

PROYECTO DOCENTE E INVESTIGADOR

Candidato:

PABLO MARTÍNEZ RUIZ DEL ÁRBOL

Oferta de Empleo Público 2021: Universidad de Cantabria

| | |
|-----------------------|---------------------------------------|
| Concurso 6/21: | Profesor Titular de Universidad |
| Area de conocimiento: | Física de Altas Energías |
| Departamento: | Física Moderna |
| Perfil Docente: | Asignaturas propias del área |
| Perfil Investigador: | Física experimental de Altas Energías |

Índice general

| | |
|--|----------|
| 1. Proyecto docente | 5 |
| 1.1. Marco académico e institucional | 5 |
| 1.1.1. La Universidad en las sociedades del conocimiento | 5 |
| 1.1.2. El Espacio Europeo de Educación Superior | 6 |
| 1.1.3. La Universidad en España | 12 |
| 1.1.4. La Universidad de Cantabria | 13 |
| 1.1.5. La Facultad de Ciencias | 18 |
| 1.2. Docencia: criterios pedagógicos y metodológicos | 19 |
| 1.2.1. Planificación y preparación docente | 21 |
| 1.2.2. Práctica docente | 22 |
| 1.2.3. Evaluación de la docencia | 30 |
| 1.2.4. Recursos didácticos y tecnológicos para la docencia | 32 |
| 1.3. La Física y los estudios de Física | 35 |
| 1.3.1. Importancia de la Física | 35 |
| 1.3.2. Objetivos de la enseñanza de la Física | 36 |
| 1.3.3. Competencias desarrolladas en la titulación de Física | 36 |
| 1.3.4. Proyección profesional | 40 |
| 1.3.5. El Grado de Física en la Universidad de Cantabria | 40 |
| 1.4. Asignatura: Física de Partículas Elementales | 44 |

| | |
|---|-----------|
| 1.4.1. Presentación de la asignatura | 44 |
| 1.4.2. Guía docente | 47 |
| 1.4.3. Desarrollo de temas | 52 |
| 2. Proyecto investigador | 75 |
| 2.1. La investigación como parte esencial de la actividad universitaria | 75 |
| 2.2. Contexto del proyecto investigador | 76 |
| 2.2.1. Física de Altas Energías | 76 |
| 2.2.2. El Gran Colisionador de Hadrones | 79 |
| 2.2.3. El Solenoide Compacto de Muones | 80 |
| 2.2.4. El programa de física del LHC | 81 |
| 2.2.5. El High Luminosity Large Hadron Collider | 82 |
| 2.3. Análisis de datos con el experimento CMS | 84 |
| 2.3.1. Experiencia previa | 85 |
| 2.3.2. Búsquedas de Nueva Física con datos del Run 3 en CMS | 88 |
| 2.3.3. Búsqueda de Nueva Física en el HL-LHC | 91 |
| 2.4. Participación en el “Phase 2 Upgrade”: el MTD | 92 |
| 2.4.1. Experiencia previa | 92 |
| 2.4.2. Desarrollo del software del MTD | 94 |
| 2.4.3. Ensamblado de los módulos del ETL | 96 |
| 2.5. Tomografía muónica en aplicaciones industriales | 98 |
| 2.5.1. Experiencia previa | 98 |
| 2.5.2. Desarrollo de algoritmos de reconstrucción | 100 |
| 2.5.3. Desarrollo de simulaciones basadas en redes adversarias | 101 |
| 2.5.4. Medida del momento: tomografía muónica y LGADs | 102 |
| 2.6. Futuros aceleradores | 102 |

Capítulo 1

Proyecto docente

1.1. Marco académico e institucional

1.1.1. La Universidad en las sociedades del conocimiento

Resulta interesante comenzar el proyecto docente proporcionando una simple definición del concepto de Universidad. El diccionario de la lengua de la Real Academia Española (RAE) en su última edición (la 23^a), recoge la siguiente acepción:

universidad.

(Del lat. *universitas*, -atis).

1. f. Institución de enseñanza superior que comprende diversas facultades, y que confiere los grados académicos correspondientes. Según las épocas y países puede comprender colegios, institutos, departamentos, centros de investigación, escuelas profesionales, etc.

En primer lugar, esta definición se refiere a la Universidad como Institución y por lo tanto como un organismo que desempeña una función de interés público. Es importante subrayar este aspecto ya que vincula de manera indisoluble la actividad universitaria con la vocación de servicio a la ciudadanía. En segundo lugar, la definición delimita el ámbito de operación de la universidad, a la enseñanza superior, en diferentes facultades (que atienden a diferentes ramas del saber) y que confiere grados académicos. Las primeras universidades tienen su origen en la Europa medieval. El término en latín *universitas* hacía entonces referencia a un gremio profesional y, en realidad, el término *universitas* se acabó utilizando como abreviatura de un gremio concreto, el *universitas magistrorum et scholarium* (el gremio de maestros y discípulos). Este gremio se dedicaba tanto a la enseñanza como a la investigación y la difusión del saber. Actividad ésta que ha perdurado hasta nuestros días ligada a la Universidad. La definición de la RAE parece no recoger este aspecto investigador, aunque en realidad aparece de forma implícita en el término “enseñanza superior” tal y como indica la UNESCO [1]:

La enseñanza superior se distingue de la primaria y secundaria no solo por la edad y nivel de los alumnos, sino también por la producción y valorización de nuevos conocimientos en el ámbito cultural, social y económico. Si se ven privadas de la posibilidad de desempeñar esa función de investigación, descubrimiento e innovación, las instituciones de enseñanza superior quedan reducidas a la condición de centros de “enseñanza terciaria”, que son una mera prolongación de los centros docentes de primaria y secundaria.

La Universidad ha sufrido profundas transformaciones desde el surgimiento de los primeros centros en la época medieval. En efecto, fruto de su vocación de servicio público, no puede separarse su evolución de la evolución de las sociedades en las que presta servicio. El citado documento de la UNESCO incide sobre el papel moderno de la Universidad en el contexto de la sociedad de la información. La sociedad actual se caracteriza por el acceso inmediato y global a la información, resultado de la revolución de las nuevas tecnologías. De hecho, la UNESCO se expresa en términos de las sociedades del conocimiento, como un elemento plural, reconociendo la diversidad cultural y lingüística y rechazando como principio la idea de un modelo único de sociedad. Además, sitúa a las Universidades como pilares de estas sociedades del conocimiento, como ejes del desarrollo creativo e innovador.

La Universidad, como tesorera tradicional del conocimiento, necesita adaptarse a estas sociedades del conocimiento, en las que el acceso a la información es masivo, no sólo por la facilidad de acceso a fuentes impresas, sino, sobre todo, por la llegada de las nuevas tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC). Esta adaptación modifica el papel del profesor y del alumno, acercando sus posiciones, tradicionalmente separadas por la barrera del conocimiento. El profesor deja de estar en posesión de la “verdad” única, ya que, toda la información que utiliza para transmitir su conocimiento puede ser contrastada con infinidad de fuentes, fomentando por tanto el espíritu crítico. En el momento actual los jóvenes están en la vanguardia de las nuevas tecnologías, con un acceso rápido a la información, que con frecuencia confunden con conocimiento. El profesor necesita un aprendizaje continuado para poder adaptarse a estos avances tecnológicos. Por su parte, el alumno se ve forzado a abandonar su papel de receptor pasivo de conocimientos y debe adoptar una actitud activa de aprendizaje que le permita crear y aplicar sus propios conocimientos a partir de la información disponible. En este proceso el profesor debe ser un guía, aportando su experiencia en la identificación y tratamiento de la información necesarios para llegar al conocimiento.

1.1.2. El Espacio Europeo de Educación Superior

El Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) es el resultado del proceso de convergencia voluntaria y reforma coordinada a escala europea de los sistemas de educación superior, conocido también como “proceso de Bolonia”. Promovido en 1999 por los ministros de educación superior de 29 países (entre ellos España), este proceso se ha ido desarrollando y ampliando su alcance hasta abarcar en la actualidad a 48 países, lo que

supone una representación de más de 37 millones de estudiantes¹.

