participación en el experimento CMS y el descubrimiento del bosón de Higgs

Durante la participación del grupo de Cantabria en CDF, Teresa Rodrigo impulsó las negociaciones para la colaboración en el experimento *Compact Muon Solenoid* (CMS) junto con el CIEMAT y diversos grupos italianos, para participar en los experimentos que se desarrollarían en el futuro acelerador protón-protón que se estaba empezando a construir en el CERN, el *Large Hadron Collider* (LHC), un proyecto en el cual actualmente colaboran unas diez mil personas esparcidas entre 225 institutos de investigación y universidades de 23 países.

El diseño y la planificación de LHC surgió en la década de los ochenta, pero no sería hasta 1998 que comenzó su construcción, la cual finalizaría en 2008. Dicho acelerador ocupó el túnel que dejaría el acelerador LEP cuando se desmonta en el año 2000.

En una primera instancia, el grupo de Cantabria colabora desde 1995 en la construcción de un Sistema Link para el detector, un sistema de alineamiento que tenía la tarea de monitorizar la posición relativa de ambos subdetectores, el *Central Tracker* y el *Muon Spectrometer* con la intención de corregir desalineaciones entre los subdetectores. Además, el sistema debía gestionar la transmisión de datos desde los distintos sensores y detectores hacia los sistemas de almacenamiento de los datos [32]. Dicho sistema lanzaba 12 láseres por el interior del detector, golpeando en los sensores, y a su vez indicaba dónde había golpeado el láser con la intención de conocer la disposición por capas de las doscientas cincuenta cámaras de muones. En el CIEMAT de Madrid se hizo la segunda capa que constaba de 60 cámaras de muones. La calibración se da continuamente gracias a este sistema lo que permite que se obtengan datos precisos [33].

En 2007 Iván Vila comienza una nueva línea de investigación de instrumentación sobre el desarrollo de nuevas tecnologías en colisionadores y semiconductores, además de colaborar en futuros experimentos como el *International Linear Collider* (ILC), el RD50 sobre nuevos detectores de silicio capaces de soportar altos niveles de radiación y en los DRDs⁸ del CERN [29]. Alberto Ruiz es el coordinador nacional de la Red de Futuros Aceleradores, con puesto en el *Executive Board* del ILC.

Una vez construido cada uno de los cuatro detectores, ATLAS, CMS, ALICE y LHCb estos comienzan a tomar datos. En el caso del primer *run* del LHC, CMS comenzaría a recoger datos desde 2010 hasta 2013, con energías de 7 (2010-2011) y 8 TeV (2012-2013) en las colisiones entre los protones. El bosón de Higgs llegaría a observarse el 4 de julio de 2012 por las Colaboraciones ATLAS y CMS.

En 2015 daría comienzo el *Run 2* del LHC, llegando a la energía de 13 TeV, siendo el objetivo de esta ronda el de obtener medidas más precisas del bosón de Higgs, además de la búsqueda de partículas supersimétricas.

⁸ Los DRDs son colaboraciones y actividades llevadas a cabo en el CERN sobre la investigación y desarrollo de nuevos tipos de detectores.

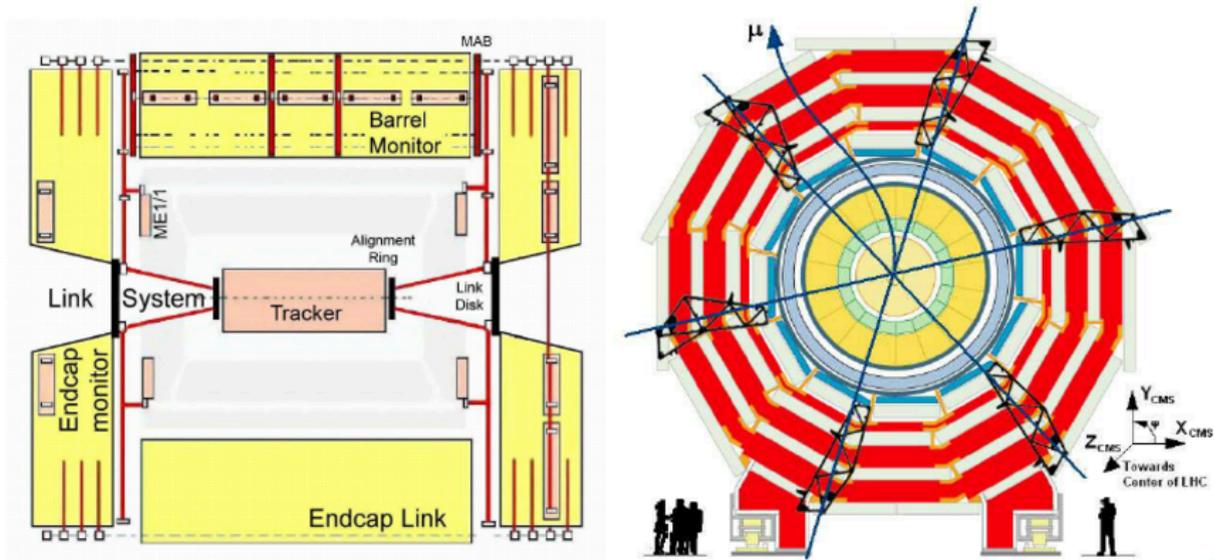


Figura 7. Representación esquemática del detector CMS del CERN. En ella se puede apreciar el Sistema Link en el cual el grupo cántabro trabajó y el *Tracker* interno en el cual trabaja en la actualidad [34].

En CMS, Teresa Rodrigo dirigió un total de cinco tesis doctorales, concretamente las tesis de Iván Vila sobre el estudio y desarrollo de un sistema de alineamiento para la medida precisa de muones, la de María Amparo López Virto sobre la caracterización y pruebas de validación del Sistema Link de alineamiento del detector, junto con Celso Martínez dirigen la tesis de Mar Sobrón Sañudo sobre la geometría del detector CMS reconstruida con el sistema de alineamiento Link. Junto con Javier Cuevas, dirige la tesis de Rebeca González Suárez sobre la búsqueda del bosón de Higgs, y junto con Iván Vila la de Jordi Duarte Campderrós sobre la medida de la sección eficaz de producción de dibosones WZ a 7 y 8 TeV de energía del centro de masas. Por su parte, Antonio Ferrando García, científico del CIEMAT dirige la tesis doctoral de Marcos Fernández García sobre el sistema de alineamiento para CMS. Francisco Matorras dirige la tesis doctoral de Alicia Calderón sobre la construcción, calibración y evaluación del Sistema Link de alineamiento del espectrómetro de muones, y la de Pablo Martínez Ruiz del Árbol sobre el desarrollo y aplicación de algoritmos de alineamiento para la optimización de la detección de muones. Javier Cuevas dirige la tesis doctoral de Patricia Lobelle Pardo sobre la medida de la sección eficaz de producción del quark top y búsqueda de un bosón de Higgs del modelo estándar en estados finales dileptónicos a $\sqrt{s} = 7$ TeV. Rocío Vilar dirige, junto con Gervasio Gómez, la tesis de Clara Jordá Lope, y junto con Alicia Calderón, la de Nicolò Trevisani sobre la búsqueda de materia oscura producida junto a un bosón de Higgs, y la de Pedro José Fernández sobre la producción de dos bosones W en colisiones pp a una energía de centro de masas de $\sqrt{s} = 13$ TeV. Celso Martínez dirige, junto con Luca Scodellaro, la tesis de Javier Andrés Brochero sobre la medida de la sección eficaz de producción de pares tt en el canal dileptónico a $\sqrt{s} = 8$ TeV, junto con Pablo Martínez Ruiz del Árbol la tesis de Celia Fernández sobre la búsqueda de partículas de alta vida media en su desintegración a vértices dileptónicos desplazados. Pablo Martínez Ruiz del Árbol, junto con Jónatan Piedra, dirigen las tesis de Juan García sobre la búsqueda de materia oscura en asociación con pares del quark top, y la de Cédric Gerald M. Prieëls sobre la búsqueda de

materia oscura en asociación con quarks top. Jónatan Piedra, junto con Luca Scodellaro, dirigen la tesis doctoral de Bárbara Chazin Quero sobre la búsqueda de la producción de parejas de *charginos* y quarks top en estados finales con dos leptones de carga opuesta. Jesús Marco, junto con Alicia Calderón, dirigen la tesis de José Ibán Cabrillo Bartolomé sobre la preservación de datos en el marco de LHC, y Gervasio Gómez y Jordi Duarte dirigen la tesis de Andrea García sobre sensores pixelados altamente resistentes a la radiación para la mejora a alta luminosidad del detector CMS.

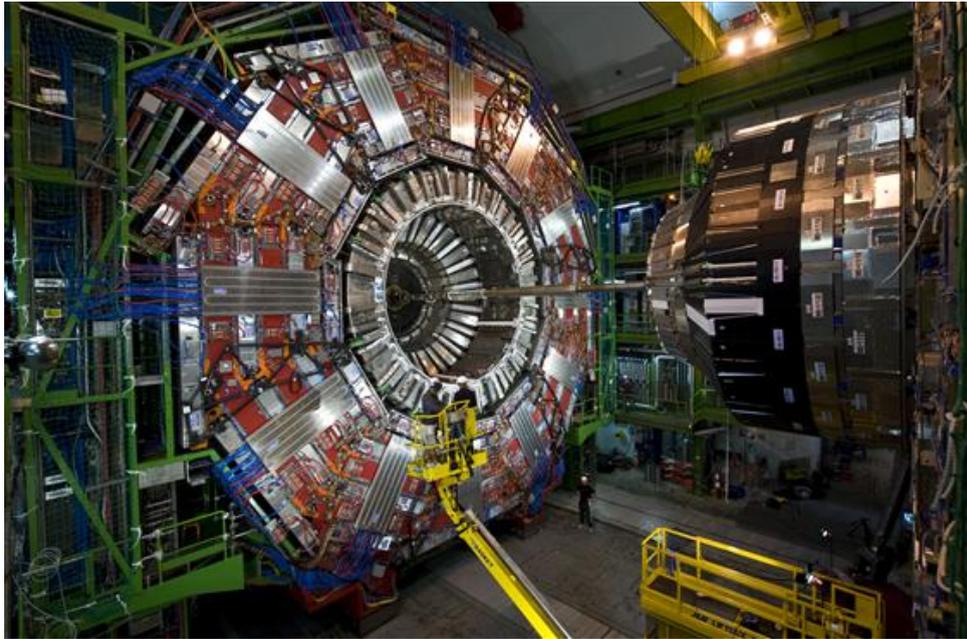


Figura 8. Imagen del detector CMS del CERN [35].

Jesús Marco junto con Isidro González Caballero (actualmente en la Universidad de Oviedo) contribuyeron al desarrollo de software con C++⁹ del experimento CMS, además Marco fue el encargado de un proyecto de computación para los tiers¹⁰ de CMS, siendo en 2001 el responsable de un Tier-2 en el IFCA. El procesado de todos los datos obtenidos en CMS se llevarían a cabo mediante el *Worldwide LHC Computing GRID*, una red que conecta aproximadamente 170 centros de investigación de 40 países distintos. También se hicieron otros tiers en España, un Tier-1 en el Institut TIC de Barcelona para CMS y ATLAS, y también otro Tier-2 en el CIEMAT [25].

En CMS Vilar se encargó del análisis de datos en medidas de WW^* , del bosón de Higgs en su descubrimiento, de la búsqueda de materia oscura asociada al quark top o al bosón de Higgs, además de encargarse de las validaciones del *software* de muones [27].

⁹ C++ es un lenguaje de programación usado para el desarrollo de *software*, y entre otros, usado para el experimento CMS.

¹⁰ En el modelo de computación distribuida del CMS, el manejo y procesado de grandes volúmenes de datos se hace mediante una jerarquía de tiers (niveles), específicamente en un centro con Tier-2 se llevan a cabo análisis detallados y simulaciones. En un centro Tier-1 se almacenan grandes cantidades de datos, aparte de realizarse un procesado adicional desde el Tier-0, situado en el CERN donde se hace un procesado inicial de los datos y estos se almacenan sin procesar.

La participación de Teresa Rodrigo en los diferentes proyectos internacionales y el prestigio científico alcanzado hicieron que fuera nombrada Presidenta del Consejo de Colaboración Internacional de CMS (*CMS Collaboration Board*) y en 2012 participó en el descubrimiento del bosón de Higgs en el LHC.

El 4 de julio de 2012, las colaboraciones ATLAS y CMS anunciaron la observación del bosón de Higgs en el CERN, hito en el cual el grupo de Altas Energías de Cantabria colaboró significativamente. Esto sucedió ya que se mostró un exceso de datos respecto al modelo estándar (simulado mediante métodos de Monte Carlo¹¹) sin incluir el bosón de Higgs, prediciendo así una nueva partícula, vista en ambos experimentos. De esta manera, los físicos Peter Higgs y François Englert recibieron el Premio Nobel de ese año por la teorización de este bosón cuarenta años antes. Este descubrimiento ocurrió en el *Run 1* del LHC, período que ocurrió desde 2010 hasta 2014, momento en el que paró de chocar protones, hasta continuar con el *Run 2* desde 2015 hasta 2018. Cuando se produjo el descubrimiento se produjo una comparecencia pública por parte de los portavoces (*spokesperson*) de los experimentos CMS y ATLAS, siendo el físico Joseph Incandela y la actual directora del CERN, Fabiola Gianotti, respectivamente.

En 2022 comienza el *Run 3* del LHC, donde se ha vuelto a aumentar la energía a $\sqrt{s} = 14$ TeV con la intención de buscar partículas o fenómenos físicos nuevos.

En 2014, Rodrigo sería responsable del desarrollo de un plan junto con Alicia Calderón e investigadores de otros grupos, sobre una nueva política científica para que los datos recogidos en CMS fueran públicos. El problema de estos datos sería el desarrollo de un *software* capaz de analizarlos [36]. Además, Rodrigo formó parte del Comité de Política Científica del CERN hasta 2017.

Aunque desarrolla también otros proyectos, en el CERN el grupo cántabro colabora principalmente con CMS, no solo en el análisis de datos, sino también en el *upgrade* del *Run 4* ya que a finales de 2025 CMS parará durante 3 años para cambiar diversas piezas del detector y así mejorarlo. En este caso la tarea del grupo de Cantabria es cambiar el *tracker* interno, el detector más cercano al punto de colisión y el cual al recibir grandes dosis de radiación termina por degradarse [37]. Estos detectores se van a sustituir por unos de silicio 3D desarrollados tanto en Cantabria como en otros sitios de Europa. Además de cambiar la primera capa del detector en CMS, el grupo cántabro va a implementar otro subdetector llamado *Forward Pixel* incorporando LGADs [33].

En la actualidad la actividad del grupo cántabro se desarrolla en tres ámbitos diferentes. Por un lado, está analizando datos del *Run 3* que se está llevando a cabo desde 2022 a $\sqrt{s} = 13.6$ TeV hasta 2025. Por otro, está trabajando en el *upgrade* de CMS para el año 2029, momento en el que comenzará el *Run 4* hasta 2032. Y una tercera línea de trabajo se encarga de la computación y del flujo de *petabytes* de datos necesarios para el análisis. Además, parte del

¹¹ Monte Carlo es una técnica computacional utilizada en la simulación y en la comparación de resultados experimentales con predicciones teóricas y modelos simulados, con la intención de comprender mejor los procesos físicos que se llevan a cabo y verificar modelos teóricos.

GRID del CERN se encuentra en el superordenador Altamira, instalado en 2007 como parte de la Red Española de Supercomputación, y necesario para el análisis de estas grandes cantidades de datos, ya que hasta entonces eran muy caro estos análisis y terminaba siendo más eficiente viajar al CERN [29]. Todos estos subgrupos, al formar parte del IFCA, están financiados por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, lo cual es necesario para que el grupo cántabro pueda colaborar con el CERN mediante la presentación de proyectos y con la obtención de financiación pueden cubrirse sueldos del personal investigador.