Las reformas para la creación del EEEES están basadas en seis objetivos sencillos, que son la esencia del proceso y que se han ido concretando y ampliando a lo largo de estos años por los gobiernos y las instituciones implicadas en el proceso:

- Adopción de un sistema fácilmente legible y comparable de titulaciones.
- Adopción de un sistema basado en tres ciclos (grado, máster y doctorado).
- Establecimiento de un sistema internacional de créditos.
- Promoción de la movilidad de estudiantes, profesores e investigadores y personal de administración y servicios, y superación de los obstáculos que dificultan dicha movilidad.
- Promoción de la cooperación europea para garantizar la calidad de la educación superior.
- Promoción de una dimensión europea de la educación superior.

Tras la Declaración de Bolonia, los ministros convinieron en la necesidad de llevar a cabo de forma periódica (cada dos años) una supervisión del proceso que facilitara además, la adaptación continua a las nuevas circunstancias que se fueran presentando. Quedaban así sentadas las bases para la construcción del EEEES, con la fecha de implantación fijada para el año 2010. Las reuniones de seguimiento de la convergencia europea en materia de educación universitaria y con el objeto de sentar las directrices y las prioridades de los años por venir tuvieron lugar en: Praga (2001, 33 países), Berlín (2003), Bergen (2005, 45 países), Londres (2007), Lovaina (2009), Viena (2010), Bucarest (2012) y Yerevan (2015). En la Cumbre de Gotemburgo de 2017, los líderes de la UE expusieron una visión común de la educación y la cultura. En sus Conclusiones de diciembre de 2017, el Consejo Europeo pidió a los Estados miembros, al Consejo y a la Comisión que presentaran una serie de iniciativas, entre ellas:

"... reforzar en toda la UE las asociaciones estratégicas entre instituciones de enseñanza superior y promover la constitución, de aquí a 2024, de una veintena de 'Universidades Europeas', que serían redes de universidades de toda la UE creadas desde abajo, lo cual permitirá a los estudiantes graduarse combinando períodos de estudio en varios países de la UE y contribuirá a la competitividad internacional de las universidades europeas."

Desarrollada conjuntamente por las instituciones de educación superior, las organizaciones de estudiantes, los Estados miembros y la Comisión, la Iniciativa "Universidades Europeas" responde a esta petición y es, hoy día, una de las propuestas que mejor reflejan la ambición de la UE de construir un Espacio Europeo de Educación.

¹https://eacea.ec.europa.eu/national-policies/eurydice/content/european-higher-education-area-2018-bologna-process-implementation-report_en

En España, la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA) puso en marcha el *Programa de Convergencia Europea* con el fin de impulsar el proceso de convergencia en el marco universitario español. El objetivo principal de esta iniciativa es potenciar aquellas actuaciones que impulsen la integración de la Educación Superior española en el EEEES. La ANECA, a través de este programa, ha publicado una gran cantidad de documentos de referencia sobre el EEEES y, en particular, una serie de Libros Blancos con el objetivo de orientar a las universidades en la elaboración de sus nuevos Títulos de Grado. Por su parte, los diferentes Estados firmantes han ido realizando las reformas legislativas pertinentes con el fin de cumplir el calendario y los objetivos recogidos en la Declaración de Bolonia. En particular, en España se han ido aprobando diferentes Reales Decretos que regulan los diferentes aspectos que afectan a la Educación Superior.

El nuevo sistema de titulaciones establecido en el marco del EEEES se basa en dos niveles de formación, Grado y Postgrado, que en su conjunto se estructuran en tres ciclos: Grado, Máster y Doctorado. El Grado queda para la exposición sucinta y general de las diversas materias, debiendo dejar la profundización para los estudios de Máster y Doctorado que el alumno, en su caso, elija seguir, según sus preferencias y expectativas laborales. Se pretende así tener un acceso al mercado laboral más inmediato (con cuatro años de carrera, para aquellas profesiones que no requieran conocimientos particularmente extensos, de manera que no se pierdan tiempo y recursos) o, en su caso, más especializado (si desea seguirse un Máster de especialización profesional de 1 ó 2 años). Los estudios de Máster constituyen, además, una vía de acceso al Doctorado, el cual proporciona una formación avanzada en técnicas de investigación y conduce a la obtención del título de Doctor. Este representa el nivel más elevado en la educación superior con una duración de entre 3 y 4 años, presumiblemente, para realizar carrera universitaria o en Centros de Investigación Superior. En el nuevo EEEES, el Postgrado constituye así una posibilidad de especialización que, en función de las expectativas laborales del alumno, puede llegar a ser de realización imprescindible.

El Suplemento Europeo al Título

Uno de los objetivos principales del EEEES es promover la movilidad de los estudiantes, graduados y profesores e investigadores, en todo el ámbito europeo. Es por ello, que el nuevo modelo de enseñanza busca adoptar un sistema de educación superior con titulaciones comparables entre distintas universidades europeas. En este sentido, el Suplemento Europeo al Título (SET) (RD 1044/2003) juega un papel importante ya que se trata de un anexo al título universitario con la información unificada y personalizada para cada titulado sobre los aspectos más relevantes de su formación universitaria. El título se expide en castellano y en otra lengua oficial de la Unión Europea que la Universidad determine y constituye por tanto el documento que otorga validez comunitaria al currículum académico. En cuanto al Postgrado, la iniciativa de su oferta y contenido corresponde a las Universidades y pasa por diversas instancias que valoran su oportunidad y viabilidad. En este sentido, para evitar la competencia entre diversas universidades, principalmente de la misma región, se puede tender a repartir especialidades, lo que incentiva la movilidad del alumno que, en función del perfil que quiera dar a su formación, tendrá en ocasiones

que desplazarse a otra Universidad.

El crédito ECTS

Una de las grandes novedades del EEEES es el sistema de créditos ECTS (*European Credit Transfer and Accumulation System*) que viene dictado por el nuevo sistema de enseñanza centrado en el estudiante. Las sucesivas reformas legislativas originadas a partir del proceso de Bolonia han ido propiciando que cada vez exista menor distancia entre el profesor y el alumno, tratando de incentivar la participación de éste último y favorecer la asimilación de la disciplina. Por otro lado, este sistema nace integrado en el Programa ERASMUS, siendo uno de sus objetivos la promoción del reconocimiento académico en la Unión Europea que permita o facilite la libre circulación entre los estados miembros a los estudiantes. Este sistema se basa en la confianza mutua entre las instituciones participantes, para lo que cada una de ellas describe los cursos que ofrece, indicando los créditos de cada asignatura, para facilitar a los estudiantes de otras universidades la selección de los cursos que van a realizar. Los estudiantes que participan en el programa Erasmus tienen reconocidas las calificaciones obtenidas en otra de las instituciones y podrán transferir sus créditos académicos desde una institución a otra.

El sistema de créditos ECTS trata de cuantificar por primera vez el trabajo del alumno en su proceso de aprendizaje, reflejando para ello las horas correspondientes a las clases lectivas, teóricas o prácticas, las horas dedicadas a la realización de seminarios, trabajos, prácticas o proyectos, y las horas de estudio, en particular las exigidas para la preparación y realización de los exámenes y pruebas de evaluación (art. 4.3 RD 1125/2003). Como consecuencia de este desglose, la traducción en tiempo (horas) del crédito ECTS es diferente en cada país, si bien la mayoría, incluida España (Real Decreto 1125/2003), están en el rango de 25 a 30 horas². La distribución propuesta en el espacio europeo pasa porque las titulaciones de Grado tengan un total de 240 créditos ECTS distribuidos uniformemente en cuatro cursos académicos, es decir un total de 60 créditos por curso. El tiempo asignado a un crédito viene de considerar un rango de entre 1500 y 1800 horas de dedicación por curso al aprendizaje. Se ha aceptado, sin embargo, la consideración de un crédito ECTS como 25 horas de trabajo. De éstas, unas 10 corresponderían a actividades lectivas presenciales y el resto a realización por parte del alumno de trabajos, ejercicios, tareas de estudio, etc.

Los créditos deben asignarse no sólo a la asignatura completa, sino también a los distintos bloques en los que se divide e, idealmente, a cada *resultado de aprendizaje*. Este es un concepto clave del EEEES, así como el de *competencia* [2]. Ambos aparecen de forma natural en este nuevo sistema centrado en el aprendizaje en lugar de en la enseñanza. En un sentido amplio, ambos conceptos son productos globales del aprendizaje.

El Marco Europeo de Cualificaciones para el aprendizaje permanente diferencia entre conocimientos, destrezas y competencias, y utiliza la siguiente definición de competencia: “capacidad demostrada de utilizar conocimientos, destrezas y habilidades personales, so-

²Véase la Guía del Usuario del ECTS, publicada por la Comisión Europea: http://ec.europa.eu/education/ects/users-guide/index_en.htm

ciales y metodológicas, en situaciones de trabajo o estudio y en el desarrollo profesional y personal; en el Marco Europeo de Cualificaciones la competencia se describe en términos de responsabilidad y autonomía". En este caso, el término competencia se entiende de un modo más limitado, como la capacidad de transferir los conocimientos a la práctica.

El proyecto Tuning³ distingue claramente entre resultados de aprendizaje y competencias, para diferenciar los diversos roles del profesor y del alumno. Las competencias representan una combinación dinámica de conocimientos, capacidad de comprensión, destrezas, habilidades y actitudes y se establece la distinción entre competencias genéricas y específicas de la disciplina. Desarrollar las competencias es el objetivo de un proceso de aprendizaje y de un programa educativo. Los resultados de aprendizaje expresan el nivel de competencia adquirido por el alumno. Los resultados de aprendizaje son identificados por el profesorado preferentemente a partir de las aportaciones de las partes interesadas internas y externas.

La docencia en el EEEs

El EEEs supone un cambio de filosofía más que una simple reforma de los estudios universitarios. De un modelo tradicional, centrado en la enseñanza, se pasa a otro volcado en el aprendizaje, donde cobra protagonismo el trabajo del alumno y el tiempo que éste tiene que dedicar al estudio, junto con la implantación de sistemas de evaluación que, coherentes con estas ideas, vayan más allá de un único examen final. El proceso formativo debe por tanto centrarse en el aprendizaje, y debe diseñarse en función de las competencias que se adquirirán a lo largo del mismo. El enfoque de la enseñanza sobre las competencias (genéricas y específicas) resulta más flexible, incide en la convergencia entre formación y empleo, y centra la atención en el aprendizaje, enfatizando la importancia de los recursos humanos en el desarrollo económico y social.

La atención que el docente presta al aprendizaje del alumno debe enfocarse, entre otros aspectos, en cómo los alumnos podrán alcanzar los objetivos, destrezas y habilidades previamente fijados. Estas exigencias, que de forma más o menos consciente venían siendo asumidas por el profesorado, deben ser ahora explicitadas, puestas por escrito en cada Guía Docente de las asignaturas que integran la Guía Académica del Grado, Máster o Doctorado correspondiente, de manera que el alumno sepa exactamente qué es lo que se le pide y el tiempo que, por lo general, deberá emplear para conseguirlo.

Lo anterior requiere, evidentemente, un trabajo de preparación previo por parte del profesor, ausente anteriormente, pues las guías tradicionales se limitaban a recoger el programa y una bibliografía relacionada. Ahora, los conocimientos asociados con cada materia han de proporcionar también una serie de habilidades, destrezas y competencias que configurarán al futuro titulado. Por un lado, el profesor en este caso tiene que traducir a créditos ECTS el contenido de su asignatura que en algunos casos puede tratarse de una asignatura nueva y en otros puede ser una transformación de contenidos impartidos en el sistema antiguo. A esta tarea se añade la de contextualizar su asignatura

³<http://www.unideusto.org/tuningeu>

dentro de la propia carrera con el fin de coordinarse con asignaturas que se imparten de forma simultánea (coordinación horizontal) y con aquellas que se han impartido antes o se impartirán después (coordinación vertical). Por otro lado, el profesor debe definir las competencias (genéricas y específicas) que se han de adquirir, desarrollar actividades que permitan alcanzar esas competencias y establecer un modelo de evaluación de las habilidades y conocimientos adquiridos por el alumno.

Este cambio de enfoque en el entendimiento de la enseñanza superior no sólo supone un esfuerzo del estudiante sino que, en contra de lo que pudiera parecer, también lo es para el propio profesor que se ve obligado a adquirir una preparación adecuada para afrontar este reto. En este sentido el docente no sólo debe adaptar la materia al nuevo sistema de educación sino también la metodología docente, incorporando sistemas de valoración personal del alumno de forma continuada, preparación de tutorías y seminarios en los que haya una participación activa del estudiante, preparación de trabajos individuales o en grupo en los que el alumno desarrolle las competencias propuestas, prácticas, etc.

De este modo, el EEES supone una dedicación adicional para el profesor, cuya cuantificación se realiza en términos de las horas presenciales y de una contribución, ponderada por el número de alumnos, que se supone que da cuenta de la evaluación y seguimiento de éstos. Sin embargo, aparte de sus horas presenciales, el profesor debe preparar éstas, lo que en el nuevo marco es una labor continua, ya que no se limita a repetir continuamente sus lecciones magistrales, sino a preparar trabajos individuales y en grupo, hacer el seguimiento personalizado, preparar pruebas de evaluación del grado de adquisición de los resultados de aprendizaje y de las competencias, o la elaboración de prácticas.

Las Universidades Europeas

Las Universidades Europeas son alianzas transnacionales con vocación de convertirse en las universidades del futuro. Entre sus objetivos se encuentra el fomento de los valores y la identidad europeos y la revolución de la calidad y la competitividad de la educación superior en Europa. En este contexto, la Comisión Europea está probando diferentes modelos de cooperación a través de dos convocatorias propuestas en el marco del programa Erasmus+. Los puntos esenciales de estas alianzas son:

- Inclusión de socios de todo tipo de instituciones de educación superior, abarcando un amplio espacio geográfico en Europa.
- Construcción en torno a una estrategia planificada conjuntamente a largo plazo y centrada en la sostenibilidad, la excelencia y los valores europeos.
- Ofrecimiento de planes de estudios centrados en el estudiante e impartidos conjuntamente en campus interuniversitarios en los que los estudiantes puedan desarrollar sus propios programas y experimentar la movilidad en todos los niveles de estudios.
- Adopción de un enfoque basado en retos en donde los estudiantes, el ámbito académico y los socios externos puedan cooperar en equipos interdisciplinares para

hacer frente a los problemas más importantes a los que se enfrenta Europa en la actualidad.

Los resultados de la convocatoria de 2019 se publicaron en junio de 2019. De las 54 candidaturas recibidas, se seleccionaron las primeras 17 alianzas de Universidades Europeas en las que participan 114 instituciones de educación superior de 24 Estados miembros⁴. Los resultados de la convocatoria de 2020 se han publicado también. De las 62 candidaturas recibidas, se han seleccionado 24 nuevas alianzas de Universidades Europeas integradas por 165 instituciones de educación superior de 26 Estados miembros y otros países que participan en el programa Erasmus+. Estas 41 alianzas de Universidades Europeas pondrán a prueba diferentes modelos del concepto de Universidades Europeas y examinarán su potencial para transformar la educación superior. La Iniciativa “Universidades Europeas” se desplegará por completo y se ampliará en el marco del siguiente programa Erasmus 2021-2027.

1.1.3. La Universidad en España

En España, el sistema universitario ha experimentado profundos cambios en los últimos 35 años, impulsados por la aceptación de los retos planteados por la generación y transmisión de los conocimientos científicos y tecnológicos. La Constitución consagró la autonomía de las Universidades y garantizó las libertades de cátedra, de estudio y de investigación, así como la autonomía de gestión y administración de sus propios recursos. Durante este período, las Universidades se triplicaron, creándose centros universitarios en todas las poblaciones importantes, en los que hoy se estudian cientos de titulaciones diferentes. Hace años que terminó el proceso de descentralización universitaria, transfiriéndose a las Administraciones educativas autonómicas las competencias en materia de enseñanza superior.

La Ley Orgánica 6/2001, de 21 de Diciembre, de Universidades (familiarmente conocida como “la LOU”) tuvo el propósito de “impulsar la acción de la Administración General del Estado en la vertebración y cohesión del sistema universitario, de profundizar las competencias de las Comunidades Autónomas en materia de enseñanza superior, de incrementar el grado de autonomía de las Universidades, y de establecer los cauces necesarios para fortalecer las relaciones y vinculaciones recíprocas entre Universidad y sociedad”. Con la LOU “se diseña la moderna arquitectura normativa que reclama el sistema universitario español para mejorar su calidad docente, investigadora y de gestión; fomentar la movilidad de estudiantes y profesores; profundizar en la creación y transmisión del conocimiento como eje de la actividad académica; responder a los retos derivados tanto de la enseñanza superior no presencial a través de las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación como de la formación a lo largo de la vida, e integrarse competitivamente junto a los mejores centros de enseñanza superior en el nuevo espacio universitario europeo que se está comenzado a configurar”.