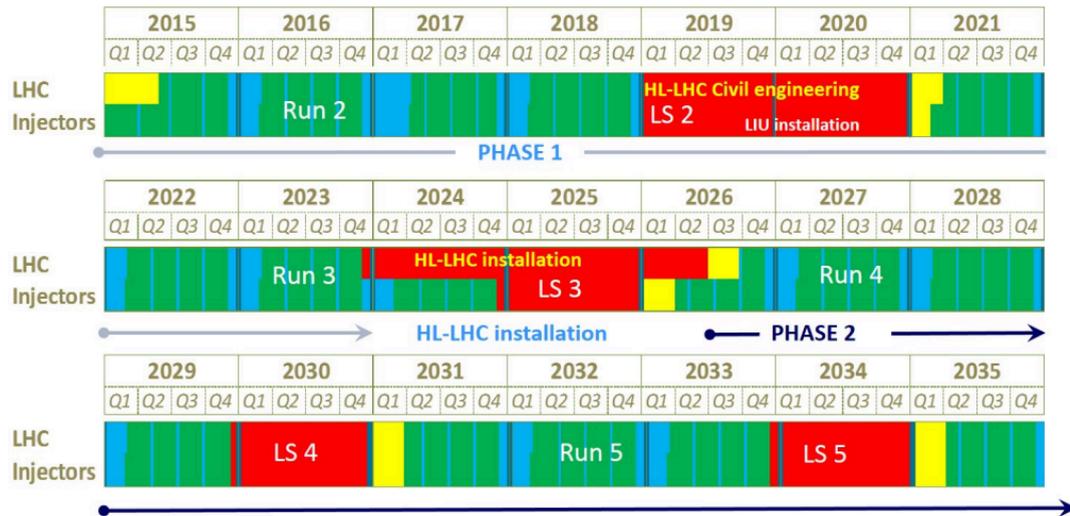


Figura 9. Esquema de la planificación del proyecto LHC desde 2015 hasta 2035, indicando las fases de toma de datos (*Runs*) en verde y los apagados prolongados, etiquetados como LS (*long shutdowns*), en rojo. También se indican las fases de puesta en marcha del haz en amarillo y las paradas técnicas en azul. La planificación se muestra tanto para el LHC como para sus inyectores [38].

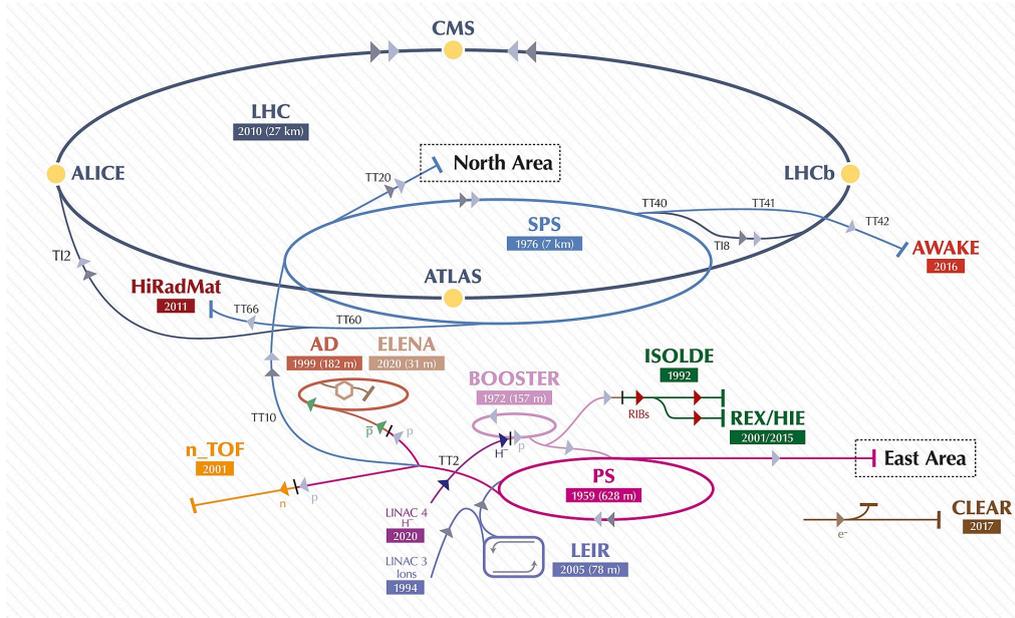


Figura 10. Representación esquemática de la disposición de los cuatro detectores principales ATLAS, CMS, ALICE Y LHCb, además de los inyectores en orden: el acelerador Linac al PSB en rosa, al PS en magenta, al SPS en azul claro [39].

7. La incorporación al experimento DAMIC-M

En 2017 el grupo de física de partículas abre una línea de trabajo nueva liderada por Rocío Vilar, la búsqueda directa de materia oscura. Personal del grupo ya habría contribuido en su búsqueda mediante el uso de aceleradores y la producción tanto de quarks top, como del bosón de Higgs. Por ello en ese mismo año el grupo comenzaría una nueva colaboración en el experimento DAMIC-M sobre la búsqueda de materia oscura.

Vilar acudiría a la conferencia *Lepton Photon*, en la cual se pondría de manifiesto la importancia de la materia oscura como unión entre cosmología, astrofísica y física de partículas. Otra de las motivaciones de carácter estratégico para el grupo provino de Teresa Rodrigo, sugiriendo esta nueva línea de investigación. El desarrollo de esta línea de trabajo aportaría un objetivo común al instituto, ya que el estudio de materia oscura también se trata en otros departamentos del IFCA.

En aquel entonces había en marcha una gran cantidad de diversos experimentos en la búsqueda de materia oscura, pero Vilar se interesó especialmente en DAMIC-M ya que usaba como detectores CCDs¹² formados por silicio, material con el cual se ha trabajado extensamente en el grupo de Cantabria por su utilidad en la construcción de detectores como con los que trabajarán en CMS en la construcción del *tracker* interno que se está haciendo para 2025.

La idea de DAMIC-M comienza en 2011 cuando se realiza un pequeño experimento con CCDs en Canadá con resultados favorables, por lo que el *spokesperson* de Chicago pediría una ayuda ERC¹³ y situaría el laboratorio subterráneo principal en Modane, Francia, óptimo por su relieve montañoso en el momento de frenar la radiación cósmica.

La hipótesis de la que se parte en este experimento es que la materia oscura, la cual se teoriza que orbite alrededor de nuestra galaxia, colisione con el detector subterráneo en Modane. Dicha colisión se considera muy poco probable y de muy poca energía.

La futura observación de materia oscura de manera directa supondría un resultado complementario, ya que sería necesario que sea observada en colisionadores para comprobar el modelo físico y que sea un resultado conciliador con la cosmología y la astrofísica. Todo ello con el objetivo de saber cuál es la naturaleza de esta materia.

Esta colaboración les dio la oportunidad también de trabajar en el laboratorio subterráneo español de Canfranc, en Huesca. Cabe decir que en esta colaboración se están usando laboratorios subterráneos gracias al bajo ruido de fondo que se encuentra en estos lugares, donde no llegan las partículas cósmicas procedentes del espacio y que no dejarían detectar a la materia oscura, la cual se teoriza con una masa muy baja.

¹² Los CCDs son sensores fotodetectores usados en cámaras y telescopios para captar imágenes. Convierten la luz que captan en señales eléctricas para su digitalización y procesamiento, obteniendo así una alta resolución. Estos mismos sensores están siendo usados en la colaboración DAMIC-M.

¹³ La *European Research Council* es una beca de alto prestigio científico con la motivación de iniciar una nueva rama de la investigación con la condición de iniciar la investigación en Europa.

Vilar dentro del experimento ostenta cargos como el de encargada del bajo fondo, las medidas de los materiales a usar y así mismo es la encargada del comité de publicaciones y de charlas de DAMIC-M. Por otra parte en el CERN forma parte del comité que evalúa los proyectos que se presentan de los nuevos aceleradores de protones que se diseñan para el LHC, además de formar parte de la comisión de investigación de la Universidad de Cantabria.

En la actualidad ya se ha hecho todo el desarrollo y diseño de las CCDs de silicio que se quieren usar para el experimento, por lo que se tiene previsto para este verano instalarlas en Modane y a finales de año o principios del 2025 comenzar a tomar datos. El plan es tomar datos durante 2 años para posteriormente analizarlos e interpretar los resultados obtenidos.

Este experimento sigue desarrollándose en la actualidad y lo forma una colaboración internacional de diversos países, siendo los grupos de investigación que componen la colaboración: el IFCA en Cantabria, la Universidad de Chicago, la Universidad de Washington, el Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico en Richland, Washington, el *Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Energies* (LPNHE) en París, el LAL en Bures-sur-Yvette, el LSM en Modane, los tres en Francia, la Universidad de Zurich, el Instituto Niels Bohr en Copenhague, Dinamarca, la Universidad de Dinamarca del Sur, la Universidad Federal de Río de Janeiro y el Centro Atómico Bariloche en San Carlos de Bariloche, Argentina [27,40].

8. Análisis y conclusiones

Este trabajo de reconstrucción de la historia de la física de partículas en Cantabria ha tenido como principal foco de atención las personas que han participado en ella. Por ello, hemos recabado información que permitiera identificarlas, precisar en la medida de lo posible la cronología de su participación y también su genealogía académica, ya que en muchos casos el origen de la participación en el grupo está en la realización de una tesis doctoral. Hemos obtenido esta información a partir de múltiples fuentes: análisis de los CVs de investigadores e investigadoras del grupo, documentación del archivo del grupo, consulta de diversas bases de datos y entrevistas realizadas a personal investigador diverso, así como la identificación de quienes dirigieron tesis doctorales en el grupo y las memorias académicas anuales de la UC desde 1982 hasta 2002¹⁴. Esta tarea de recabar información resulta imprescindible para identificar a las personas que en ella han participado y los periodos en los que se desarrolló su actividad. Se trata de un paso previo imprescindible para poder analizar la dinámica evolutiva del grupo, atendiendo no a su producción científica -como es habitual- sino al registro del personal, lo cual posibilita el análisis de las gráficas representativas de la evolución de este, y permite identificar y comparar la participación de hombres y mujeres en el desarrollo de las tareas del grupo. En este sentido, es importante señalar que nuestro trabajo ha permitido también identificar por su nombre a cuatro microscopistas que realizaron tareas de observación que resultaban imprescindibles para el trabajo científico antes de su automatización.

Como se puede observar en la Tabla 1, hemos identificado un total de 47 tesis doctorales defendidas en el marco del grupo, incluyendo la fecha en que se concretó la participación, la fecha de defensa, el título, y su dirección, así como el trabajo posterior realizado en el grupo y/o tras abandonarlo [12, 22, 41, 42, 43, 44].

¹⁴ A partir del año 2003 las memorias académicas de la UC dejan de publicar la actividad de investigación de todos los departamentos, centros e institutos de la institución, pasando a informar sobre dicha actividad en el Repositorio Abierto de la Universidad de Cantabria, UCrea.

| n° | Nombre y apellidos | Entrada al grupo | Salida del grupo | Fecha de defensa de tesis | Tesis doctoral | Dirección | Trabajo posterior / actual |
|----|---------------------------------|-----------------------|------------------|---------------------------|---|---------------------|--|
| 1 | Eugenio Villar | Crea el grupo en 1971 | 1986 | 1957 | Análisis de los procesos nucleares ocurridos al bombardear gas acetileno con deuterones de 19,17 MeV | Joaquín Catalá | Estudios sobre el clima, cuidado y preservación del medio ambiente y termodinámica |
| 2 | Alberto Ruiz Jimeno | 1974 | Sigue | 1978 | Análisis de los mecanismos de emisión y de las correlaciones angulares de los productos de interacción del ^{16}O a 2,1 GeV/A con núcleos de emulsión | Eugenio Villar | Profesor Emérito de la UC |
| 3 | Ramón Niembro Bárcena | | 1986 | 1980 | Análisis de la interacción p-núcleo a 400 GeV y su interpretación a través de un modelo fenomenológico | Eugenio Villar | Física nuclear en el Departamento de Física Moderna de la UC |
| 4 | Mercedes López Quelle | | 1986 | 1984 | Un nuevo método de detección y análisis de las partículas emitidas en interacciones de muy alta energía utilizando telescopios de emulsiones | Eugenio Villar | |
| 5 | María Ángeles López Agüera | | | 1986 | Aportación al diseño y puesta a punto del calorímetro electromagnético <i>Forward</i> del proyecto DELPHI en el anillo de colisiones $e^+ e^-$ del LEP | Eugenio Villar | Universidad de Santiago |
| 6 | Laura M. Bravo Sánchez | 1982 | | 1986 | Estudio de la vida media y mecanismos de producción de partículas con encanto a través de las experiencias híbridas WA-45 y WA-58 del CERN, utilizando un haz de fotones de 20 a 70 GeV | Eugenio Villar | |
| 7 | Francisco Javier Cuevas Maestro | 1983 | | 1987 | Simulación en DELPHI, aplicación al TOF y simulación rápida del experimento | Alberto Ruiz Jimeno | Crea un grupo de investigación en física de altas energías en la Universidad de Oviedo |
| 8 | Juan José García Pérez | | | 1987 | Desarrollo de un dispositivo experimental (experiencia WA-71 del CERN) para la producción, detección y análisis de partículas con sabores pesados | Alberto Ruiz Jimeno | |
| 9 | María Mercedes Fernández Alonso | 1983 | 1989 | 1989 | Determinación de la constante α_s de acoplamiento fuerte en el experimento DELPHI del acelerador LEP | Alberto Ruiz Jimeno | Profesora Titular de la Universidad Jaume I |
| 10 | Jesús Marco de Lucas | 1986 | Sigue | 1989 | Calorimetría electromagnética en la zona <i>Forward</i> de DELPHI y determinación de $\sin^2\theta_w$ mediante la medida de la polarización del tau en el canal ro | Alberto Ruiz Jimeno | Científico Titular del CSIC |
| 11 | Ángel J. Camacho Rozas | | Sigue | 1990 | Desarrollo del soporte de comunicaciones para el entorno <i>online</i> del experimento DELPHI del acelerador LEP del CERN | Alberto Ruiz Jimeno | IFCA |

| | | | | | | | |
|----|-------------------------------------|-------------|--------------|------|---|---|---|
| 12 | María Begoña Sánchez Madariaga | 1983 | | 1990 | Estudio de correlaciones geométricas en la experiencia NA-17, P-AI a 300 GeV | Mercedes López Quelle | (1993-2021) En el departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la computación de la UC |
| 13 | Francisco Matorras Weinig | | Sigue | 1993 | Determinación de parámetros electrodébiles por medio de la reacción $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow t\bar{t}$ en el experimento DELPHI del acelerador LEP | Alberto Ruiz Jimeno y Javier Cuevas Maestro | Profesor Titular y Catedrático de Física de la UC |
| 14 | Celso Martínez Rivero | | Sigue | 1996 | Búsqueda de bosones de Higgs neutros supersimétricos en el canal a cuatro jets con el detector DELPHI de LEP | Jesús Marco de Lucas | Científico Titular del CSIC |
| 15 | José María López García | | | 1997 | Estudio de las desintegraciones del leptón tau en el experimento DELPHI del acelerador LEP | Francisco Matorras y Alberto Ruiz | |
| 16 | Iván Vila Álvarez | 1994 — 2003 | 1999 — Sigue | 1999 | Estudio y desarrollo de un sistema de alineamiento para la medida precisa de muones en CMS | Teresa Rodrigo Anoro | Investigador Científico del CSIC |
| 17 | Rocío Vilar Cortabitarte | 1995 — 2004 | 2000 — Sigue | 1999 | Búsqueda del bosón de Higgs y de partículas technicolor en colisiones pp a $\sqrt{s} = 1.8$ TeV | Teresa Rodrigo Anoro y Juan Antonio Valls | Profesora Contratada Doctora de la UC |
| 18 | Marcos Fernández García | | Sigue | 2001 | Un sistema de alineamiento para el experimento CMS (Detector Solenoidal de Muones) del Gran Colisionador Hadrónico (LHC) | Antonio Ferrando García | |
| 19 | Isidro González Caballero | 1995 | 2001 | 2001 | Búsqueda del bosón de Higgs en el experimento DELPHI en el acelerador LEP en sucesos con dos leptones tau y dos jets | Jesús Marco de Lucas | Profesor Titular de la Universidad de Oviedo |
| 20 | Guillermo Gómez-Ceballos y Retuerto | 1997 | 2001 | 2001 | Estudio de las propiedades de los bosones W y su aplicación a búsquedas de nuevas partículas en el experimento DELPHI | Francisco Matorras Weinig | MIT |
| 21 | Javier Fernández Menéndez | 1999 | 2003 | 2003 | Búsqueda de bosones de Higgs neutros supersimétricos en el experimento DELPHI de LEP hasta 209 GeV en sucesos a cuatro quarks b | Francisco Javier Cuevas Maestro | Profesor Titular de la Universidad de Oviedo |
| 22 | María Amparo López Virto | | Sigue | 2003 | Caracterización y pruebas de validación del Sistema Link de alineamiento del detector CMS | Teresa Rodrigo Anoro | IFCA |
| 23 | Jónatan Piedra Gómez | 2000 — 2012 | 2005 — Sigue | 2005 | Determinación de Δm_d y calibración absoluta del etiquetado de sabor para la medida de Δm_s , en desintegraciones reconstruidas completamente en el experimento CDF | Iván Vila y Alberto Ruiz | Profesor Contratado Doctor de la UC |