⁴https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1264

La LOU establece que la Universidad realiza el servicio público de la educación superior mediante la investigación, la docencia y el estudio. Además, determina las siguientes funciones de la propia Universidad al servicio de la sociedad:

- La creación, desarrollo, transmisión y crítica de la ciencia, de la técnica y de la cultura.
- La preparación para el ejercicio de actividades profesionales que exijan la aplicación de conocimientos y métodos científicos y para la creación artística.
- La difusión, la valorización y la transferencia del conocimiento al servicio de la cultura, de la calidad de la vida, y del desarrollo económico.
- La difusión del conocimiento y la cultura a través de la extensión universitaria y la formación a lo largo de toda la vida.

La LOU determina la propia estructura de las universidades públicas que estarán integradas por Facultades, Escuelas Técnicas o Politécnicas Superiores, Escuelas Universitarias o Escuelas Universitarias Politécnicas a las que se le asigna la organización de las enseñanzas y de los procesos académicos, administrativos y de gestión conducentes a la obtención de títulos de carácter oficial y validez en todo el territorio nacional, así como de aquellas otras funciones que determinen los Estatutos. Además, las Universidades también podrán contar con Departamentos encargados de coordinar las enseñanzas de una o varias áreas de conocimiento, de apoyar las actividades e iniciativas docentes e investigadoras del profesorado, y de ejercer aquellas otras funciones que sean determinadas por los Estatutos. Dentro de la estructura de la universidad también se contempla la creación de Institutos Universitarios de Investigación dedicados a la investigación científica y técnica o a la creación artística, de centros o estructuras que organicen enseñanzas en modalidad no presencial y de otros centros o estructuras cuyas actividades de desarrollo de sus fines institucionales no conduzcan a la obtención de títulos incluidos en el Catálogo de Títulos Universitarios Oficiales.

1.1.4. La Universidad de Cantabria

La Universidad de Cantabria en números

La Universidad de Cantabria (UC) cuenta en la actualidad⁵ con 15 centros que imparten un total de 29 Grados oficiales adaptados al EEES más 3 dobles Grados, 41 másteres oficiales y 20 programas de doctorado oficiales. éstos albergan a unos 12000 estudiantes (el 73 % en Grado), atendidos por unos 1600 profesores e investigadores y unos 600 miembros del personal de administración y servicios.

Con su modesto tamaño, la UC ocupa el puesto tercero como Universidad más productiva globalmente en España según el Ranking BBVA/Ivie 2020, ya que ocupa el tercer

⁵https://web.unican.es/unidades/serviciodecomunicacion/Documents/Publicaciones-institucionales-sc/memoria_19_20/MemoriaUC_1920_WEB.pdf



Figura 1.1: Vista panorámica del Campus de Las Llamas de la Universidad de Cantabria, en Santander. Fuente: Adaptada de web.unican.es (Relaciones Internacionales, Galería de Fotos)

puesto en “Rendimiento Docente”, y el cuarto en “Rendimiento Investigador”. A escala mundial se posiciona, según el Ranking Shanghai 2021 por materias (*Global Ranking of Academic Subjects*) entre las mejores 101-150 en Ciencias Atmosféricas; entre las 151-200 mejores en Física; Oceanografía; entre las 201-300 en los ámbitos de Ingeniería Civil; entre las 301-400 en Ciencias Biológicas Humanas; y entre las 401-500 en Ingeniería Química, Economía y Ciencias Biológicas.

Reseña histórica de la Universidad de Cantabria

La Universidad de Cantabria comenzó a fraguarse a principios del siglo XIX, a iniciativa de las entidades locales y provinciales de la región. La Junta de Comercio asumió en 1829 la responsabilidad docente que hasta la fecha ejercía el Consulado del Mar, creando las Escuelas de Comercio y Náutica. Nueve años más tarde, el Ayuntamiento y la Diputación colaboraron para propiciar la creación del Instituto Cántabro de Enseñanza Media, que catalizaría los estudios que posteriormente cuajaron en las Escuelas de Grado Medio. Ya en el siglo XX, diversos centros docentes ascendieron de rango. En 1901 se creó la Escuela de Industrias; la Escuela Normal de Maestros inició su andadura en 1915; y en 1929 se fundó la Escuela de Enfermeras del Hospital Valdecilla. La implantación de nuevos

centros continuó en la década de los cincuenta, periodo en el que Torrelavega acogió la Escuela de Magisterio de los Sagrados Corazones, la Escuela de Facultativos de Minas y Fábricas Minero-Metalúrgicas y Minero-Químicas y, en 1969, la Escuela de Graduado Social, dependiente de la Universidad de Oviedo.

La intervención de los poderes locales fue decisiva en la implantación en Santander de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (1966), una vez que el Ministerio hizo públicos sus planes de expansión de centros universitarios. Tres años más tarde inició su andadura la especialidad de Físicas de la Facultad de Ciencias, dependiente, junto con la Escuela de Caminos, de la Universidad de Valladolid. En 1971, el Ayuntamiento y la Diputación Provincial de Santander adquieren unos terrenos en el polígono de Las Llamas para la creación de un campus de 600.000 metros cuadrados (Figura 1.1). Poco después, el III Plan de Desarrollo Económico Social, aprobado por Ley 22/1972 de 10 de mayo, dispuso el incremento y diversificación de los estudios superiores con la creación de nuevas universidades. El 18 de Agosto de 1972, en virtud del Decreto 2566/1972, de 18 de agosto (BOE de 30 de septiembre), se creó la Universidad de Santander, germen de lo que, trece años más tarde, pasaría a denominarse Universidad de Cantabria.

La Facultad de Medicina, que comenzó a impartir sus primeras clases en 1973, completó el número de centros establecidos por la Ley para la formación del distrito universitario. En este mismo año, se inauguró el edificio de la Facultad de Ciencias y se aprobó la adscripción de las escuelas universitarias de Ingeniería Técnica Industrial, Empresariales, Ingeniería Técnica de Minas y Profesorado de EGB. Durante los años siguientes se configuraron el resto de centros que componen hoy en día la Universidad de Cantabria (Tab. 1.1).

Los estatutos de la Universidad de Cantabria se publicaron en el BOE en 1985. Al tiempo, los departamentos pasaron a convertirse en los órganos básicos para la docencia y la investigación. En 2003 se publicaron en el BOC unos nuevos Estatutos de la Universidad de Cantabria. Dicho texto legal pretendía dotar a la universidad de una herramienta útil para su integración de forma competitiva en el nuevo espacio de educación superior, tras la promulgación de la LOU de 2001. Posteriormente, con objeto de adaptarse a la ley 2/2011 de Economía Sostenible y a la ley 14/2011 de la Ciencia, la Tecnología, y la Innovación en Ciencia, así como a otras normas de rango inferior que desarrollan aspectos relevantes de la vida universitaria, tales como el Real Decreto 1393/2007, 29 de octubre, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales; el Real Decreto 1791/2010, de 30 de diciembre, por el que se aprueba el Estatuto del Estudiante Universitario; y el Real Decreto 99/2011, de 28 de enero, por el que se regulan las enseñanzas oficiales de doctorado; la Universidad de Cantabria elaboró unos nuevos estatutos que fueron aprobados en el Decreto 26/2012 del BOC.

Aparte de los centros docentes, la UC cuenta actualmente con varias fundaciones e institutos para poner la investigación en diversas áreas del conocimiento al servicio de la sociedad. Entre los años 1980 y 1981 se aprobaron los Estatutos y la Carta Fundacional de la Fundación Leonardo Torres Quevedo, una iniciativa de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos para promover la investigación en la misma, siendo reconocida y clasificada por el Ministerio de Educación y Ciencia e inscrita en el

| Centros Universitarios |
|---|
| Campus de las Llamas |
| Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos |
| Facultad de Ciencias |
| Facultad de Filosofía y Letras |
| Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales |
| Facultad de Derecho |
| Facultad de Educación |
| Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación |
| Escuela de Doctorado |
| Campus de Torrelavega |
| Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía |
| Escuela Universitaria de Fisioterapia Gimbernat-Cantabria |
| Otros centros |
| Escuela Técnica Superior de Naútica |
| Escuela Universitaria de Enfermería |
| Escuela Universitaria de Turismo Altamira |
| Facultad de Medicina |
| Centro Internacional de Estudios Superiores del Español |
| Fundaciones e Institutos de Investigación |
| Fundación Leonardo Torres Quevedo |
| Fundación Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria |
| Fundación para el Estudio y la Investigación del Sector Financiero |
| Instituto de Física de Cantabria |
| Instituto de Hidráulica Ambiental “IH Cantabria” |
| Instituto de Biomedicina y Biotecnología de Cantabria |
| Instituto Internacional de Investigaciones Prehistóricas de Cantabria |

Tabla 1.1: Centros, fundaciones e institutos de investigación de la Universidad de Cantabria

Registro Mercantil al año siguiente. En el año 1998 se modifican los estatutos y se incluyen entre sus objetivos el fomento y la promoción de la investigación en la Universidad de Cantabria y la formación de profesionales en las áreas científica y tecnológica.

En 1995 se constituyó el Instituto de Física de Cantabria (IFCA), centro mixto de la Universidad de Cantabria y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

orientado a la investigación de los componentes de la naturaleza, desde las partículas elementales a las estructuras más grandes del Universo, así como el complejo comportamiento colectivo de la materia. Posteriormente el IFCA consolidó una nueva línea de investigación en Meteorología y Minería de Datos la cual conforma, junto con el Grupo de Meteorología y Computación de la Universidad de Cantabria, el Grupo de Meteorología de Santander.

La Fundación UCEIF para el Estudio y la Investigación del Sector Financiero, con el Banco Santander, comienza su andadura en 2006, con la misión de convertirse en un foro pionero y especializado para la generación y difusión del conocimiento, la formación, investigación y desarrollo dentro del ámbito financiero.

La Fundación Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria echa a andar en 2007, constituida por representantes del Gobierno de Cantabria y la Universidad con el propósito de fomentar la investigación básica y aplicada y el desarrollo de estudios, metodologías y herramientas para la gestión integrada de los ecosistemas acuáticos. Para el desarrollo de tales fines, la Fundación Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria y la Universidad de Cantabria crearon ese mismo año el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IH Cantabria), que aspira a ser referente internacional en su ámbito.

También en 2007 comienza a funcionar el Instituto de Biomedicina y Biotecnología de Cantabria (IBBTEC), a raíz de un convenio suscrito entre el Gobierno regional, el CSIC y la Universidad de Cantabria. El IBBTEC constituye el segundo centro mixto del CSIC en Cantabria y se concibe como un centro de investigación de excelencia en las áreas de biomedicina y biotecnología, impulsando la transferencia de resultados y tecnología a la sociedad y el sector productivo.

Estos institutos cuentan con infraestructuras punteras en el ámbito científico, destacando la participación del IFCA en la Red Española de Supercomputación con el supercomputador Altamira y la creación en el Instituto de Hidráulica Ambiental del Gran Tanque de Ingeniería Marítima, que es una Infraestructura Científico- Tecnológica Singular del Gobierno de España.

La Universidad de Cantabria es reconocida (desde 2009) como “Campus de Excelencia Internacional CEI 2009 de ámbito regional” gracias a su proyecto “Cantabria Campus Internacional”, presentado junto con la Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP) con el apoyo de 16 instituciones representativas de la región. La UC fue una de las nueve universidades españolas seleccionadas en esta primera convocatoria del Ministerio de Educación, recibiendo tal calificación por su alto potencial para alcanzar el nivel de excelencia regional una vez se ponga en marcha el proyecto. Cantabria Campus Internacional, con sus seis áreas estratégicas (agua y energía; biomedicina y biotecnología; banca, finanzas y actividades empresariales; patrimonio y lengua; tecnología; y física y matemáticas) constituye un modelo de desarrollo de toda la sociedad cántabra basado en el conocimiento, en la innovación y en la sostenibilidad.

Universidades europeas: la alianza EUNICE

La Universidad de Cantabria fue seleccionada en la segunda convocatoria de “Universidades europeas” de la Comisión Europea, para formar parte del proyecto EUNICE (European University for Customised Education). La alianza está integrada por la Universidad tecnológica de Poznan (Polonia), coordinadora de la iniciativa; la Universidad de Cantabria; la Universidad de Mons (Bélgica); la Universidad politécnica Hauts-de-France (Francia); la Universidad de Vaasa (Finlandia); la Universidad técnica de Brandeburgo (Alemania) y la Universidad de Catania (Italia). Se trata de una alianza entre universidades de tamaño medio con perfiles complementarios, incluyendo miembros de perfil politécnico, de ciencias sociales y humanidades, o generalista, como es el caso de la UC. A través de la “agregación” ascendente de las siete universidades geográficamente equilibradas, EUNICE ofrecerá una educación personalizada, competitiva de clase mundial que satisfaga las necesidades de la sociedad, la vida laboral y el sector industrial e intercultural, pues fortalecerá la identidad europea y promoverá valores europeos comunes a través del interculturalismo, incluido el multilingüismo.

Esta iniciativa tendrá una importancia capital en los años venideros, requiriendo la adaptación de todo el profesorado, personal de administración y servicios y alumnado para acomodar este proyecto europeo que pretende dar forma a las universidades del futuro.

1.1.5. La Facultad de Ciencias

La actual Facultad de Ciencias nació en 1969 en el seno de la Universidad de Valladolid, con la sección de Físicas como especialidad. Tres años después, la Facultad de Ciencias fue el germen de la Universidad de Santander junto a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y la recién creada Facultad de Medicina. En 1977 se implantó la sección de Matemáticas, completándose así la oferta académica a la que los alumnos pueden acceder desde entonces. En todo este tiempo la Facultad se ha ido haciendo con una plantilla altamente competente de profesorado; entre éstos se cuentan académicos, premios de investigación, miembros de comisiones de expertos científicos a nivel internacional y otros profesionales de reconocido prestigio. En definitiva, la Facultad de Ciencias es uno de los centros más antiguos de la Universidad de Cantabria y presenta una inequívoca vocación de futuro.

Estudios en la Facultad de Ciencias

La Facultad de Ciencias de la Universidad de Cantabria imparte tres titulaciones de grado adaptadas al Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) y siete titulaciones de máster oficial. Además se ha diseñado un itinerario de doble grado y se imparte un diploma durante el segundo cuatrimestre. La Facultad está también involucrada, desde el año 2014, en la impartición del programa de doctorado en Ciencia y Tecnología. Este programa procede de dos programas de doctorado con mención de excelencia. La Tab. 1.2 resume la oferta académica ofrecida por la Facultad.

| Grado |
|--|
| Grado en Física |
| Grado en Matemáticas |
| Grado en Ingeniería Informática |
| Doble Grado en Física y Matemáticas |
| International Diploma in Physics |
| Máster |
| Máster Universitario en Data Science |
| Máster Universitario en Ciencia e Ingeniería de la Luz |
| Máster Universitario en Física de Partículas y del Cosmos |
| Máster en Ingeniería Informática |
| Máster en Matemáticas y Computación |
| Máster Universitario en Nuevos Materiales |
| Máster Universitario en Química Teórica y Modelización Computacional |
| Doctorado |
| Doctorando en Ciencia y Tecnología |

Tabla 1.2: Estudios de grado, máster y doctorado impartidos en la facultad de ciencias de la Universidad de Cantabria

Estructura departamental de la Facultad de Ciencias

La Facultad de Ciencias está organizada internamente en Departamentos. La Tab. 1.3 refleja los departamentos por áreas temáticas. Las actividades docentes en la Facultad tienen participación también de profesorado de Departamentos de otros centros de la Universidad. También es preciso mencionar al Instituto de Física de Cantabria (IFCA), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y la Universidad de Cantabria. Muchos de los miembros del IFCA forman parte de la Facultad de Ciencias y contribuyen a las tareas docentes propias de ella.