| | | | | | | | |
|----|--|-------------------|--------------------|------|---|--|--|
| 24 | Alicia Calderón Tazón | 2001 — 2012 | 2007 — Sigue | 2006 | Construcción, calibración y evaluación del sistema Link de Alineamiento del Espectrómetro de Muones del Experimento CMS | Francisco Matorras Weinig | Profesora Titular de la UC |
| 25 | Enrique Palencia Cortezón | 2002 | 2007 | 2007 | Medida de la sección eficaz de producción tt en colisiones pp con $\sqrt{s}=1.96$ TeV utilizando sucesos de leptón+jets en el detector CDF de Fermilab | Teresa Rodrigo Anoro y Gervasio Gómez | Profesor Titular de la Universidad de Oviedo |
| 26 | David Rodríguez González | 2000 — 2018 | 2007 — Sigue | 2007 | Gestión y minería de datos de física de Altas Energías en el proyecto <i>CROSSGRID</i> | Jesús Marco de Lucas | CSIC |
| 27 | Mar Sobrón Sañudo | 2004 | 2009 | 2009 | Geometría del detector CMS reconstruida con el sistema de alineamiento Link | Teresa Rodrigo Anoro y Celso Martínez | |
| 28 | Bruno Casal Laraña | 2006 | 2010 | 2010 | Medida de la sección eficaz de producción del quark <i>single</i> top y del elemento V_{tb} de la matriz CKM en CDF Run II | Alberto Ruiz Jimeno | <i>Seasoned Data Scientist</i> en Zepz |
| 29 | Rebeca González Suárez | 2006 | 2010 | 2010 | Búsqueda del bosón de Higgs del modelo estándar en el canal de desintegración $H \rightarrow WW^* \rightarrow 2\mu 2\nu$ en el experimento CMS del LHC | Teresa Rodrigo Anoro y Javier Cuevas Maestro | CBCAG en ATLAS |
| 30 | Pablo Martínez Ruiz del Árbol | 2005 — 2017 | 2010 — Sigue | 2017 | Desarrollo y aplicación de algoritmos de alineamiento para la optimización de la detección de muones en el experimento CMS del LHC | Francisco Matorras Weinig | Profesor Titular de la UC |
| 31 | Bárbara Álvarez González (Universidad de Oviedo) | 2006 | 2010 | 2010 | Search for the SM Higgs boson associated with a W boson using matrix element technique at the CDF detector at the Tevatron | Rocío Vilar Cortabitarte y Javier Cuevas Maestro | Profesora Contratada Doctora de la Universidad de Oviedo |
| 32 | Patricia Lobelle Pardo | 2007 | 2011 | 2011 | Medida de la sección eficaz de producción del quark top y búsqueda del bosón de Higgs del SM en estados finales dileptónicos con el detector CMS del LHC a $\sqrt{s} = 7$ TeV | Javier Cuevas Maestro (tutor: Alberto Ruiz Jimeno) | |
| 33 | Clara Jordá Lope | 2008 | 2013 | 2012 | Medida de la sección eficaz de producción del proceso WW en colisiones pp a $\sqrt{s} = 7$ TeV en el experimento CMS del LHC | Rocío Vilar Cortabitarte y Gervasio Gómez | <i>Data Scientist</i> en <i>Expedia Group</i> |
| 34 | Jordi Duarte Campderrós | 2007 — 2019 | 2014 — Sigue | 2014 | Medida de la sección eficaz de producción de dibosones WZ a 7 TeV y 8 TeV de energía del centro de masas en el experimento CMS | Teresa Rodrigo Anoro e Iván Vila | María Zambrano en el IFCA |
| 35 | Javier Andrés Brochero Cifuentes | 2010 | 2023 | 2014 | Medida de la sección eficaz de producción de pares top anti-top en el canal dileptónico a $\sqrt{s} = 8$ TeV con el detector CMS | Celso Martínez y Luca Scodellaro | Postdoc en el CIEMAT |

| | | | | | | | |
|----|---------------------------------|------|-------|------|---|--|---|
| 36 | Francisca Javiela Muñoz Sánchez | 2010 | 2014 | 2014 | Estudio de nuevos sensores de silicio para experimentos en futuros colisionadores de partículas | Iván Vila | <i>Research Fellow</i> en <i>Manchester University</i> |
| 37 | Muhammad Rehman | 2011 | 2016 | 2016 | Fenomenología de mezcla de sabor en modelos supersimétricos | Sven Heinemeyer y Mario E. Gómez | <i>COMSATS University Islamabad</i> |
| 38 | Esteban Currás Rivera | | | 2017 | Sensores de silicio avanzados para futuros experimentos en colisionadores | Iván Vila | |
| 39 | Leonardo Javier Galeta Alonso | | | 2017 | Predicciones teóricas para la Física de Higgs en el LHC | Sven Heinemeyer | |
| 40 | Juan García Ferrero | 2014 | 2018 | 2018 | Búsqueda de materia oscura en asociación con pares de quark top en el experimento CMS | Jónatan Piedra y Pablo Martínez | Profesor de Física y Química en el IES Padre Isla, León |
| 41 | Nicolò Trevisani | 2015 | 2019 | 2019 | Búsqueda de materia oscura producida junto a un bosón de higgs en el canal de desintegración a dos bosones W en colisiones de protones a $\sqrt{s}=13$ TeV de energía del centro de masa en el LHC con el experimento CMS | Rocío Vilar y Alicia Calderón | <i>Researcher</i> en KIT, Karlsruhe |
| 42 | Bárbara Chazin Quero | 2015 | 2019 | 2019 | Búsqueda de la producción de parejas de <i>charginos</i> y <i>squarks</i> top en estados finales con dos leptones de carga opuesta en colisiones protón-protón a $\sqrt{s} = 13$ TeV | Jónatan Piedra y Luca Scodellaro | |
| 43 | José Ibán Cabrillo Bartolomé | 2015 | Sigue | 2020 | Preservación de datos en el marco del LHC | Jesús Marco de Lucas y Alicia Calderón Tazón | Responsable de Computación Avanzada en el IFCA |
| 44 | Andrea García Alonso | 2018 | 2021 | 2021 | Sensores pixelados altamente resistentes a la radiación para la mejora a alta luminosidad del detector CMS del Gran Colisionador de Hadrones | Gervasio Gómez y Jordi Duarte (tutor: Iván Vila) | <i>Researcher</i> en Nikhef |
| 45 | Pedro José Fernández Manteca | 2018 | 2021 | 2021 | Producción de dos bosones W en colisiones protón-protón a una energía de centro de masas de $\sqrt{s} = 13$ TeV con el detector CMS del LHC | Rocío Vilar Cortabitarte y Alicia Calderón Tazón | Investigador Asociado en <i>Rice University</i> |
| 46 | Cédric Gerald M. Prieëls | 2017 | 2022 | 2022 | Búsqueda de materia oscura en asociación con quarks top en el estado final dileptónico a $\sqrt{s} = 13$ TeV | Jónatan Piedra y Pablo Martínez | Ingeniero de datos en Pfizer |

| | | | | | | | |
|----|-------------------------|------|------|------|--|-------------------------------------|--|
| 47 | Celia Fernández Madrazo | 2018 | 2023 | 2023 | Búsqueda de partículas de alta vida media en su desintegración a vértices dileptónicos desplazados en colisiones protón-protón a $\sqrt{s} = 13$ TeV con el detector CMS | Celso Martínez y Pablo Martínez | Postdoc en <i>Boston University</i> |
| 48 | Aitor Orio Alonso | 2020 | 2023 | 2023 | Tomografía muónica de alta resolución aplicada a la evaluación de la densidad de materiales en el contexto de la industria, la ingeniería civil y la hidrología | Pablo Martínez y Pablo Gómez García | Ingeniero Electrónico Industrial e Investigador en <i>Muon Systems</i> |

Tabla 1. Registro de las personas que han realizado su tesis doctoral en el grupo de Cantabria.

En la Figura 11 se han representado los datos sobre las tesis doctorales desarrolladas en el grupo de física de partículas de Cantabria en función del año en el que han sido defendidas, con los datos desagregados por sexo:

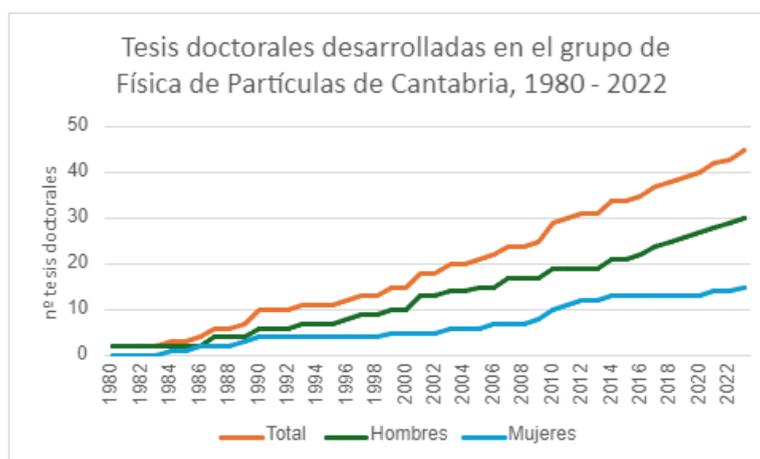


Figura 11. Diagrama lineal de la evolución de defensas de tesis doctorales sobre física de altas energías desarrolladas en la UC. La línea naranja representa el total de tesis doctorales defendidas, en verde aquellas realizadas por hombres, y en azul aquellas realizadas por mujeres.

En esta gráfica se observa cómo el incremento en el número absoluto de tesis leídas no favorece la equiparación de la participación de hombres y mujeres en el grupo.

En la Tabla 2 se han agrupado los datos de la Tabla 1 en rangos de cinco años, a excepción del primer rango, que comprende siete años. Ello permite observar el detalle de la evolución de la presencia de las mujeres como investigadoras en formación en el marco del grupo, desde 1978 hasta la actualidad. Además de ofrecer los números absolutos, se ha calculado su contribución en porcentaje respecto al total.

| Años | Tesis realizadas por hombres | Tesis realizadas por mujeres | Total de tesis doctorales | Porcentaje de tesis realizadas por mujeres (%) |
|--------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|--|
| 1978 - 1984 | 2 | 1 | 3 | 33,3 |
| 1985 - 1989 | 2 | 3 | 5 | 60 |
| 1990 - 1994 | 3 | 1 | 4 | 25 |
| 1995 - 1999 | 3 | 1 | 4 | 25 |
| 2000 - 2004 | 4 | 1 | 5 | 20 |
| 2005 - 2009 | 3 | 2 | 5 | 40 |
| 2010 - 2014 | 4 | 5 | 9 | 55,5 |
| 2015 - 2019 | 5 | 1 | 6 | 16,6 |
| 2020 - 2023 | 4 | 2 | 6 | 33,3 |
| 1978 - 2023 | 30 | 17 | 47 | 36,2 |

Tabla 2. Número de tesis doctorales realizadas en el grupo de física de partículas de Cantabria desde 1978 hasta 2023, en rangos de cinco años. Se ha diferenciado aquel trabajo realizado por hombres respecto al de mujeres.

En la Figura 12 se han representado los porcentajes de tesis realizadas por mujeres recogidos en la Tabla 2.

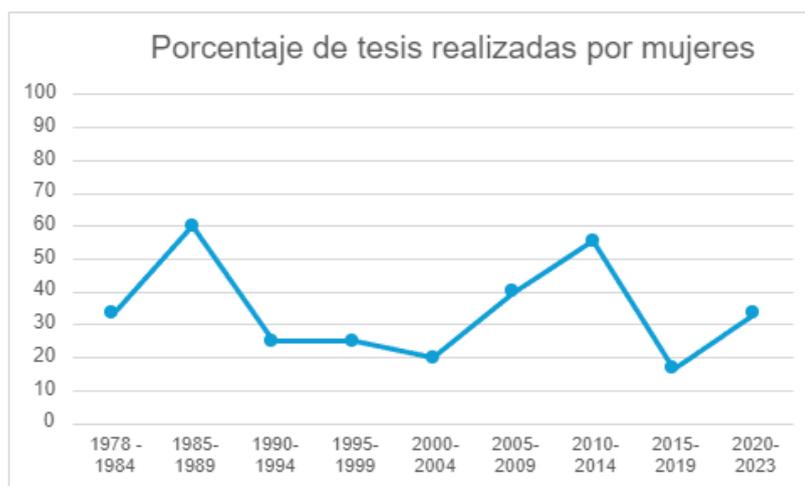


Figura 12. Diagrama lineal de la evolución porcentual de la defensa de tesis doctorales realizadas por mujeres sobre física de altas energías desarrolladas en la UC.

Se observa que no existe una tendencia sostenida en la mejora de la participación de las mujeres, sino que se producen altibajos en la misma, manteniéndose el predominio masculino. Este fenómeno no es exclusivo del grupo de física de partículas, sino que concuerda con la matrícula de los programas de doctorado en Ciencias, que se mantenía en 2017/18 en los mismos niveles que en 1999/2000, que después de haber presentado una tendencia al aumento entre 2002/03 y 2009/10, inició una fase de descenso de más de diez puntos [45].

Finalmente, en la Tabla 3 se han recogido los datos del personal investigador vinculado al grupo que no ha realizado en el mismo su tesis doctoral, habiéndose incorporado al mismo ya con el doctorado terminado. Se incluye también el personal en formación que se encuentra en este momento desarrollando su tesis doctoral, y se ofrece su lugar de procedencia, la fecha de entrada al grupo y su trabajo en el grupo [42,43].

| Nombre y apellidos | Trabajo previo | Fecha de entrada | Trabajo en el grupo |
|-----------------------------------|---|------------------|-------------------------------|
| Alberto Arteché González | <i>John Adams Institute for Accelerator Science</i> , Reino Unido | 2022 | Física médica |
| Núria Castelló Mor | <i>Université de Genève</i> , Suiza | 2018 | DAMIC-M |
| Francisco Javier González Sánchez | Sicma S.L. | 2005 | Instrumentación |
| Gervasio Gómez Gramuglio | <i>Università degli Studi di Brescia</i> , Italia | 2001 | Instrumentación |
| Richard William Jaramillo | Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador | 2007 | Instrumentación |
| Agustín Lantero | Universidad de Cantabria | 2019 | Doctorando DAMIC-M |
| Clara Lasasa | Universidad de Cantabria | 2018 | Doctorando Instrumentación |
| Rubén López Ruiz | Universidad de Cantabria | 2022 | Doctorando CMS |
| Pablo Matorras Cuevas | Universidad de Cantabria | 2019 | Doctorando CMS |
| Andrés Molina Ribagorda | Ingeniero de software en GMV | 2022 | Ingeniero electrónico |
| Efrén Navarrete Ramos | Universidad Nacional Autónoma de México, México | 2020 | Doctorando Instrumentación |
| Carlos Pobes Aranda | | | Científico titular en el IFCA |
| Diego Rosich Velarde | Universidad de Cantabria | 2023 | Doctorando Instrumentación |
| Luca Scodellaro | <i>Università degli Studi di Padova</i> , Italia | 2004 | CMS |
| Jesús Manuel Vizán García | CIEMAT | 2019 | CMS, docencia |

Tabla 3. Integrantes actuales del grupo de física de partículas e instrumentación del IFCA, que no han defendido una tesis doctoral en la UC.

Referencias bibliográficas

- [1] Rossiter M. *The Matthew Matilda Effect in Science*. Social Studies of Science 1993; 23(2): 325-341.
- [2] Sime R., Meitner L. *A Life in Physics*. University of California Press, Berkeley, 1996.
- [3] Shapin S. *The invisible technician*. American Scientist. 1989; 70(6):554–563..
- [4] Cabré M. *La historia de la observación como historia de las mujeres*. In Margarita Sánchez R, Miren Ll., eds., *Tecnología, ciencia y naturaleza en la historia de las mujeres*. Granada: Comares. 2003; 21-44.
- [5] Velasco J, Ceba A, Navarro V. *Los orígenes de la investigación experimental en física nuclear y de partículas en España*. Revista Española de Física. 2014; 25(2):54–61.
- [6] Ruiz A. *Internacionalización de la ciencia*. Universidad de Cantabria, 2022.
- [7] Roqué X. *La conversión del átomo: ciencias nucleares e ideología en el franquismo*. Mètode, 90(201):6–83, 2016.
- [8] Roqué X. *España en el CERN 1961-1969*, en: Nestor Herrán y Xavier Roqué, eds. *La física en la dictadura: físicos, cultura y poder en España, 1939-1975*. Bellaterra: Universitat Autònoma de Barcelona. 2012; 239–259.
- [9] Peiró K. *Scanning girls, les caçadores de partícules*. La Mira, 2020.
- [10] Serrano A, Gordo, A.J. *Estrategias y prácticas cualitativas de investigación social*. Pearson Prentice-Hall, Madrid, 2008.
- [11] Isis Current Bibliography: <https://isiscb.org/>
- [12] Fundación Dialnet. Tesis doctorales. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/tesis>.
- [13] Delgado I, Fernández T, Magallón C, Barral M.J. *Life paths of successful women scientists in Spain*. Multidisciplinary Journal of Gender Studies, 3(1):351–372, 2014.
- [14] Pycior H, Pnina A, Slack N. *Collaborative couples – past, present and future. For better or for worse? Collaborative couples in the sciences*. Birkhauser, pages 271–295, 2012.
- [15] Castejón B. et al. *Guía para la incorporación de la perspectiva de género en los trabajos finales de grado y máster de la Universidad de La Rioja*. Universidad de La Rioja, Logroño, 2022.
- [16] Bonet A. Entrevista realizada por el autor. 3 de junio de 2024.
- [17] Velasco J. Joaquín Catalá y el IFIC. Conferencia realizada el 17 de enero de 2024.
- [18] IFIC. *¿Cuándo comenzó en España la física de partículas?* Disponible en: <https://ific.uv.es/wop/cuando.html>.

- [19] Cloudylabs. *Scattering of particles in photographic emulsion*. Disponible en: <https://www.cloudylabs.fr/wp/scattering-of-particles-in-photographicemulsion/>.
- [20] Velasco J. *España en el CERN (1961-1969) o el fracaso de la física autárquica. La física en la dictadura, físicos, cultura y poder en España (1939-1975)*, 2012.
- [21] CORA. Tesis Doctorals en Xarxa, Universidad de Cantabria. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10803/22686>
- [22] Universidad de Cantabria. Memorias Académicas de la Universidad de Cantabria. Ediciones 1983-1984 a 2002-2003. Santander: Universidad de Cantabria; 1984-2003.
- [23] Grozier J. *The Rise & Fall of the “Scanning Girl”*. Magazine of the British Society for the History of Science. Octubre 2015. 108.
- [24] Ruiz A. Entrevista realizada por el autor. 22 de abril de 2024.
- [25] Marco J. Entrevista realizada por el autor. 10 de mayo de 2024.
- [26] Asociación Cultural Carlos Bribián. Escritores cántabros, Eugenio Villar García. Disponible en: <https://www.escriitorescantabros.com/escritor/villar-garcia-eugenio.html>.
- [27] Vilar R. Entrevista realizada por el autor. 16 de mayo de 2024.
- [28] Archivo de Teresa Rodrigo.
- [29] Vila I. Entrevista realizada por el autor. 15 de mayo de 2024.
- [30] Instituto de Física de Cantabria. Investigación. Disponible en: <https://ifca.unican.es/es-es/>
- [31] Red Iris. Sistema de videoconferencia: VRVS. Disponible en: <https://www.rediris.es/list/info/vrvs-es.html>
- [32] CMS Collaboration. *The CMS Muon Project: Technical Design Report*. CERN; 353-362. 1997. Report No.: CERN-LHCC-97-032, CMS-TDR-3. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/343814>
- [33] Martínez C. Entrevista realizada por el autor. 12 de febrero de 2024.
- [34] ResearchGate. Figure 2 - uploaded by Ryszard S Romaniuk. Disponible en : https://www.researchgate.net/figure/Schematic-view-of-the-CMS-alignment-system-Left-longitudinal-view-of-CMS-show-ing-one_fig1_258104797
- [35] CERN. CMS images gallery. Topic: Experiments. Disponible en: <https://home.cern/resources/image/experiments/cms-images-gallery>
- [36] Calderón A. Entrevista realizada por el autor. 9 de mayo de 2024.
- [37] CMS Collaboration. *The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker: Technical Design Report*. CERN; págs 71–89. 2017. Report No.: CERN-LHCC-2017-009, CMS-TDR-014.

- Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/2272264/files/CMS-TDR-014.pdf>
- [38] CMS Collaboration. *The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker: Technical Design Report*. CERN; pág 12. 2017. Report No.: CERN-LHCC-2017-009, CMS-TDR-014. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/2272264/files/CMS-TDR-014.pdf>
- [39] Wikipedia. Archivo: CERN accelerator complex (cropped 2).jpg Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:CERN_accelerator_complex_\(cropped_2\).jpeg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:CERN_accelerator_complex_(cropped_2).jpeg)
- [40] Instituto de Física de Cantabria. *The DAMIC (Dark Matter in CCDs) experiment*. Disponible en: <https://ifca.unican.es/en-us/project?exp=36>
- [41] Universidad de Cantabria. Repositorio abierto de la Universidad de Cantabria, Ucrea. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/>.
- [42] Comunidad de Inspire HEP. Base de datos sobre personal investigador de Cantabria de Inspire HEP. Disponible en: <https://inspirehep.net/>.
- [43] Personal del grupo de Cantabria. Actividad laboral. Disponible en: <https://www.linkedin.com/>.
- [44] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, Gobierno de España. Boletín Oficial del Estado. Disponible en: <https://www.boe.es>
- [45] Cabré M, Fernández J, Mantecón T.A. *¿Tiene sexo la ciencia? Mujeres y hombres en las titulaciones de la Universidad de Cantabria*. Santander: Editorial de la Universidad de Cantabria: 83–109, 2021.
- [46] Villar E, Aguilar J, Bonet A, Senent F, Casanova J. Joseph Rotblat, Premio Nobel de la Paz, 1995 de la Revista española de física, ISSN 0213-862X, Vol. 9, Nº. 4, 1995, págs, 15-17.

Anexo I: Certificado del Comité de Ética de Proyectos de Investigación



COMITÉ DE ÉTICA DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN

Dña. Susana Rojas Pernia, en calidad de Presidenta del citado Comité,

CERTIFICA

Que una vez analizada por este Comité la solicitud presentada por **Eduardo Ripoll Cabarga, Montserrat Cabré i Pairet y Jónatan Piedra Gómez** referente al TFG con código interno **000142** y título:

La física de partículas en Cantabria, 1969-2017

Se estima que el citado proyecto cumple con los requisitos éticos necesarios de idoneidad en relación con los objetivos del estudio y contempla el cumplimiento de la normativa en vigor en el ámbito de estudio en el que la investigación se enmarca.

Razones por las que este Comité ha decidido por unanimidad **valorar positivamente** el Proyecto, considerando que se ajusta a las normas éticas esenciales requeridas por la legislación en vigor, y quedando constancia de esta decisión en el Acta de la reunión **Ordinaria** del Comité celebrada el **24/1/2024**.

Anexo II: Documento informativo facilitado a las personas informantes

Proyecto de investigación

La física de partículas en Cantabria, 1969 – 2017

Documento informativo

Resumen del proyecto: Más allá de relatos sobre descubrimientos fortuitos y pioneros de la investigación, o del papel de las grandes instituciones científicas, narrativas que todavía acaparan la mayoría de los manuales de historia de la ciencia, la investigación científica se impulsa desde múltiples espacios y se sostiene en un trabajo cotidiano condicionado por una gran variedad de factores. El objetivo de este TFG es ofrecer una mirada contextualizada a la historia reciente de la física de partículas desde la mirada que nos ofrece la Facultad de Ciencias de la Universidad de Cantabria. En el marco del final del franquismo y durante la configuración del sistema científico desarrollado en la incipiente democracia en España, en un entorno geográfico y científicamente periférico se ha ido desarrollando la trayectoria de un grupo de investigación en altas energías, grupo que ha participado de modo activo en múltiples avances que se han producido durante el último tercio del siglo XX y durante el siglo XXI. Surgido en la Facultad de Ciencias, fue uno de los precursores del Instituto de Física de Cantabria. La reconstrucción de la evolución del trabajo de este grupo, así como la participación de mujeres y hombres y su protagonismo en diversos hitos de la historia reciente de la física de partículas, constituirán el nodo fundamental de este trabajo.

Metodología: Para el desarrollo del proyecto combinaremos el trabajo de documentación bibliográfica y documental con el desarrollo de entrevistas semi-estructuradas a informantes, propias de la investigación cualitativa. Entrevistaremos a personas que participaron activamente en el grupo que desarrolló la física de partículas en Cantabria, a familiares de estas y a colegas de la Facultad de Ciencias. Las entrevistas abordarán cuestiones de carácter científico y académico vinculadas al desarrollo de la investigación y a la organización del trabajo, además de valoraciones sobre los efectos que la actividad investigadora hubiera podido tener en las biografías personales de las personas entrevistadas y que atenderán a la perspectiva de género.

Equipo investigador:

Montserrat Cabré i Pairet, codirectora del TFG

Jónatan Piedra Gomez, codirector del TFG

Eduardo Ripoll Cabarga, alumno investigador del TFG

Anexo III: Declaración de consentimiento informado

DECLARACIÓN DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

D. /Dña., de años de edad y con DNI nº

Manifiesto que he leído y entendido la hoja de información que se me ha entregado, que he hecho las preguntas que me surgieron sobre el proyecto y que he recibido información suficiente sobre el mismo.

Comprendo que mi participación es totalmente voluntaria, que puedo retirarme del estudio cuando quiera sin tener que dar explicaciones y sin que esto repercuta en mis cuidados médicos.

Presto libremente mi conformidad para participar en el Proyecto de Investigación titulado “La física de partículas en Cantabria, 1969 – 2017”.

He sido también informado/a de que mis datos personales serán protegidos e incluidos en un fichero que deberá estar sometido a y con las garantías del Reglamento General de Protección de Datos (RGPD), que entró en vigor el 25 de mayo de 2018 que supone la derogación de Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre referidos a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales

Tomando ello en consideración, OTORGO mi CONSENTIMIENTO para cubrir los objetivos especificados en el proyecto.

Santander, a de de 20

CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA EL ESTUDIO:

Título del Proyecto: La física de partículas en Cantabria, 1969 – 2017

Investigador/a Principal: Montserrat Cabré i Pairet y Jónatan Piedra Gómez

Yo,

(Nombre y apellidos en MAYÚSCULAS)

Declaro que:

- He leído la hoja de información que me han facilitado.
- He podido formular las preguntas que he considerado necesarias acerca del estudio.
- He recibido información adecuada y suficiente por el investigador abajo indicado sobre:
 - Los objetivos del estudio y sus procedimientos.
 - Los beneficios e inconvenientes del proceso.
 - Que mi participación es voluntaria y altruista
 - El procedimiento y la finalidad con que se utilizarán mis datos personales y las garantías de cumplimiento de la legalidad vigente.
 - Que en cualquier momento puedo revocar mi consentimiento (sin necesidad de explicar el motivo y sin que ello afecte a mi atención médica) y solicitar la eliminación de mis datos personales.
 - Que tengo derecho de acceso y rectificación a mis datos personales.

CONSIENTO EN LA PARTICIPACIÓN EN EL PRESENTE ESTUDIO

SÍ NO

(marcar lo que corresponda)

Para dejar constancia de todo ello, firmo a continuación:

Fecha

Firma

Nombre investigador

Firma del investigador.....

APARTADO PARA LA REVOCACIÓN DEL CONSENTIMIENTO

Yo,

.....

revoco el consentimiento de participación en el proceso, arriba firmado.

Firma y Fecha de la revocación

Anexo IV: Asistentes a la II Reunión de Física Nuclear, Santander 1953

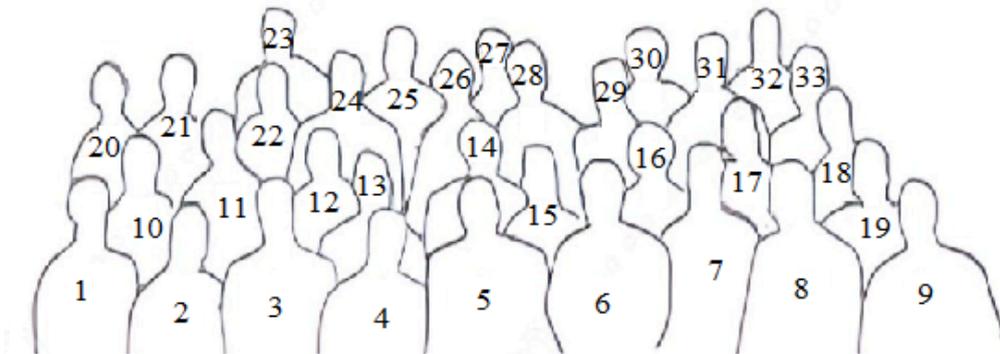


Figura 13. Fotografía realizada al grupo de asistentes de la II Reunión de Física Nuclear, Santander 1953. 1. Dr. R. Ortiz, 2. Prof. M. Velasco, 3. Dr. W. M. Gibson, 4. Prof. M. Caldirola, 5. Prof. J. M. Otero, 6. Prof. S. K. Allison, 7. Prof. K. Wirtz, 8. Prof. J. Rothlat, 9. Prof. J. Catalá, 10. Prof. A. Bonet, 11. Prof. E. Villar, 12. Prof. R. Segovia, 13. Dr. T. Iglesias, 14. Dra. M. A. Vigón, 15. Dr. A. Tanarro, 16. Dra. J. Yunta, 17. Dr. E. Rodríguez Mayques, 18. Dr. F. Verdaguer, 19. Prof. C. Sánchez del Río, 20. Dra. I. Borrero, 21. Prof. J. Aguilar, 22. Dr. F. Busquets, 23. Prof. F. Senent, 24. Prof. A. Carbó, 25. Prof. J. Casanova, 26. Prof. J. Tharrats, 27. Prof. J. M. López R, 28. Prof. J. Tharrats, 29. Prof. J. M. López R, 30. Prof. J. M. López R, 31. Prof. J. M. López R, 32. Prof. F. Sancho Rebolledo [46].

Anexo V: Aprobación del MEC del proyecto de investigación para la colaboración en DELPHI

Madrid, 7 de Mayo de 1.986



MINISTERIO DE EDUCACION Y CIENCIA
COMISION ASESORA
DE
INVESTIGACION CIENTIFICA Y TECNICA

COMISION ASESORA
INVESTIGACION CIENTIFICA Y TECNICA
01412 02.05.86
SALIDA

Rosario Pino, 14 - 16
Edificio «Torre Rojo»
Centralita: 450 05 02
Télex 49692
28020-MADRID

Sr/a : ALBERTO RUIZ GIMENO
FACULTAD DE CIENCIAS
FISICA FUNDAMENTAL
AV. DE LOS CASTROS, S N
39005 SANTANDER
CANTABRIA

| | | | |
|--|-------------------|---------|------------------------|
| ASUNTO : Aprobación del Proyecto de Investigación de referencia : AE86-0008 | | | |
| FECHA DE ACUERDO CONSEJO DE MINISTROS : 11 de Abril de 1.986 | | | |
| CENTRO : FACULTAD DE CIENCIAS | | | |
| PROYECTO : PROYECTO PARA LA PARTICIPACION EN EL EXPERIMENTO DELPHI EN EL ANILLO DE COLISIONES E+ E- | | | |
| DISTRIBUCION DE LA SUBVENCION (Ptas.) | | | |
| 1986: 11.900.000 | 1987: 0 | 1988: 0 | 1989: 0 |
| 1990: 0 | GASTOS EDICION: 0 | | SUBVENCION: 11.900.000 |
| LIBRAMIENTO : BANCO : BANCO ESPAÑA.SANTANDER CUENTA CORRIENTE : 80 | | | |



23 JUL. 1986

El Consejo de Ministros, en reunión celebrada en la fecha que se indica y a propuesta del Comité Interministerial de Programación de esta Comisión Asesora, ha acordado la aprobación del Proyecto de Investigación de referencia, concediendo al Centro solicitante una subvención de la cuantía que se expresa, con cargo al Fondo Nacional para el desarrollo de la Investigación Científica, cuya distribución por anualidades se adjunta.