1.2. Docencia: criterios pedagógicos y metodológicos

El compromiso de la Universidad con sus alumnos es el de proporcionarles una formación adecuada para que éstos puedan ejercer posteriormente, de forma responsable y eficaz, la labor profesional a la que accedan gracias a sus estudios. Este compromiso, especialmente en el caso de las titulaciones técnicas y científicas, no supone proporcionar un gran número de conocimientos altamente especializados, sino una formación general, amplia y rigurosa de todas las ciencias básicas que constituyen el armazón de la disciplina

| Física |
|---|
| Departamento de Física Moderna |
| Departamento de Física Aplicada |
| Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada |
| Matemáticas |
| Departamento de Matemáticas, Estadística y Computación |
| Ingeniería Informática |
| Departamento de Ingeniería Informática y Electrónica |

Tabla 1.3: Departamentos de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Cantabria

en cuestión. El objetivo principal de la labor docente debe ser formar al alumno en la materia correspondiente, con especial énfasis en el desarrollo de su capacidad y criterio personal, de manera que puedan aplicar los conocimientos básicos adquiridos en la solución de problemas técnicos y científicos y afrontar los nuevos cambios con total garantía. No es el contenido informativo de las teorías, sino la formación de un hábito reflexivo, lo que produce en definitiva una cultura científica.

La labor docente debe conseguir unos resultados a través de una adecuada planificación del curso, que ha de tener en cuenta el contenido de las materias a impartir (programa), los medios de los que se dispone y las actividades docentes a realizar. Existen una serie de objetivos generales que se pretenden alcanzar con la labor docente de una ciencia experimental, entre los que cabe destacar los siguientes [3]:

1. Conseguir la transmisión de conocimientos, técnicas y valores de una generación a otra, incorporando progresivamente aquellos avances y mejoras que se descubran, siempre con la finalidad de obtener una sociedad más justa e igualitaria en el sentido más amplio de progreso social.
2. Facilitar la asimilación del método científico como procedimiento de abordar problemas y proyectos.
3. Compaginar la visión científica (teórica) con la tecnológica (práctica), favoreciendo la interconexión de los conocimientos, procedimientos y técnicas básicas y su universalización.
4. Aproximar al estudiante a la realidad de la empresa, industria, etc., integrándolo en la realidad socio-económica más próxima.
5. Obtener y utilizar la información del área de conocimiento correspondiente, o de aquéllas relacionadas con la misma, de forma autónoma y crítica. Conocer la forma y los procedimientos de acceso a la información.

6. Poseer autonomía para plantear cuestiones, elaborando y desarrollando estrategias de identificación de problemas, proponiendo alternativas y evaluando su actuación en la resolución de problemas, siguiendo un proceso de razonamiento lógico.
7. Analizar, discutir y emitir valoraciones sobre el trabajo propio y ajeno.

Siempre se tendrá en cuenta que además de las enseñanzas impartidas en un área concreta, se debe impartir de algún modo el camino de entendimiento que les capacite para el desarrollo de dichos conocimientos en un mundo interdisciplinar.

Las etapas en que se estructura el método didáctico son tres:

1. Planificación de las enseñanzas a impartir o planificación docente.
2. Comunicación de los conocimientos o práctica docente.
3. Valoración del nivel de preparación alcanzado por el alumno y valoración de la labor docente, o evaluación.

1.2.1. Planificación y preparación docente

La selección del contenido que va a tener una asignatura es donde comienza la labor del profesor, que junto con la habilidad docente para transmitir esos conocimientos y la capacidad para estimular el interés de los alumnos, constituyen las piezas claves del proceso formativo.

Es evidente que para planificar con éxito la asignatura y, por tanto, elaborar un programa docente realista y equilibrado, es necesario elegir los conocimientos que se van a impartir y ordenarlos de manera lógica en función de los objetivos propuestos y el tiempo disponible. Ello exige un perfecto conocimiento de las materias que integran la disciplina y un amplio panorama del contexto en el que se engloba. Sólo de esta forma puede distinguirse entre lo fundamental y lo secundario, y así poder proporcionar una visión lo más completa posible de la asignatura en el tiempo, normalmente insuficiente para un desarrollo amplio, del que se dispone. Esta limitación temporal es inevitable; por ello, debe evitarse un enfoque excesivamente aislado de los temas, centrándose en métodos y aspectos comunes y en la relación existente con otras disciplinas. Esto permitirá al alumno profundizar por su cuenta en aquellos temas de su interés.

Otro aspecto fundamental a analizar a la hora de establecer los objetivos que se desea lograr en el desarrollo de una asignatura es la situación de ésta en el contexto global de la carrera. Se trata de tener en cuenta la formación previa del alumno y la que pueda adquirir en cursos posteriores; de esta manera se facilitará el aprendizaje, a la vez que lo aprendido se convertirá en una base sólida para la comprensión de nuevos conceptos en otros cursos.

1.2.2. Práctica docente

La etapa de comunicación de los conocimientos representa la etapa más atrayente en la actividad docente. En esta etapa se pretende no sólo enseñar los fundamentos y métodos característicos de la disciplina, sino también procurar que el alumno los utilice, ayudándole a descubrir y plantear sus problemas, a diseñar experimentos, a encontrar respuestas aportando datos, dando pistas, etc., y también a alcanzar cada vez mayor rigor y a realizar su trabajo de forma sistemática.

La tradicional división entre clases teóricas y clases prácticas, y dentro de estas últimas, sus variantes de laboratorio, problemas y seminario, obedecen, probablemente, más a la forma que al fondo. Unas y otras tienen la misma misión, conseguir la comunicación de unos mismos conocimientos, diferenciándose fundamentalmente en la forma en que éstos se transmiten. Si estas clases se imparten por distintos profesores y si, además, su contenido no responde a la necesaria unidad, se pueden provocar unas divisiones carentes de fundamento.

Clases teóricas

Las clases de teoría o clases magistrales son el núcleo fundamental de desarrollo del programa de la asignatura. Es la forma más tradicional de enseñanza universitaria. Su origen reside en las épocas en que la comunicación verbal era claramente más asequible que la comunicación escrita, pero ha conservado su preponderancia porque además permite una flexibilización en el contenido, tanto extensivo como intensivo, incorporando el diálogo de profesores y alumnos. Aunque el método presenta ventajas que hacen difícil prescindir de él, ha sido también ampliamente criticado. Estudios recientes muestran que inmediatamente después de una clase los alumnos recuerdan el 70 % de la información presentada en los diez primeros minutos y sólo el 20 % de lo expuesto en los diez últimos minutos.

Para impartir las clases teóricas, pueden tomarse como base las directrices dadas por el Instituto de Ciencias de la Educación (ICE) de la Universidad Politécnica de Madrid para el perfil de una lección ideal, que se expone a continuación:

Motivación

1. Motivar antes y durante la clase para que el alumno se interese por la asignatura. Esto requiere:
 - Que el profesor muestre entusiasmo por la asignatura.
 - Que el profesor demuestre seguridad científica.
2. Conectar con la realidad. El profesor debe mostrar los aspectos reales del tema, así como las consecuencias prácticas. Para ello es necesario: centrar el tema con un ligero bosquejo histórico, citar las tecnologías en que será útil, explicar las consecuencias prácticas, citar ejemplos de aplicación, etc.

Aspectos del contenido

1. Introducción al tema. Presentación de los objetivos y contenidos de la lección. Esto requiere:
 - Resumir los objetivos didácticos.
 - Anunciar el desarrollo del tema.
 - Resumir los conocimientos previos que se necesitan.
2. Ordenación del tema. El desarrollo ordenado y sistemático del tema precisa:
 - Presentar un resumen del tema por escrito.
 - Evitar saltos hacia atrás o laterales en la explicación.
 - Reforzar los conceptos básicos cuando aparezcan.
3. Síntesis y/o recapitulaciones. Esfuerzo para que el alumno consolide los conocimientos adquiridos y los integre. Para ello es necesario:
 - Repetir los puntos fundamentales del tema.
 - Establecer lazos con las partes pasadas y futuras de la asignatura.

Aspectos formales de la comunicación

1. Claridad de expresión. Habilidad para transmitir el mensaje didáctico mediante:
 - Utilización correcta del lenguaje.
 - Buena dicción.
 - Uso de pausas.
 - Uso de gestos, etc.
2. Recursos didácticos. Uso de toda clase de medios físicos para reforzar y/o aclarar el mensaje. Esto requiere:
 - Uso de medios audiovisuales.
 - Reparto de documentación complementaria.
 - Dibujo directo de esquemas, ejemplos,...

Organización y animación de la clase

1. Participación de los alumnos en la construcción de los conceptos y petición por su parte de las aclaraciones oportunas. Ello conlleva:
 - Información previa a los alumnos de que sus intervenciones serán bien acogidas.
 - Realización de preguntas adecuadas.

- Refuerzo y ponderación de todas las contestaciones acertadas.
- Explicación afable de las contestaciones no acertadas.