Para el pago de la subvención se ha iniciado el oportuno expediente. Dicho pago se realizará de una sola vez o por anualidades, conforme se expresa más arriba.

EL SECRETARIO,



Mod. G-7

IFCA, AAR, Archivador 1.

Anexo VI: Participantes en la 37ª Junta de Colaboración de DELPHI (momento de la integración del grupo de Cantabria)

DRAFT

DELPHI CB – MI 86 – 37
21st March, 1986

37TH MEETING OF THE DELPHI COLLABORATION BOARD WITH PARTICIPATION OF THE DEC MEMBERS (HELD AT CERN ON 21ST MARCH, 1986)

PRESENT:

| | |
|-------------------|-------------------|
| Ames | T.Meyer |
| Vienna | G.Leder |
| Belgium | J.Lemonne |
| NBI | G.Damgaard |
| College de France | |
| Orsay | F.Richard |
| Paris LPHNE | |
| Saclay | G. Smadja |
| Strasbourg | M.Schaeffer |
| Karlsruhe | H.Mueller |
| Wuppertal | J.Drees |
| Athens NTU | E.C.Katsoufis |
| Athens | S.Katsanevis |
| Liverpool | M. Houlden |
| Oxford | G.Myatt(Chairman) |
| Rutherford | W.Venus |
| INFN Bologna | C.Chiccoli |
| INFN Genova | V.Gracco |
| INFN Milano | C.Matteuzzi |
| INFN Padua | |
| INFN Rome Sanita | |
| INFN Turin | E.Menichetti |
| INFN Trieste | E.Castelli |
| NIKHEF | B.Koene |
| Bergen | E.Lillestol |
| Oslo | T.Buran |
| Cracow | Z.Hayduk |
| | G.Polok |
| Warsaw | K.Firkowski |
| | M.Gorski |
| <u>Santander</u> | <u>A.Ruiz</u> |

| | |
|-----------|---------------|
| Valencia | A.Ferrer |
| Dubna | V.Kadyshevsky |
| Serpukhov | Y.Petrovikh |
| Lund | G.Jariskog |
| Stockholm | G.Ekspong |
| Uppsala | |
| CERN | J.V.Allaby |
| Helsinki | M. Ellila |

DEC MEMBERS PRESENT:

| | |
|--------------|------------|
| J.V.Allaby | |
| U.Arnaldi | |
| J.E.Augustin | |
| A.N.Diddens | (Chairman) |
| J.Drees | |
| V.Gracco | |
| H.J.Hilke | |
| G.Kalmus | |
| E.Lillestol | |

IFCA, AAR, Archivador 1.

Anexo VII: Participantes en la 61ª Junta de Colaboración de DELPHI

DELPHI CB-MI 91-91 DRAFT

61TH MEETING OF THE DELPHI CB

WITH PARTICIPATION OF THE DEC MEMBERS

Minutes of the Meeting held January 25, 1991

PRESENT:

| | | | |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| Ames | T.Meyer | Valencia | A.Ferrer |
| Vienna | G.Leder | Dubna | G.Mitselmakher |
| Belgium | J.Lemonne (chairman) | Serpukhov | V.Nikolaenko |
| NBI | R.Møller | Lund | G.Jarlskog |
| College de France | M.Crozon | Stockholm | S.O.Holmqvæn |
| Orsay | F.Richard | Uppsala | T.Ekelof |
| Paris LPHNE | R.Pain | CERN | H.Foeth |
| Saclay | F.Pierre | Helsinki | H.Saarikko |
| Strasbourg | W.Dulinski | <u>Santander</u> | <u>A.Ruiz</u> |
| Karlsruhe | W. de Boer | Lisbon | J.Varela |
| Wuppertal | J.Drees | | |
| Athens NTU | T.Filippas | | |
| Athens Univ. | | | |
| Demokritos | A.Maltezos | | |
| Liverpool | P.S.L.Booth | | |
| Oxford | G.Myatt | | |
| Rutherford | W.Venus | DEC MEMBERS PRESENT | |
| INFN Bologna | F.Navarria | | |
| INFN Genova | S.Squarcia | | |
| INFN Milano | C.Matteuzzi | U.Amaldi (Spokesman) | |
| INFN Padova | M.Mazzucato | P.S.L.Booth (Deputy) | |
| INFN Roma Sanita | T.Baroncelli | J.Drees | |
| INFN Torino | F.Bianchi | F.Harris | |
| INFN Trieste | | M.Mazzucato | |
| NIKHEF | B.Koene | F.Richard | |
| Bergen | E.Liffethun | D.Treille | |
| Oslo | T.Buran | W.Venus | |
| Cracow | M.Turala | | |
| Warsaw | K.Doroba | | |

IFCA, AAR, Archivador 1.

Anexo VIII: Noticias de prensa

Alerta, viernes 29 de abril de 1994

38 ALERTA
Viernes 29 de abril de 1994

EL CAMPUS

La búsqueda del origen del Universo

Teresa Rodrigo, titular del Departamento de Física Moderna de la Universidad de Cantabria, se siente satisfecha del resultado de las investigaciones

Teresa Rodrigo es colaboradora del grupo investigación que ha dado a conocer la existencia de evidencias del quark top

J. AHUMADA, Santander
Teresa Rodrigo, titular del Departamento de Física Moderna de la Universidad de Cantabria, forma parte del grupo de investigadores que ha dado a conocer la existencia de evidencias de producción de quark top, que ha provocado un enorme revuelo en la comunidad científica mundial.

La importancia del hallazgo se debe a que esta partícula subatómica sirve para conocer el último eslabón de la materia y prueba las teorías con que se ha estado trabajando durante 17 años. Para hacernos una idea, la teoría que se sigue afirma que cualquier materia está formada por átomos, éstos por electrones y un núcleo de protones y neutrones, que a su vez tienen doce partículas subatómicas: seis leptones y seis quark.

Teresa Rodrigo explica que el paradigma en que ellos se mueven es el del *Modelo Estándar*, que explica muchos fenómenos naturales. El trabajo de investigación que se realiza en los aceleradores lineales intenta reproducir los primeros instantes del Universo.

El último quark

De los seis quark que forman los protones y neutrones, se habían hallado evidencias de cinco, y sólo restaba el último, el quark top, para probar la teoría de la materia.

La física de la Universidad de Cantabria señala que "el boom es que ahora existen evidencias que prueban la teoría". Y no ha sido tarea fácil: "ha sido un trabajo complicado porque siempre se escapaba. Sentimos una gran satisfacción cuando se consiguieron las primeras colisiones".

Las consecuencias directas que se derivan de este logro son, en primer lugar, la confirmación de la teoría. "Si no se hubiera hallado este quark, todo el modelo teórico del conocimiento de la naturaleza estaría cojo", comenta Teresa Rodrigo. Por otro lado, delimita más claramente los parámetros que aún estaban abiertos, lo que supone afinar más en las predicciones para las investigaciones futuras.



Teresa Rodrigo y Alberto Ruiz.

El nuevo frente de investigación que se ha abierto es la explicación del porqué los quark y los neutrinos tienen masa. "Creemos que estas partículas son indivisibles, pero aún no sabemos porqué hay masa. Ese es el gran reto de la Física del futuro".

Aplicaciones

Las aplicaciones del descubrimiento, o mejor dicho, de la confirmación de la teoría, pone, según Teresa Rodrigo, "los pilares en nuestro entendimiento de la naturaleza. Tanto su composición como su comportamiento".

La relación que un quark pueda tener con el principio del universo puede resultar un tanto difusa para los no iniciados. Teresa Rodrigo, por el contrario, opina que "tiene que ver casi todo con el principio del mundo. Los experimentos intentan reproducir estos primeros instantes de la creación".

Asimismo, explica que la naturaleza "tiene leyes muy sencillas. El Universo es sencillo

Esta partícula subatómica ha probado de forma empírica las teorías sobre materia que se vienen siguiendo desde hace 17 años

en sus principios y en sus formas de ser y actuar".

Alberto Ruiz, catedrático y jefe del Grupo de Altas Energías de la Universidad de Cantabria cree que lo realmente complicado y sofisticado es toda la técnica que hace posible estos descubrimientos.

Teresa Rodrigo está colaborando, en la actualidad con el Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) con sede en Ginebra y del que forma parte España, y que posiblemente es el laboratorio más importante del mundo en Física de Partículas.

Por supuesto, también trabaja con Fermilab, concretamente

desde el año 1990, que es el laboratorio estadounidense que ha detectado la presencia del quark.

Teresa Rodrigo señaló que para dar con esta partícula se han necesitado más de 16 millones de colisiones y una energía equivalente a 1,800 veces su masa.

El acelerador de partículas Tevatron del laboratorio Fermilab de Chicago, empezó a diseñarse hace veinte años con el único objetivo de encontrar el quark top. Este acelerador de partículas es el de más alta energía de todo el mundo. Era así el único laboratorio capacitado para detectarlo. Fermilab ya había detectado con anterioridad (en el año 1977) otro quark.

Las reacciones en el ámbito científico no se han hecho esperar. Para Juan Pérez Mercader, físico teórico del Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental del INTA-CSIC, este descubrimiento es comparable al de las ondas electromagnéticas en el siglo anterior, que revolucionaron el mundo de las comunicaciones.

Hans Bethe, premio Nobel de Física y uno de los artifices e

impulsores de la Teoría del Big Bang, este descubrimiento hace que todo el cuadro de las partículas subnucleares sea mucho más consistente y más firmemente establecido.

Los higgs

Luis Ibáñez, catedrático de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid, ha señalado que el experimento sirve para conocer el último eslabón de la materia, que ya ni siquiera existe en la naturaleza porque el Universo está demasiado frío y porque las condiciones para producirse sólo pueden darse ahora en el laboratorio. Opina que el siguiente logro será hallar las partículas denominadas higgs, con las que se podrá conocer el origen de la masa.

Para descubrir los higgs se ha diseñado el acelerador LHC (Gran Colisionador Hadronico) que se encuentra en el CERN. El LHC, capaz de producir una energía superior incluso a la de Fermilab, no estará listo en el CERN de Ginebra hasta el año 2003.



Alberto Ruiz (sentado) junto con otros investigadores, en la foto de archivo.

La Universidad participa en el nuevo proyecto europeo de un acelerador

El Grupo de Altas Energías trabaja en los detectores y en el «software» del LHC, que tardará 10 años en prepararse

MARIA ANGELES SAMPERIO
DWSANTANDER

La Universidad de Cantabria, junto con otras españolas, han presentado proyectos para los dos experimentos del acelerador LHC -Gran Colisionador de hadrones- que se va a construir en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, CERN, ubicado en Ginebra.

El proyecto científico, uno de los más importantes por los que ha apostado Europa, ha sido aprobado el pasado 16 de diciembre y coloca a la comunidad a la cabeza mundial de la investigación en la Física de Altas Energías.

Las negociaciones para la aprobación del programa han sido complicadas, dada la importancia económica del mismo, que supone unos 300.000 millones de pesetas. De hecho, un acelerador similar había sido rechazado en los Estados Unidos por motivos económicos.

El LHC será un acelerador circular de 27 kilómetros de circunferencia capaz de dotar de energía en una potencia diez veces su-

jente en la actualidad, a través de chorros de protones -las partículas cargadas del núcleo de los átomos- muy intensos, que chocarán en dos puntos del ábilo, en donde se ubicarán detectores para recoger la información sobre estos choques.

La preparación del acelerador y los detectores tardará unos diez años y está previsto que para el 2.004 comiencen los experimentos.

Con el LHC los físicos esperan encontrar respuesta a cuestiones que todavía no se han desvelado y que están relacionadas con la comprensión del Universo. Por ejemplo, el origen de la masa de los cuerpos.

Participación cántabra

La participación de la Universidad de Cantabria en los proyectos de investigación europeos es realmente importante. El Grupo de Altas Energías de la Universidad está trabajando en los dos aceleradores de mayor relevancia a nivel mundial: el LEP de Ginebra y el Tevatrón de Chicago y se pre-

Teresa Rodrigo encabeza un grupo de trabajo del experimento CMS, que tiene como objetivo el alineamiento global del detector, que pretende poder estimar las posiciones relativas de los elementos de detección con una precisión de centésimas de milímetro, esencial para medir las características de las colisiones con la mayor precisión. En este mismo proyecto se encuentran Juan José García, Francisco Matorras, Alberto Ruiz e Iván Vila.

Otros proyectos dirigidos al desarrollo del «software» y de las comunicaciones se encuentran en progreso y están trabajando en los mismos Ángel J. Camacho, Javier Cuevas y Jesús Marco. Celso Martínez y José María López completan el grupo investigador, con su participación en el LEP.

La Universidad cántabra participa en los comités científicos del CERN. Jesús Marcos viene siendo delegado en el comité de usuarios y Alberto Ruiz, jefe del Grupo de Altas Energías, es uno de los tres delegados españoles en el Comité Europeo de Futuros

SANTANDER

En los límites de la materia

“El ‘quark top’ es sólo el punto final por ahora, quedan aún eslabones posteriores”, reconoce Teresa Rodrigo

JESÚS HOYOS ARRIBAS. Santander

La corriente mayoritaria que comparten los físicos es que toda la materia se ha formado a partir de doce partículas subatómicas, seis quarks y otros tantos leptones. Para confirmarla, sólo faltaba encontrar la duodécima, bautizada como el quark top, pero era muchísimo más difícil que buscar una aguja en un pajar. En primer lugar, porque mide menos de 10 elevado a la menos 18

centímetros, o sea, con 18 ceros a la derecha de la coma. Teresa Rodrigo Añoro, pertenece al equipo de más de 400 investigadores que anunció la semana pasada en Chicago el descubrimiento del quark top, esa última de las doce partículas subatómicas que constituyen la materia primitiva. Ella expuso ayer en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Cantabria la odisea científica que siguieron para encontrar tan difícil y escurridizo hallazgo.

Eurotúnel

Juan Luis FERNÁNDEZ

UNA prueba, por vía negativa, de que las identidades culturales se constituyen mediante el contacto de grupos diferentes es el hecho, muchas veces observado, de que quienes no han estado en contacto con otros, o han tenido impedimentos para relacionarse, desarrollan culturas peculiares.

Así ha ocurrido, por ejemplo, con los británicos. Elias Cannetti escribió que el símbolo de masa de los ingleses es el *barco*, y que los isleños se ven a sí mismos como una tripulación. En las islas es muy fácil apreciar el nacimiento de singularidades culturales: pensemos en los canarios, los cretenses, los sicilianos, los corsos y los sardos, los irlandeses, los cubanos y los jamaicanos, los japoneses...

A veces hay circunstancias humanas o geográficas que *aislan* a las culturas (se convierten en islas comunicativas), como pudo ocurrir con la Etiopía cristiana o el Paraguay del dictador Francia. China puede considerarse como una gran isla cerrada al exterior en buena parte de su historia.

Los ingleses, que habitan la mayor isla de Europa, suelen sentirse distintos precisamente porque para entablar contacto deben cruzar los mares. Toda su isla es un gran domicilio cultural, y no cabe sorprenderse de que el país más refractario a la unión europea sea el Reino Unido.

El caso es que ayer Mitterrand y la reina Elisabeth inauguraron el Eurotúnel, que bajo el Canal de la Mancha conecta la isla de Gran Bretaña y el continente. París y Londres, por tierra, quedan a tres horas de viaje. Aunque no es de esperar que desaparezca de golpe la idiosincrasia isleña, la ruptura física del aislamiento provocará un mayor intercambio social: cabe suponer que el sur de Inglaterra y el norte de Francia acabarán pareciéndose mucho dentro de 15 o 20 años. Los ingleses se afriancesarán y los franceses se britanizarán hasta alcanzar un punto de equilibrio.