Control

1. Control permanente del grado de atención y asimilación del alumno. Para ello se necesita:

- Vigilancia del grado de atención de los alumnos a través de sus gestos.
- Atención a las condiciones de los alumnos.
- Realización de preguntas tipo test.
- Utilización de técnicas objetivas de control.

Clases de problemas

Las clases de problemas cumplirán con la función de complementar las clases de teoría y hacer más fácil su comprensión, así como de captar los puntos del mecanismo de razonamiento de la materia que causan más dificultades de comprensión a los alumnos. Por ello, es fundamental simultanear las clases de teoría con las correspondientes de problemas que ayuden a fijar los conocimientos adquiridos.

Las cuestiones o problemas propuestos se deben seleccionar cuidadosamente, para que posean dos características fundamentales: en primer lugar han de servir para aplicar los conocimientos desarrollados en las clases teóricas precedentes, y en este sentido será necesario para su resolución utilizar las gráficas, tablas etc. que se hayan estudiado con anterioridad; en segundo lugar, deben reflejar situaciones reales siempre que sea posible, lo que llevará consigo la discusión de los resultados obtenidos, y en ocasiones comentarios sobre el procedimiento de resolución que se haya seguido.

Respecto a la resolución de problemas en clase, debe seguirse un esquema lógico: plantear el problema, esquema de resolución más adecuado, discusión de los resultados obtenidos y su aplicación a la realidad. No es conveniente que el profesor resuelva siempre los problemas íntegramente en la pizarra sin la participación del alumno. Resulta más adecuado que el estudiante resuelva los problemas después de que el profesor haya esbozado someramente el método para su resolución. Así, la clase de problemas supone una participación activa del alumno en la discusión de las dudas que hayan podido presentarse. Para conseguir esto, hay que distribuir los enunciados con suficiente antelación para que los alumnos puedan resolverlos. También se puede establecer algún incentivo, como tener en cuenta en la evaluación global el hecho de que los alumnos entreguen los problemas previamente resueltos, o incluso, si la colección de problemas fuese lo suficientemente grande, indicarles que algún problema semejante a los que se les ha repartido, formará parte de la evaluación escrita.

Seminarios

Cuando es posible trabajar con grupos reducidos de alumnos, se puede recurrir a las clases de seminario, que deben ser lo suficientemente flexibles para que, en primer lugar, subsanen las deficiencias que se detecten en las clases teóricas y de problemas. En estas últimas, donde el alumno toma contacto por primera vez con muchos temas, es muy difícil que pueda establecerse un diálogo fructífero o una captación satisfactoria de las enseñanzas. Además y de acuerdo con el plan seguido, existirán algunos aspectos, o conocimientos, cuyas características peculiares no aconsejen abordarlos en las clases teóricas.

Además de estos objetivos de reforzar los conocimientos de base del alumno, que le faciliten el normal aprendizaje de las asignaturas, los seminarios pueden cubrir un segundo objetivo, el de ampliar los conocimientos impartidos en las clases de teoría. En este sentido, los seminarios proporcionan una buena ocasión para incidir en la importancia de la consulta de fuentes bibliográficas, introduciendo al alumno en el uso y manejo de redes automatizadas.

Prácticas en el laboratorio o en el aula de informática

El aprendizaje de materias tecnológicas y de carácter aplicado exige la experiencia directa con sistemas y elementos reales, que permita la comprensión práctica de los conocimientos adquiridos en las clases de teoría y problemas y la aplicación de los mismos a la resolución de problemas reales. La práctica desarrolla la capacidad de observación y toma de decisiones y asegura el contacto con la realidad profesional. Muchos de estos objetivos pueden conseguirse también a través del uso de ordenadores, bien para elaborar prácticas que requieran cálculos complejos, o bien para utilizar simuladores que permitan profundizar en los conceptos explicados en las clases de teoría.

El objetivo de las clases prácticas en laboratorio puede concretarse en dos puntos:

1. Las prácticas deben mostrar cómo los principios tratados en las clases teóricas y de problemas se aplican al diseño, realización y comprobación del sistema físico y/o su modelo informático. Deben realizarse experiencias concretas que ayuden a los estudiantes a comprender los conceptos abstractos. Estas experiencias son esenciales para agudizar la intuición de los alumnos en temas prácticos, y para poner de relieve el esfuerzo intelectual necesario para la construcción de modelos analíticos de sistemas reales.
2. Deben destacar el desarrollo de las actividades específicamente proyectuales y en la utilización de metodologías generales, evitando una concreción excesiva provocada por la tipología concreta del problema.

La temática de las prácticas debe basarse en los conceptos que están siendo estudiados en teoría en cada momento. Así, el alumno podrá aplicar los conocimientos recién adquiridos, obteniendo el mayor aprovechamiento posible. Para conseguir un máximo aprovechamiento de este tipo de enseñanza es conveniente que los trabajos se efectúen en grupos

reducidos. La realización de unas prácticas útiles y sugestivas es un elemento motivador, que crea en el alumno interés, incluso la necesidad de adquirir la teoría correspondiente.

Un desarrollo correcto de las sesiones prácticas debe seguir los pasos que se enumeran a continuación:

1. Especificar los objetivos de la práctica.
2. Descripción del material a utilizar.
3. Descripción del trabajo a desarrollar.
4. Desarrollo de la actividad propuesta.
5. Indicaciones sobre la redacción de la memoria de la práctica y los resultados a presentar.

Acceso a las nuevas tecnologías y Aula Virtual

La integración de las redes telemáticas en la educación ha provocado, en pocos años, importantes modificaciones en la naturaleza y procesos de enseñanza, en las formas y sistemas de comunicación y relación entre alumnos y profesores, así como en las modalidades educativas que se ofertan desde las universidades [4–6]. En este marco cobra sentido la necesidad de organizar institucionalmente un nuevo espacio para la docencia apoyado en el uso de las redes de comunicación digitales. Este nuevo escenario para la docencia distribuida a través de Internet se conoce como Campus Virtual. Un campus virtual, en consecuencia, es la respuesta universitaria al reto de integrar las nuevas tecnologías con la finalidad de extender la oferta docente a nuevos colectivos de ciudadanos para que cursen los estudios a distancia, a la vez, que puede servir para innovar y mejorar los métodos tradicionales de enseñanza en la universidad.

Internet permite el desarrollo de variadas actividades de enseñanza utilizando los recursos telemáticos (WWW, e-mail, chat, videoconferencia, ...). Cuando estas acciones educativas están organizadas institucionalmente por una universidad y distribuidas a través de redes de ordenadores podemos hablar de un *campus virtual*. Un campus virtual, en consecuencia, se podría definir como un espacio formativo ofrecido por una institución universitaria que se desarrolla a través de redes digitales.

Este espacio educativo virtual puede servir para el desarrollo de dos grandes funciones pedagógicas [7]:

1. La red como apoyo a la docencia presencial. El campus virtual puede ofrecer, a través de la red, materiales y recursos didácticos de apoyo a la docencia universitaria presencial. Esta función sirve para facilitar la integración y uso de las nuevas tecnologías (multimedia, tutoriales web, chats educativos, videoconferencia, ...), en las clases convencionales de modo que se complementen las actividades formativas presenciales con otras realizadas en la red. La existencia de un 'campus virtual' en las

universidades convencionales hace posible que el profesorado pueda diseñar y publicar sus materiales didácticos de estudio de la asignatura, que permita la realización de actividades en la red como debates telemáticos entre el alumnado; las consultas y tutorías electrónicas. En consecuencia un 'campus virtual' debe entenderse, al menos en las universidades convencionales, como complemento de su actividad y organización docente.

2. La red como escenario para la educación a distancia. El campus virtual también puede servir para ofrecer una modalidad de enseñanza a distancia o teleformación de los estudios universitarios (tanto los de las titulaciones de primer y segundo ciclo, como de cursos de postgrado) a través de las redes digitales. Con ello se persigue extender la oferta de enseñanza superior a más grupos de ciudadanos de los que actualmente cursan sus estudios en las aulas convencionales de cada universidad. Esta segunda modalidad o función del campus virtual abre la posibilidad de cursar los estudios de enseñanza superior desde su hogar o lugar de trabajo a aquellos colectivos sociales que por motivos de edad, situación profesional o residencia no acuden a las aulas.