Teresa Rodrigo, profesora titular de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Cantabria, aprovechó ayer su participación en el ciclo de conferencias que organiza la Facultad de Ciencias para hacer historia del importante hallazgo, y apuntar el camino que aún queda por recorrer.

Millones de dólares y 400 investigadores para encontrar el quark top parecen muchos, pero no cuando Teresa Rodrigo explica que buscaron entre 6 billones —con b— de colisiones de partículas, aunque seleccionando sólo los “16 millones más interesantes”. Además, en cada colisión se producen unas 100 partículas.

Pero lo encontraron, o eso creen, porque Teresa Rodrigo advirtió que no se da el caso por cerrado hasta que se elimine el actual 0,26% probabilidades de error en su hallazgo, que les quita el sueño. La supuesta incertidumbre contrasta con la seguridad con que Rodrigo parece conocer qué sucedió en el momento de “la creación del Universo” —no necesariamente divina, precisaría Hawking—, o si lo prefieren, del big bang.

Casi en la creación

Bueno, también reconoce que hasta el big bang, lo que se dice el big bang, no: Sólo llegan hasta el 10 elevado a la menos 36 segundos después, es decir, 36 ceros a la derecha de la coma del primer segundo, tiempo tan pequeño que no hay reloj imaginable que lo mida, ni casi Dios que lo sienta.

Porque en la materia ordinaria sólo hay dos tipos de quarks, el *up* y el *down*. Pero en aquella materia de los primeros instantes del big bang aparecieron otros cuatro, y concretamente el quark top ahora descubierto.



DAN GUTIÉRREZ

El salón de actos de la Facultad de Ciencias se llenó para asistir a la conferencia de Teresa Rodrigo.

Los científicos más alejados de las personas *normales* y *corrientes* —a quien va destinado este periódico— son probablemente los especialistas en la física de las partículas subatómicas, porque trabajan en esos límites de lo imaginable. Pero Teresa Rodrigo pertenece a esa nueva generación que cambió la pajarita por los vaqueros, y salpicó además la conferencia con algunas finas ironías, compartida por los nombres con que antes pusieron a las partículas. No ocultan que se divierten con su trabajo, y que tienen un punto de mira más amplio que el de lo subatómico. De entrada, el nombre de quarks ya se sacó del libro de Joyce *Finnegan's Wake*, donde el genial escritor *vacía* con un juego de palabras hablando de los hijos del señor Mark, y em-

pleando la palabra quarks. Pero luego, el nombre de los quarks sigue a la altura del *vache*, y aparte de *up* y *down*, aparece el *beauty*, y hasta en francés, el *charm*. Y no digamos con el *top*, en plan rockandrollero. Pero trabajan duro, en serio, y con resultados en investigaciones fundamentales.

Cara a la galería

Teresa Rodrigo dedicó una buena parte de su conferencia a repasar la historia, haciendo concesiones didácticas, cara a la galería.

Participemos en la historia, que, aunque con menor exponente negativo, también precisa de bucar en el pasado. Sólo hasta diez a la menos tres años

—perdónenos la atípica expresión para estar a tono—, cuando el filósofo griego presentó el problema de la estructura de la materia, y llamando átomos a las partículas más pequeñas que la componían. En la distancia en años 10 elevado a la menos dos de la actual —en el siglo pasado— ya se comprobó que más pequeño el átomo existían los neutrones y los electrones girando alrededor del núcleo. Más tarde, por encima de diez elevado a la menos dos, esto es, en este siglo, las cosas se complicaron cuando se comprobó que los electrones y los neutrones están formados a la vez por doce partículas, divididas en los citados seis leptones y seis quarks, según un modelo denominado *estándar*.

A partir de entonces, desde

Continúa en la página siguiente

En los límites de la materia

Un acelerador como una casa de tres pisos

Véase de la página anterior

hace casi 20 años, el principal problema radicaba en que no aparecía el quark top para completar esa docena de partículas primigenias que vaticinaba el Modelo Estándar. Según la teoría, con esas doce partículas está formado todo el Universo, "incluidos también, amigo lector, usted y yo."

¿Por qué Teresa Rodrigo ha tenido que viajar a Chicago para encontrarlo? ¿por qué era tan difícil dar con él? Porque el quark top sólo estuvo presente en la naturaleza durante el big bang, en los momentos iniciales del Universo, pero la progresiva variación de temperatura del mismo provocó la desintegración de esos quarks. La función de los aceleradores de partículas radica precisamente en reproducir fielmente las condiciones de la Creación, de manera que se genere mucha energía y se creen las partículas. Teresa Rodrigo trabajó desde 1990, en el gigantesco acelerador de partículas Tevatron, del laboratorio Fermilab de Chicago. Se integró junto a otros dos españoles, José Belloch y Jorge Troconiz, en el experimento Collider Detector Fermilab (CDF) iniciado dos años antes, y casi 13 después de que se iniciase la construcción de ese acelerador, el único del mundo hasta para hacer estos trabajos.

Doce entre seis billones

Teresa Rodrigo participó, concretamente, en el análisis de esos 16 millones de colisiones, y en el hallazgo de que el quark top se produjo en una docena. A la velocidad de la luz se causan violentos choques entre protones y antiprotones, y como resultado de las colisiones surge lo que se denomina una lluvia

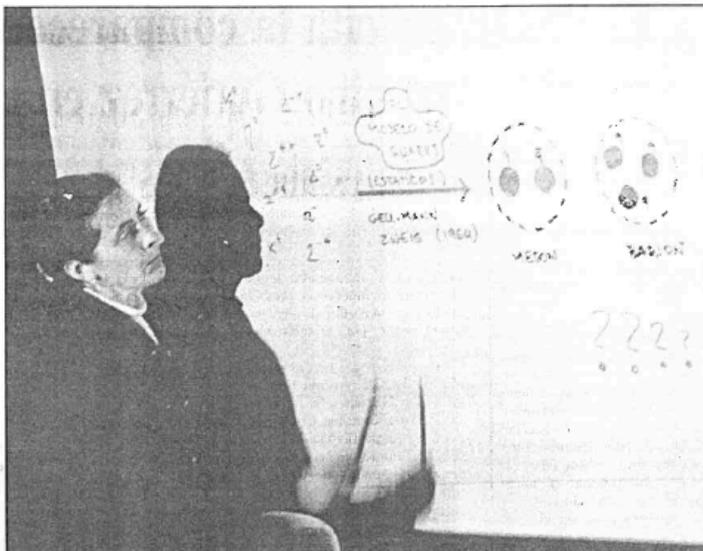
de partículas. La trayectoria identificable de éstas se registra entonces en un detector "como una cebolla". Pero este artefacto no permite observar directamente el quark top, que aparece en forma de top y antitop, y que se descompondrá rápidamente.

Como es el "bicho"

Por la trayectoria definida se encontró el "bicho", como Teresa Rodrigo denominó casi cariñosamente al quark top finalmente identificado. De entrada, el bicho pesó 35 veces más que la insignificancia del anterior quark catalogado, y como todos los quarks, tiene una carga fraccionaria respecto a la del electrón. En las primeras filas de la conferencia había algunos científicos ya un poco entrados en años, por poco salvados de la generación a la que eso de la carga fraccionaria les repugna, casi como a los detractores de Galileo el que la Tierra se moviera alrededor del Sol. No todos los laureados tienen las agallas de dejar que unos jovencitos les echen sus teorías de toda la vida por el suelo.

También hubo en la conferencia de Teresa Rodrigo diapositivas de las supermillonarias maquinitas, "del tamaño de una casa de tres pisos", indispensables para llegar al el actual eureka, tras una larga y difícil tarea. Teresa Rodrigo decía al público, "los teóricos no están limitados por la técnica y lo tienen más fácil, los que las comprobamos experimentalmente sí".

Que se lo digan a Clinton, cuya administración ha dicho que no es capaz de costear un acelerador aún más potente que el Tevatron, que Teresa y el resto de sus 400 amigos del CDF ya piden para los siguientes pasos. Porque ¿quién es creían



Teresa Rodrigo explica la historia de la búsqueda de las partículas elementales.

DAN GUTIÉRREZ

que por fin se había acabado esa larga carrera para catalogar lo más pequeño que inició Demócrito, de nuevo vuelven a equivocarse, y la misma Teresa Rodrigo reconocía que es "sólo el punto final por ahora, y quedan aún eslabones posteriores". Queda el descubrimiento del Higgs —si existe—, la partícula que dota de masa a la estructura de la materia. ¿Mande?

Si ahora parece resuelto el problema de la estructura de la materia, falta por ver cómo adquiere masa esa estructura. Los teóricos, "los que lo tienen más fácil", ya tienen resueta, mediante un mecanismo que se denomina "rotura espontánea de simetrías". Problema: para que funcione este mecanismo no basta la intervención de los elementos hasta ahora conocidos. Luego la lista no se cierra con el quark top, y le llega el relevo a una nueva partícula, la de Higgs.

El acelerador más potente al que Clinton ha dicho no, es el necesario para encontrar la supuesta partícula Higgs. Aún

así, el acelerador de Tevatron desarrolla mucha más energía que el del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN), ubicado en Ginebra y en el que los españoles participamos.

El Gran Colisionador

Los investigadores que han trabajado en el experimento de Fermilab —fundamentalmente estadounidenses, aunque también italianos y japoneses, además de los tres españoles— colaborarán con los del CERN, que ya tienen diseñado un acelerador mucho más barato que el nuevo que se pidió a Clinton, pero capaz de producir energía muy superior a la del Fermilab. El nombre que se le ha dado no se corta un pelo: El Gran Colisionador Hadrónico (LHC). Pero habrá que esperar, pues aunque se apruebe este año, no estará listo hasta el año 2.003. Y ustedes que lo vean. Dicen que el dinero gastado en investigación básica es una

inversión de futuro, pues los estudios básicos son los que permiten emprender otros de carácter aplicado y fundamentan el desarrollo de la tecnología. Si no nadie daría un duro.

CONVOCATORIA
MUTUA DE PREVISION SOCIAL
IGUALATORIO MEDICO
DE CANTABRIA
SANTANDER

(Antes: Caja de Previsión Iguatorial Médico-Quirúrgico Colegial, S.A.)

Por la presente se convoca a todos los socios de esta Mutua a la reglamentaria Asamblea General Ordinaria que se celebrará en el Salón de Actos del Colegio Oficial de Médicos, sito en la calle General Mola, nº 33, de esta ciudad, el día 24 de mayo de 1994, a las DIECINUEVE horas en primera convocatoria y a las VEINTE horas en segunda con el siguiente:

ORDEN DEL DIA

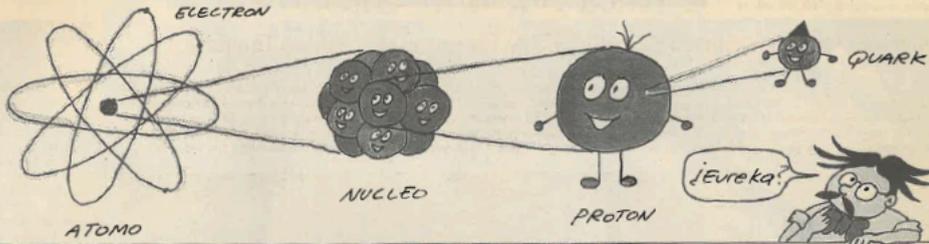
1º.- Examen y aprobación si procede de la Gestión, Memoria, Cuentas y Balances del Ejercicio 1.993. Imputación de Excedentes.

2º.- Renovación parcial reglamentaria de la Junta Rectora.

IFCA, ATR, caja 2.

EL ÚLTIMO QUARK

Los quarks constituyen partículas como el protón y el neutrón, que a su vez forman el núcleo, quienes, con electrones, dan lugar al átomo... ¿Hemos descubierto de qué está formado nuestro Universo?



Descripción de los elementos fundamentales de la materia en una viñeta publicada por el CERN.

Hallado el último 'ladrillo' de la materia

Un equipo de 379 físicos anunció ayer en Chicago la detección de la partícula elemental más buscada

ALICIA RIVERA, Madrid
Uno de los objetivos más perseguidos por la física fundamental en las últimas dos décadas se ha conseguido. El quark top, el sexto miembro de esta familia de particu-

las elementales que con otras seis constituyen los ladrillos de toda la materia que existe y que ha existido desde el origen del Universo, ha sido descubierto en el laboratorio Fermilab de Chicago (EE UU),

tras 17 años de búsqueda. Para encontrarlo ha sido necesario construir todo un enorme acelerador de partículas a propósito, el Tevatron, en el que 379 físicos estadounidenses, pero también japoneses, italia-

lios y una española, han tenido que tomar un billón de datos antes de cantar victoria. Ayer, en Chicago y en Roma, los directores del experimento CDF anunciaron el hallazgo del quark top.

El queso, las piedras, las plantas, las estrellas y las personas están hechas de átomos. Los átomos están hechos de electrones que orbitan alrededor de un pequeño núcleo hecho, a su vez, de otras partículas llamadas protones y neutrones. Estos neutrones y protones están hechos de quarks. Los quarks están hechos... de nada: son los trocitos más pequeños que los físicos han encontrado, hasta ahora.

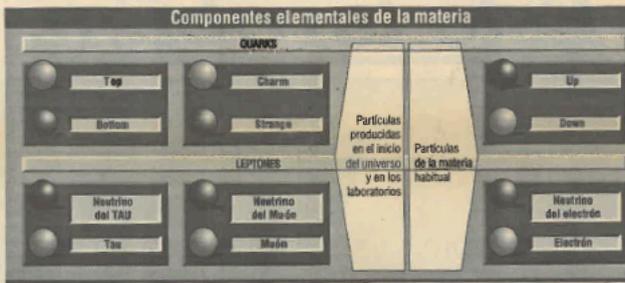
"Ha sido muy emocionante y muy interesante; empezamos a tomar datos en el Tevatron en 1987 y hemos estado nueve meses analizándolos a fondo. Es muy difícil hallar esta partícula porque es muy esquivada", cuenta Teresa Rodrigo, la primera española que ha participado en el experimento CDF (Collider Detector at Fermilab). "Ya hemos empezado a tomar nuevos datos que mejorarán mucho nuestros resultados", continúa.

Los quarks tenían que ser seis y sólo seis; pero hasta ahora sólo se habían encontrado cinco, y desde que se descubrió el quinto, hace 17 años, la búsqueda del último se había convertido en un objetivo irrenunciable. El grupo CDF, dirigido por Mel Shochet y Bill Carithers, ha presentado 12 detecciones de la partícula.

El equipo ha titulado el artículo sobre su hallazgo, enviado a la revista *Physical Review* y firmado por 379 físicos, *Evidencia de producción de quark top*. Ayer en Chicago Shochet mostró la prudencia lógica de los científicos: "No hemos observado aún suficientes ejemplos de producción de quark top para establecer la existencia de la partícula más allá de cualquier duda, pero esta evidencia indica de modo contundente la existencia del sexto y último quark que hemos estado buscando tanto tiempo".

Teoría comprobada

Igual que Mendeleiev, en el siglo pasado, elaboró su famosa tabla periódica —en la que estaban perfectamente ordenados tanto los elementos químicos conocidos entonces como las casillas vacías de otros muchos aún por



EL PAÍS

Con encanto y verdad

El nombre quark fue elegido por el físico estadounidense Murray Gell-Mann, quien ideó el esquema de estas partículas y tomó el vocablo de la línea "Three quarks for muster mark", del libro de James Joyce *Finnegans Wake*. Este original bautizo no es chocante en la comunidad científica de los físicos de partículas que, aunque trabajan con conceptos muy abstractos y alejados de la vida coti-

diana, eligen para sus hallazgos y teorías nombres inusuales. Así, los dos primeros quarks se llaman up y down (*arriba y abajo*), los dos siguientes charm (*encanto*) y strange (*extraño*), el quinto bottom o beauty (*belleza*) y el sexto, el top, se denomina también *truth* (verdad). Y las propiedades de estas partículas son, por ejemplo, sabor y color, aunque nada tienen que ver con el gusto y la vista.

En realidad no son sólo seis quarks lo que hace falta para construir toda la materia, sino también seis partículas más de otra familia, los llamados leptones, a la que pertenecen el electrón y su neutrino, así como sus familiares más pesados (el muón y su neutrino, y el tau y el suyo) asociados a la tres parejas de quarks. Y falta por detectar directamente uno de esos leptones, el neutrino del tau.

La pregunta es si los quarks realmente están hechos de nada, si son los pedacitos fundamentales de la materia. Hasta llegar a los quarks, cada vez que los físicos agitan una partícula, como una caja de cerillas, *sonaba como si tuviera algo dentro*. Encontraron los neutrones y protones dentro del núcleo y los quarks dentro de éstos. Pero cuando agitan los quarks no parece que suene nada dentro.

descubrir—, los físicos del siglo XX han sido capaces de elaborar una tabla de las partículas elementales. Y en ella estaba vacía la casilla del quark top. La teoría física que permitió hace 20 años definir la tabla de las partículas es el Modelo Estándar, que describe los componentes fundamentales de la materia y sus interacciones, y ha sido comprobada exhaustivamente. "Entre los teóricos nadie dudaba de la existencia del quark top. Sin él toda la teoría del Modelo Estándar sería inconsistente desde el punto de vista de la me-

cánica cuántica", comenta Luis Ibáñez, físico teórico de la Universidad Autónoma de Madrid. "Hasta hoy el top era uno de los cimientos escondidos del edificio de la física microscópica. El valor exacto de ese quark podía variar pero su existencia era imperativa. Sin este pilar de los cimientos, la casa se quedaría coja", dice Belén Gavela, físico teórico del CERN, en Ginebra. Lo que el Modelo Estándar viene a decir es que con un puñado de tipos de partículas elementales se construye la materia siguiendo unas reglas precisas,

igual que con el alfabeto morse se puede escribir cualquier cosa con tres signos: el punto, la raya y el espacio. "Reflexionando sobre la formidable solidez de la teoría Estándar de constituyentes e interacciones fundamentales, recuerdo la célebre frase de Einstein: *Lo más incomprensible de universo es que es perfectamente comprensible*", comenta Manuel Aguilar, físico del Ciemat. Pero, para hacer quesos, personas o estrellas no hacen falta todos los tipos de quarks, basta con los dos primeros. Toda la materia conocida que existe aho-

ra en el universo está hecha con los quarks up y down. Lo que pasa es que los físicos se han dado cuenta de que debieron existir todos los quarks en los momentos iniciales de la historia del Universo, en el Big Bang, cuando todo el cosmos estaba muy caliente y concentrado. Enseguida se enfrió y los quarks pesados se desintegraron.

"El quark top ya no existe en la naturaleza, el universo está ahora demasiado frío para mantenerlo con vida. Lo que hacemos en los aceleradores es recrear los primeros momentos del cosmos", explica el italiano Lorenzo Foá, también del CERN.

Einstein

Todo esto se debe a Einstein y a su afirmación de que la energía se convierte en materia y viceversa. En los aceleradores se generan enormes cantidades de energía y se crean partículas. Cuanta más energía, más masivas son las partículas que se pueden producir y para encontrar el top ha habido que construir un acelerador protón / antiprotón muy energético, el Tevatron.

Los físicos de partículas estadounidenses, después de que los europeos habían hecho en la última década los descubrimientos más descollantes en este campo, tenían que mostrar con orgullo su importante hallazgo del top, más aún con el gigantesco superacelerador SSC cancelado recientemente por el Congreso.

El siguiente paso de los físicos es explicar el origen de la masa de las partículas. Para ello la clave es Higgs, una partícula y una hipótesis por ahora mucho más oscura que el Modelo Estándar. Para encontrar Higgs las esperanzas están centradas en un nuevo acelerador de partículas, el LHC, que los europeos proyectan en el CERN.

Mientras tanto, el quark top "es un trozo de información fundamental que nos da una pista preciosa para avanzar en nuevas teorías de unificación y supersimetrías", explica Ibáñez. "Es la crónica de un quark anunciado", resume este teórico.

EL ÚLTIMO QUARK

“Las leyes del universo son muy simples”, dice el Nobel de física Sheldon Glashow

Un hallazgo “muy emocionante”, según uno de los padres del Modelo Estándar

A. R., Madrid
El estadounidense Sheldon Lee Glashow, premio Nobel de Física, es uno de los padres de la teoría del Modelo Estándar. “Si, es muy emocionante, y estoy pendiente de co-

“Pero una cosa es la predicción de la existencia de esta partícula y otra es el descubrimiento de ella; tiene que ser comprobado, porque no podemos estar seguros hasta que una cosa así se encuentra experimentalmente”, ha comentado Glashow en conversación telefónica con EL PAÍS.

“Es un descubrimiento puramente experimental, los teóricos habíamos dicho que el quark top tenía que existir, pero este hallazgo es de ellos”.

¿Y ahora? ¿Cuál es el siguiente paso? “Han medido la masa del quark top y ahora tenemos que explicar por qué esa masa, y los porqués son las preguntas más difíciles de contestar. Y me gustaría ver el Higgs”, dice este profesor de la Universidad de Harvard (EE UU).

Junto con Steven Weinberg y Abdus Salam, Glashow fue galardonado con el Nobel, en 1979, por su aportación esencial en la construcción del Modelo Estándar al descubrir que dos fuerzas fundamentales de la naturaleza (la electromagnética y la débil —responsable de algunas desintegraciones radiactivas—) son en realidad la misma cosa. “A medida que hemos avanzado más y más en el conocimiento de la estructura de la materia, que hemos profundizado más y más, hemos encontrado una tendencia a la simplicidad: las leyes fundamentales de la física, de la naturaleza o de la realidad son, de hecho, comprensibles y muy simples. ¿Por qué? No lo sabemos, es así y aún no podemos explicar por qué”, dice Glashow. “Como digo, los porqués son las preguntas más difíciles de contestar”.

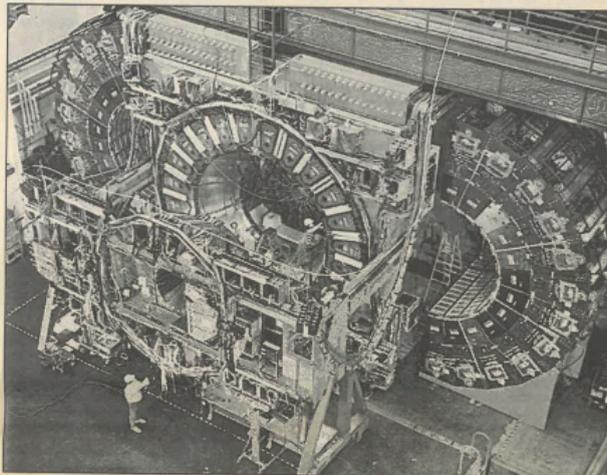
Pequeños misterios

En su libro *The charm of physics*, Glashow cuenta que una pregunta que le plantean a menudo es si se hace física fundamental para explicar el mundo de nuestro alrededor. “La respuesta es ¡no! El mundo que nos rodea fue explicado hace 50 años más o menos. Desde entonces entendemos por qué el cielo es azul y el cobre rojo. Eso es mecánica cuántica elemental. Es demasiado tarde para explicar cómo funciona el mundo diario. Ya se ha hecho. Lo que queda son cosas como neutrinos, muones y K-mesones, cosas que se conocen desde hace medio siglo, que no tienen todavía aplicación práctica que probablemente no tendrán nunca: pequeños misterios, como por qué el universo empezó y cómo acabará”.

“No estamos intentando inventar un nuevo tipo de dentífrico”, continúa. “Lo que estamos intentando hacer es comprender el nacimiento, la evolución y destino de nuestro universo. Estamos intentando conocer por qué las cosas tienen que ser exactamente como son. Estamos intentando exponer la última simplicidad de la naturaleza”, dice Glashow.

nocer más detalles de los resultados del experimento”, dice Glashow, refiriéndose al hallazgo del quark top. “La teoría del Modelo Estándar fue desarrollada en los años setenta, y vimos que los quarks estaban casados,

en parejas, primero los dos de la primera familia, luego los de la segunda, después se descubrió el quinto quark... Tenía que tener pareja, el sexto, el quark top”, dice. Según él, “las leyes de la naturaleza son simples”.



El enorme detector CDF, en el Fermilab (junto a Chicago), durante una revisión.

Como un átomo de oro

TERESA RODRIGO
Después de 17 años, desde el descubrimiento en 1977 del quark bottom, tratando de encontrar este esquivo quark en diferentes experimentos de física de partículas, la colaboración de físicos que integra el experimento CDF del laboratorio Fermilab, de Chicago, ha anunciado la existencia de las primeras evidencias directas de producción del quark top. Es el último de los constituyentes fundamentales de la naturaleza predicho por el Modelo Estándar que aún no había sido observado. El modelo estándar es la teoría actual que mejor describe la composición y comportamiento de la materia del universo. Toda la materia existente puede explicarse hoy como una combinación de 12 constituyentes básicos (seis quarks y seis leptones) que interactúan entre sí mediante tres fuerzas (la gravitatoria, la nuclear fuerte y la electrodébil).

Muchas de las predicciones del modelo estándar se han confirmado con un éxito notable en las últimas décadas, debido al esfuerzo combinado de los físicos en Europa y Estados Unidos y al avance de la tecnología de aceleradores y detectores. El acelerador de partículas de Fermilab (Tevatron) es el de mayor energía de los existentes en el mundo y el único capaz, por el momento, de producir el quark top.

En el Tevatron, donde haces



Teresa Rodrigo.

de protones y antiprotones colisionan a muy alta energía —1.8 TeV (equivalente a 1.800 veces la masa del protón)— el quark top se espera que se produzca por pares. Cada quark top se desintegra inmediatamente en un quark bottom y un bosón W, uno de los bosones portadores de la fuerza débil. Así, si este quark se crea, los productos de la colisión protón antiprotón observados tendrán la característica singular de contener dos bosones W y dos quarks bottom.

Durante el período de agosto de 1992 a mayo de 1993 recogimos en CDF 16 millones

de colisiones protón antiprotón de las que, tras nueve meses de análisis, conseguimos aislar una docena de ellas que tienen las características mencionadas y que admiten interpretarse como producción del quark top, midiéndose una masa para el quark de 174 GeV, con una incertidumbre de 17 GeV.

El quark top es el constituyente más pesado de los observados hasta ahora. Es casi tan pesado como un átomo de oro. Es esta característica la que lo hace especialmente interesante y a la vez tan difícil de producir y observar. Su estudio puede permitir una mejor comprensión del proceso por el cual los objetos adquieren masa, que constituye uno de los retos más importantes de la física actual todavía sin resolver.

La posibilidad de que esta docena de colisiones, una muestra relativamente pequeña, no sea debida a la producción de quark top, si bien es poco probable (0,26%), no puede descartarse totalmente. El trabajo en Fermilab no ha finalizado; en los próximos meses esperamos recoger un número hasta 10 veces mayor de colisiones protón antiprotón que nos permitirán confirmar la existencia del top y medir muchas de sus características.

Teresa Rodrigo es profesora de Física de la universidad de Cantabria y miembro del equipo CDF de Fermilab (Chicago).

Un acelerador construido especialmente para este fin

A. R., Madrid
“Este descubrimiento es una extraordinaria confirmación de lo bien que funciona el Modelo Estándar, y sólo podía hacerse en el Tevatron, que es la instalación de más alta energía del mundo”, dice desde Ginebra Lorenzo Foà, nuevo director de investigación del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN). El LEP, el gran acelerador del CERN, con sus 27 kilómetros de circunferencia, permite resultados mucho más precisos que Tevatron, pero no genera suficiente energía para crear el top. “Pero con el LEP hemos hecho experimentos que indican no sólo que no podía haber más de tres familias de quarks, sino que masa tendría el top”, señala Foà.

Los científicos del CDF, han medido ahora esa masa en 174 GeV (una medida de energía que indica la masa de las partículas elementales) y dicen que el sexto quark es una partícula casi tan pesada como el átomo de oro, aunque en realidad su masa es casi idéntica a dos elementos menos radiantes: el litio y el iterbio, con peso atómico 175 y 173, respectivamente, mientras que el del oro es 197.

“Durante el período experimental 1992-1993, en el Tevatron se produjo un billón de colisiones de partículas en el gran detector CDF, de las cuales 16 millones fueron grabadas y analizadas a fondo”, han explicado los responsables del experimento. Entre esos 16 millones de colisiones han sido hallados los 12 quarks top ayer presentados.

Doce metros

El CDF es un detector de casi 12 metros de ancho por 12 de alto y 30 de longitud, situado en torno a uno de los puntos en que chocan los protones y antiprotones que circulan por el Tevatron casi a la velocidad de la luz. Capas diferentes de dispositivos electrónicos de detección registran los productos de los choques de las partículas y transmiten los datos a los ordenadores.

En realidad no aparecen los quarks top en la pantalla, porque se desintegran inmediatamente en otras muchas partículas, sino que los físicos deducen su presencia al reconstruir los productos de esas desintegraciones.

Los detectores son unas máquinas tecnológicamente muy avanzadas. “El sistema registra los datos (casi un millón de bits de información o el equivalente a la información que hay en un libro de 100 páginas) por cada colisión de partículas”, explica Leon Lederman, premio Nobel de Física y antiguo director del Fermilab. “El sistema de recogida de datos decide inmediatamente si la colisión es interesante y la almacena o no, y está preparado para la siguiente, una millonésima de segundo más tarde”.

14 ARAGONZARAGOZA

15 DE MAYO DE 1994
DOMINGO
HERALDO DE ARAGON

Teresa Rodrigo, una investigadora que estudió Físicas en Zaragoza, ha formado parte, con otros dos españoles, del equipo de 379 científicos que han descubierto en Chicago el último «quark». Los «quarks» están considerados como

los «ladrillos» del universo, los «trocitos» más pequeños de la materia. Rodrigo, cuyo paso por la facultad no fue el de una «empollona», dice que el hallazgo ayudará a comprender mejor el comportamiento del universo desde su origen.

TERESA RODRIGO

Los físicos buscamos respuestas a las preguntas de los filósofos

Encarna Samitier

PREGUNTA.—Usted, junto con otros dos españoles, ha formado parte del equipo de 379 investigadores que han descubierto, en Chicago, el «quark top», considerado como el último «ladrillo» de la materia.

¿Cómo ha sido el hallazgo?

R.—Nosotros todavía no lo llamamos descubrimiento. Somos más cautos. Lo que tenemos es la evidencia experimental, que habrá que confirmar, de que se produce este «quark», el sexto miembro de una familia de partículas elementales que, con otros seis leptones, constituyen los «ladrillos» de toda la materia que existe en el universo. Ha sido muy laborioso, hemos tenido que tomar datos de colisiones de protones y antiprotones durante 10 meses hasta un total de 16 millones de colisiones que hemos analizado durante casi un año. Así que ha sido complicado a la vez excitante. Es un mundo que buscado desde hace 17 años. Se han construido aceleradores de partículas —un aparato que reproduce las «condiciones» y las temperaturas del inicio del Universo— con energías muy elevadas para crear el «quark». Y parece que lo encontramos.

P.—¿Por qué era tan buscada esa partícula, el «quark top»?

R.—Porque el modelo que tenemos para describir la materia del Universo decía que tenía que existir. Si no aparece, hubiera sido una auténtica catástrofe. Toda la construcción del llamado modelo estándar, que resume los conocimientos que tenemos sobre el cosmos, se hubiera caído. Según el modelo estándar, toda la materia se entiende como una combinación de 12 elementos básicos, entre los que están los «quarks». Utilizando un símil sencillo, si vas a hacer

Una investigadora formada en Zaragoza ha participado en el hallazgo del «quark top»

una casa, que es el Universo, los ladrillos son los «quarks» y el cemento las interacciones entre ellos. Todo lo que existe, las mesas, las sillas, las lámparas, también las personas, se reducen a 12 elementos y cuatro interacciones entre ellos. Es una comprensión del Universo muy profunda, muy de raíz.

P.—Su instrumento de trabajo es el acelerador de partículas, un aparato en el que se reproducen las condiciones del inicio del Universo. ¿Se sienten, de algún modo, creadores del cosmos?

R.—Toda ciencia tiene algo de creación. Nosotros intentamos

recrear los primeros segundos del Universo. Con la ayuda del acelerador volvemos a crear las partículas que existían a la temperatura enorme que había en los primeros instantes del Universo para entender su evolución posterior.

P.—En ese sentido, los físicos se parecen mucho a los filósofos que han intentado responder desde siempre a la eterna cuestión de quiénes somos, de dónde venimos y a dónde vamos.

R.—Hay mucho de eso. Estas son las primeras cuestiones que se planteó la humanidad. A este

respecto, alguien ha dicho que la física de altas energías es la aportación filosófica del siglo XX. Es cierto que intentamos responder a esas preguntas que han sido materia filosófica en otros tiempos. Ahora es la física la que está dando respuestas.

P.—El «quark» que han encontrado en Chicago se considera el último «ladrillo» de la materia. Pero el hallazgo obliga a seguir preguntando, ¿y antes qué?

R.—Sabemos que hubo una gran explosión, lo que se ha definido como el «big bang», pero ignoramos lo que hubo antes. De todas maneras, si extrapolamos el avance tan grande producido en los últimos cuarenta años podemos ser optimistas y pensar que podremos llegar a saber muchas cosas más del origen del Universo.

P.—Stephen Hawking ha lo-



Teresa Rodrigo

Guillermo Maestre

grado que los avances de la física interesen al gran público. ¿Qué le parece este fenómeno?

R.—Muy positivo. Creo que es muy bueno que conocimientos terriblemente complicados se acerquen a la gente. Ojalá hubiera más divulgación para que estas ideas formen parte del conocimiento de la Humanidad.

Los ladrillos del universo

Según los científicos, los «quarks» son las partículas más pequeñas de la materia encontradas hasta ahora, los «trocitos» más pequeños del Universo. En concreto, el úl-

Científica y feminista

«No creo que nadie me recuerde como una empollona», afirma Teresa Rodrigo, entre risas, cuando se le pregunta si metió muchas horas de estudio en la facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza. En los primeros cursos de facultad, en los movidos años de la transición, la política se llevó buena parte de su tiempo. Aún así, el currículum de Rodrigo, que, modestamente, no quiere hablar de ello, debió de ser lo suficientemente impresionante como para permitirle realizar la tesis en Madrid, en el laboratorio del CIEMAT e ir, de allí, a Ginebra, al laboratorio de Física de Partículas del prestigioso CERN. Cuando el experimento en el que trabajaba terminó, pidió trabajo

en un laboratorio con el único acelerador de protones y antiprotones del mundo, ubicado en Chicago, donde ha desarrollado la labor que ha desembocado en el hallazgo del último «quark». Desde hace un tiempo, da clases en la Universidad de Cantabria. Feminista convencida, Rodrigo desarrolla su labor en un «mundo de hombres, porque el trabajo de altas energías es una estructura muy masculina» y comenta —con resignado sentido del humor— que quizá haya conseguido integrarse «demasiado». El mundo de la investigación, dice, es tan duro como se imagina desde fuera. Sin horario y tan absorbente que hace inevitables ciertas renunciaciones.



P.—Aparte de ayudarnos a conocer nuestros orígenes, ¿el descubrimiento del «quark» tendrá aplicaciones prácticas?

R.—Es una investigación muy básica, y en ese sentido no es aplicable. Es un paso hacia el entendimiento del Universo, que acota campos de conocimiento que tenemos abiertos. Pero, por otro lado, hacer estos experimentos requiere un desarrollo tecnológico muy grande, que si tiene aplicaciones. Por ejemplo, para construir un detector de partículas hay que desarrollar cámaras de detección muy precisas que se pueden usar en medicina. Es un producto secundario de la investigación. Ahora, en sí, el hecho de que exista el «quark top» no cambia la vida. Simplificando bastante, se puede decir que entendemos mejor la evolución del Universo pero no nos cura una gripe.

timo encontrado era el único que faltaba de los seis que los científicos «sabían» que tenían que existir. Los «quarks», a su vez, constituyen partículas como el protón y el neutrón, que, a su vez, forman el núcleo, y, con electrones, dan lugar al átomo. Todo lo que existe, la carne, las piedras, los planetas, las personas, están hechas de átomos. El nombre «quark», que ha saltado a la fama de nuevo en los últimos tiempos, con motivo del espectacular descubrimiento realizado en Chicago, fue elegido por el físico estadounidense Murray Gell-Man, que tomó el vocablo del libro de James Joyce «Finnegans Wake». Otra de las frecuentes conexiones entre los científicos y el mundo de la literatura y la filosofía.

Anexo IX: Autores y autoras en el descubrimiento del quark top en CDF

FERMILAB-PUB-94/097-E
CDF/PUB/TOP/PUBLIC/2561

Evidence for Top Quark Production in $\bar{p}p$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV

F. Abe,¹³ M. G. Albrow,⁷ D. Amidei,¹⁶ J. Antos,²⁸ C. Anway-Wiese,⁴
G. Apollinari,²⁶ H. Areti,⁷ P. Auchincloss,²⁵ M. Austern,¹⁴ F. Azfar,²¹ P. Azzi,²⁰
N. Bacchetta,¹⁸ W. Badgett,¹⁶ M. W. Bailey,²⁴ J. Bao,³⁴ P. de Barbaro,²⁵
A. Barbaro-Galtieri,¹⁴ V. E. Barnes,²⁴ B. A. Barnett,¹² P. Bartalini,²³ G. Bauer,¹⁵
T. Baumann,⁹ F. Bedeschi,²³ S. Behrends,² S. Belforte,²³ G. Bellettini,²³
J. Bellinger,³³ D. Benjamin,³² J. Benlloch,¹⁵ J. Bensinger,² D. Benton,²¹
A. Beretvas,⁷ J. P. Berge,⁷ S. Bertolucci,⁸ A. Bhatti,²⁶ K. Biery,¹¹ M. Binkley,⁷ F.
Bird,²⁹ D. Bisello,²⁰ R. E. Blair,¹ C. Blocker,²⁹ A. Bodek,²⁵ V. Bolognesi,²³
D. Bortoletto,²⁴ C. Boswell,¹² T. Boulos,¹⁴ G. Brandenburg,⁹ E. Buckley-Geer,⁷
H. S. Budd,²⁵ K. Burkett,¹⁶ G. Busetto,²⁰ A. Byon-Wagner,⁷ K. L. Byrum,¹
C. Campagnari,⁷ M. Campbell,¹⁶ A. Caner,⁷ W. Carithers,¹⁴ D. Carlsmith,³³
A. Castro,²⁰ Y. Cen,²¹ F. Cervelli,²³ J. Chapman,¹⁶ M.-T. Cheng,²⁸ G. Chiarelli,⁸
T. Chikamatsu,³¹ S. Cihangir,⁷ A. G. Clark,²³ M. Cobal,²³ M. Contreras,⁵
J. Conway,²⁷ J. Cooper,⁷ M. Cordelli,⁸ D. P. Coupal,²⁹ D. Crane,⁷
J. D. Cunningham,² T. Daniels,¹⁵ F. DeJongh,⁷ S. Delchamps,⁷ S. Dell'Agnello,²³
M. Dell'Orso,²³ L. Demortier,²⁶ B. Denby,²³ M. Deninno,³ P. F. Derwent,¹⁶
T. Devlin,²⁷ M. Dickson,²⁵ S. Donati,²³ R. B. Drucker,¹⁴ A. Dunn,¹⁶ K. Einsweiler,¹⁴
J. E. Elias,⁷ R. Ely,¹⁴ E. Engels, Jr.,²² S. Eno,⁵ D. Errede,¹⁰ S. Errede,¹⁰ Q. Fan,²⁵
B. Farhat,¹⁵ I. Fiori,³ B. Flaughner,⁷ G. W. Foster,⁷ M. Franklin,⁹ M. Frautschi,¹⁸
J. Freeman,⁷ J. Friedman,¹⁵ H. Frisch,⁵ A. Fry,²⁹ T. A. Fuess,¹ Y. Fukui,¹³
S. Funaki,³¹ G. Gagliardi,²³ S. Galeotti,²³ M. Gallinaro,²⁰ A. F. Garfinkel,²⁴
S. Geer,⁷ D. W. Gerdes,¹⁶ P. Giannetti,²³ N. Giokaris,²⁶ P. Giromini,⁸ L. Gladney,²¹
D. Glenzinski,¹² M. Gold,¹⁸ J. Gonzalez,²¹ A. Gordon,⁹ A. T. Goshaw,⁶
K. Goulianos,²⁶ H. Grassmann,⁶ A. Grewal,²¹ G. Grieco,²³ L. Groer,²⁷
C. Grosso-Pilcher,⁵ C. Haber,¹⁴ S. R. Hahn,⁷ R. Hamilton,⁹ R. Handler,³³
R. M. Hans,³⁴ K. Hara,³¹ B. Harral,²¹ R. M. Harris,⁷ S. A. Hauger,⁶ J. Hauser,⁴
C. Hawk,²⁷ J. Heinrich,²¹ D. Hennessy,⁶ R. Hollebeek,²¹ L. Holloway,¹⁰
A. Hölscher,¹¹ S. Hong,¹⁶ G. Houk,²¹ P. Hu,²² B. T. Huffman,²² R. Hughes,²⁵
P. Hurst,⁹ J. Huston,¹⁷ J. Huth,⁹ J. Hysten,⁷ M. Incagli,²³ J. Incandela,⁷ H. Iso,³¹
H. Jensen,⁷ C. P. Jessop,⁹ U. Joshi,⁷ R. W. Kadel,¹⁴ E. Kajfasz,^{7a} T. Kamon,³⁰
T. Kaneko,³¹ D. A. Kardelis,¹⁰ H. Kasha,³⁴ Y. Kato,¹⁹ L. Keeble,³⁰
R. D. Kennedy,²⁷ R. Kephart,⁷ P. Kesten,¹⁴ D. Kestenbaum,⁹ R. M. Keup,¹⁰
H. Keutelian,⁷ F. Keyvan,⁴ D. H. Kim,⁷ H. S. Kim,¹¹ S. B. Kim,¹⁶ S. H. Kim,³¹
Y. K. Kim,¹⁴ L. Kirsch,² P. Koehn,²⁵ K. Kondo,³¹ J. Konigsberg,⁹ S. Kopp,⁵
K. Kordas,¹¹ W. Koska,⁷ E. Kovacs,^{7a} W. Kowald,⁶ M. Krasberg,¹⁶ J. Kroll,⁷
M. Kruse,²⁴ S. E. Kuhlmann,¹ E. Kuns,²⁷ A. T. Laasanen,²⁴ S. Lammel,⁴
J. I. Lamoureux,³³ T. LeCompte,¹⁰ S. Leone,²³ J. D. Lewis,⁷ P. Limon,⁷
M. Lindgren,⁴ T. M. Liss,¹⁰ N. Lockyer,²¹ O. Long,²¹ M. Loretì,²⁰ E. H. Low,²¹

J. Lu,³⁰ D. Lucchesi,²³ C. B. Luchini,¹⁰ P. Lukens,⁷ J. Lys,¹⁴ P. Maas,³³
 K. Maeshima,⁷ A. Maghakian,²⁶ P. Maksimovic,¹⁵ M. Mangano,²³ J. Mansour,¹⁷
 M. Mariotti,²³ J. P. Marriner,⁷ A. Martin,¹⁰ J. A. J. Matthews,¹⁸ R. Mattingly,²
 P. McIntyre,³⁰ P. Melese,²⁶ A. Menzione,²³ E. Meschi,²³ G. Michail,⁹ S. Mikamo,¹³
 M. Miller,⁵ R. Miller,¹⁷ T. Mimashi,³¹ S. Miscetti,⁸ M. Mishina,¹³ H. Mitsushio,³¹
 S. Miyashita,³¹ Y. Morita,¹³ S. Moulding,²⁶ J. Mueller,²⁷ A. Mukherjee,⁷ T. Muller,⁴
 P. Musgrave,¹¹ L. F. Nakae,²⁹ I. Nakano,³¹ C. Nelson,⁷ D. Neuberger,⁴
 C. Newman-Holmes,⁷ L. Nodulman,¹ S. Ogawa,³¹ S. H. Oh,⁶ K. E. Ohl,³⁴
 R. Oishi,³¹ T. Okusawa,¹⁹ C. Pagliarone,²³ R. Paoletti,²³ V. Papadimitriou,⁷
 S. Park,⁷ J. Patrick,⁷ G. Pauletta,²³ M. Paulini,¹⁴ L. Pescara,²⁰ M. D. Peters,¹⁴
 T. J. Phillips,⁶ G. Piacentino,³ M. Pillai,²⁵ R. Plunkett,⁷ L. Pondrom,³³
 N. Produit,¹⁴ J. Proudfoot,¹ F. Ptohos,⁹ G. Punzi,²³ K. Ragan,¹¹ F. Rimondi,³
 L. Ristori,²³ M. Roach-Bellino,³² W. J. Robertson,⁶ T. Rodrigo,⁷ J. Romano,⁵
 L. Rosenson,¹⁵ W. K. Sakumoto,²⁵ D. Saltzberg,⁵ A. Sansoni,⁸ V. Scarpine,³⁰
 A. Schindler,¹⁴ P. Schlabach,⁹ E. E. Schmidt,⁷ M. P. Schmidt,³⁴ O. Schneider,¹⁴
 G. F. Sciacca,²³ A. Scribano,²³ S. Segler,⁷ S. Seidel,¹⁸ Y. Seiya,³¹ G. Sganos,¹¹
 A. Sgolacchia,³ M. Shapiro,¹⁴ N. M. Shaw,²⁴ Q. Shen,²⁴ P. F. Shepard,²²
 M. Shimojima,³¹ M. Shochet,⁵ J. Siegrist,²⁹ A. Sill,^{7a} P. Sinervo,¹¹ P. Singh,²²
 J. Skarha,¹² K. Sliwa,³² D. A. Smith,²³ F. D. Snider,¹² L. Song,⁷ T. Song,¹⁶
 J. Spalding,⁷ L. Spiegel,⁷ P. Sphicas,¹⁵ A. Spies,¹² L. Stanco,²⁰ J. Steele,³³
 A. Stefanini,²³ K. Strahl,¹¹ J. Strait,⁷ D. Stuart,⁷ G. Sullivan,⁵ K. Sumorok,¹⁵
 R. L. Swartz, Jr.,¹⁰ T. Takahashi,¹⁹ K. Takikawa,³¹ F. Tartarelli,²³ W. Taylor,¹¹
 Y. Teramoto,¹⁹ S. Tether,¹⁵ D. Theriot,⁷ J. Thomas,²⁹ R. Thun,¹⁶ M. Timko,³²
 P. Tipton,²⁵ A. Titov,²⁶ S. Tkaczyk,⁷ K. Tollefson,²⁵ A. Tollestrup,⁷ J. Tonnison,²⁴
 J. F. de Troconiz,⁹ J. Tseng,¹² M. Turcotte,²⁹ N. Turini,³ N. Uemura,³¹
 F. Ukegawa,²¹ G. Unal,²¹ S. van den Brink,²² S. Vejckik, III,¹⁶ R. Vidal,⁷
 M. Vondracek,¹⁰ R. G. Wagner,¹ R. L. Wagner,⁷ N. Wainer,⁷ R. C. Walker,²⁵
 G. Wang,²³ J. Wang,⁵ M. J. Wang,²⁸ Q. F. Wang,²⁶ A. Warburton,¹¹ G. Watts,²⁵
 T. Watts,²⁷ R. Webb,³⁰ C. Wendt,³³ H. Wenzel,¹⁴ W. C. Wester, III,¹⁴
 T. Westhusing,¹⁰ A. B. Wicklund,¹ R. Wilkinson,²¹ H. H. Williams,²¹ P. Wilson,⁵
 B. L. Winer,²⁵ J. Wolinski,³⁰ D. Y. Wu,¹⁶ X. Wu,²³ J. Wyss,²⁰ A. Yagil,⁷ W. Yao,¹⁴
 K. Yasuoka,³¹ Y. Ye,¹¹ G. P. Yeh,⁷ P. Yeh,²⁸ M. Yin,⁶ J. Yoh,⁷ T. Yoshida,¹⁹
 D. Yovanovitch,⁷ I. Yu,³⁴ J. C. Yun,⁷ A. Zanetti,²³ F. Zetti,²³ S. Zhang,¹⁵
 W. Zhang,²¹ and S. Zucchelli³

(CDF Collaboration)

¹ Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439

² Brandeis University, Waltham, Massachusetts 02254

³ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, University of Bologna, I-40126 Bologna, Italy

⁴ University of California at Los Angeles, Los Angeles, California 90024

⁵ University of Chicago, Chicago, Illinois 60637

⁶ Duke University, Durham, North Carolina 27708

⁷ Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois 60510

⁸ Laboratori Nazionali di Frascati, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, I-00044 Frascati, Italy

IFCA, ATR, caja 2.