Un aula virtual es un entorno, plataforma o software a través del cual el ordenador simula una clase real permitiendo el desarrollo de las actividades de enseñanza y aprendizaje habituales. Como afirma Turoff [8] una '*clase virtual es un entorno de enseñanza y aprendizaje inserto en un sistema de comunicación mediado por ordenador*'. A través de ese entorno el alumno puede acceder y desarrollar una serie de acciones que son las propias de un proceso de enseñanza presencial como conversar, leer documentos, realizar ejercicios, formular preguntas al docente, trabajar en equipo, etc. Todo ello de forma simulada sin que medie una interacción física entre docentes y discentes. En estos momentos existen en el mercado numeroso software que permite la creación de cursos a distancia simulando aulas virtuales como por ejemplo Learning Space, WebCT, eCollege, Aula Virtual, Moodle, etc.

En consecuencia, la creación, mantenimiento y desarrollo de programas y cursos ofrecidos virtualmente debe ser planteado como una estrategia de mejora educativa que movilice distintos recursos técnicos y humanos de cara a ampliar el número de estudiantes de dicha universidad, así como para que su profesorado se implique en procesos de innovación de los métodos de enseñanza que utiliza.

Tutorías

El sistema tutorial, introducido inicialmente en las universidades británicas, se basa en la asistencia individualizada que un profesor, denominado tutor, presta a un alumno o pequeño grupo de alumnos que le han sido asignados. Las tutorías ejercidas sobre los alumnos tienen una significación bien distinta a la del sistema tutorial inglés, puesto que en la práctica se reducen a proporcionar al estudiante una información general, si es que éste lo requiere, y ayudar a la resolución de sus dudas o cuestiones sobre la asignatura, que es el caso que más frecuentemente se demanda. En este sentido, es más importante

potenciar la autonomía de los razonamientos del alumno que ofrecer soluciones inmediatas a las dificultades que se plantea en su proceso de aprendizaje. Por ello, situar y fundamentar la dificultad de adquisición de datos y conocimientos científico-técnicos, es uno de los objetivos prioritarios para las tutorías.

Otras actividades

La organización de conferencias y debates impartidas por profesionales de ejercicio libre, expertos o profesores e investigadores de otros centros suele resultar muy interesante de cara al alumnado, ya que le permite tener una visión general de otros posibles planteamientos y alternativas, de problemáticas científicas y casos reales, etc. Igualmente le permite no atenerse únicamente al temario concreto de la asignatura. Adicionalmente, presenta la posibilidad de abrir contactos iniciales con investigadores, empresas y centros que trabajen sobre temas en los que el alumno tenga especial interés.

Existen además nuevos conceptos pedagógicos como el “Flipped Classroom” o clase invertida [9] en el que la fase de transmisión de conocimientos, tradicionalmente centrada en la clase magistral, es trasladada al espacio de trabajo personal del estudiante, siendo sustituida por actividades que fomentan el refuerzo del aprendizaje y la adquisición de competencias. La aplicación de este método conlleva normalmente la ampliación de los recursos educativos ofrecidos al estudiante en forma de vídeos, textos adicionales, artículos de investigación, etc., de modo que se facilite el proceso de adquisición del conocimiento. De la misma forma, el método requiere también el diseño de una actividad presencial que desarrolle los conocimientos adquiridos por los estudiantes. Algunas opciones típicas tienen que ver con el planteamiento de actividades en equipo, o con la aplicación de conceptos de “gamificación” en la que los alumnos participan en juegos en los que necesariamente han de aplicar los conocimientos adquiridos.

Los conceptos anteriores pueden beneficiarse también de herramientas online que facilitan la creación de cuestionarios en tiempo real, participación en equipo, o incluso plataformas que permiten realizar actividades de competencia lúdica entre los estudiantes. Algunos de los más populares son: Kahoot, Quizzit o Space Race.

Trabajos de fin de grado

Para la obtención del título en las carreras técnicas, el alumno debe realizar un trabajo supervisado por un profesor de la Escuela, en la Universidad o en una institución pública o privada. La realización del Trabajo de Fin de Grado (TFG) permite al alumno profundizar en la metodología y morfología proyectuales a la vez que desarrolla un tema de su interés. Entre las opciones destacan trabajos originales de investigación científica, que serán algo más ambiciosos que un problema extenso, ya que exigirá una capacidad de análisis y síntesis mayor que la resolución de un simple problema. El alumno necesitará buscar datos, tendrá que tomar decisiones, relacionar varias asignaturas, diseñar elementos auxiliares, etc. El uso del ordenador, tanto para situaciones de diseño de operaciones mediante simuladores, como a la hora de realizar una optimización económica

del proyecto, es altamente recomendado. Esta actividad, además de permitir contrastar lo aprendido con la realidad práctica, ejercita al máximo la capacidad creadora del alumno y constituye una fuente de temas de interés para el profesor.

Estudios de Máster

El Espacio Europeo de Educación Superior establece los estudios de Máster como el primer nivel de especialización tras el desarrollo de los estudios de grado. Los estudios de Máster en España vienen regulados por el Real Decreto 1393/2007 por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales. La tipología de actividades docentes desplazadas en los estudios de Máster está contenida en el documento de “Manual de procedimiento para la emisión del informe de evaluación de las solicitudes de implantación de títulos oficiales de posgrado” elaborado por la ANECA, agrupando las actividades en dos grandes grupos: presenciales y no presenciales. Las primeras incluyen clases teóricas y seminarios, clases prácticas y actividades de dirección, seguimiento y evaluación: prácticas externas (en instituciones o empresas), tutorías o sesiones de evaluación. Las segundas a su vez incluyen el trabajo autónomo y el trabajo en grupo. Los estudios de Máster culminan con un Trabajo de Fin de Máster (TFM), que consistirá en la realización por parte del estudiante de un trabajo original, autónomo y personal, bajo la orientación de un profesor, en el que se apliquen y desarrolle los conocimientos y capacidades adquiridos a lo largo de la titulación, demostrando que ha alcanzado las competencias previstas en el plan de estudios.

Estudios de doctorado

Además de la docencia en el grado, dentro de la labor del profesor universitario se incluye la formación de doctores y especialistas en distintas materias. Para la obtención del título de Doctor es necesario superar las pruebas de un programa de doctorado, que consisten en una serie de cursos de doctorado y la presentación de un trabajo original como tesis doctoral. Los estudios de doctorado quedan regulados por el real decreto 98/2011 y por su última modificación 195/2016. Los programas de doctorado incluyen aspectos organizados de formación investigadora que no requieren estructuración en créditos ECTS y comprenden tanto formación transversal como específica del ámbito de cada programa, si bien en todo caso la actividad esencial del doctorando es la investigadora. Los estudios de doctorado deben garantizar la adquisición de las siguientes competencias básicas:

- Comprensión sistemática de un campo de estudio y dominio de las habilidades y métodos de investigación relacionados con dicho campo.
- Capacidad de concebir, diseñar o crear, poner en práctica y adoptar un proceso sustancial de investigación o creación.
- Capacidad para contribuir a la ampliación de las fronteras del conocimiento a través de una investigación original.

- Capacidad de realizar un análisis crítico y de evaluación y síntesis de ideas nuevas y complejas.
- Capacidad de comunicación con la comunidad académica y científica y con la sociedad en general acerca de sus ámbitos de conocimiento en los modos e idiomas de uso habitual en su comunidad científica internacional.
- Capacidad de fomentar, en contextos académicos y profesionales, el avance científico, tecnológico, social, artístico o cultural dentro de una sociedad basada en el conocimiento

La actividad docente en el caso de los programas de doctorado se condensa en la figura del director de la tesis doctoral, que será el máximo responsable de la coherencia e idoneidad de las actividades de formación, del impacto y novedad en su campo de la temática de la tesis doctoral y de la guía en la planificación y su adecuación, en su caso, a la de otros proyectos y actividades donde se inscriba el doctorando.

1.2.3. Evaluación de la docencia

Evaluación del aprendizaje del alumno

Dado que el objetivo final de la enseñanza universitaria es la formación de profesionales capacitados para desarrollar una actividad profesional, es lógico que la sociedad exija que esos futuros profesionales estén capacitados para desempeñar ese trabajo. Por ello será necesario un procedimiento de valoración para conocer si han alcanzado el grado de capacitación adecuado.

La evaluación continuada, las pruebas, ejercicios o exámenes, constituyen los instrumentos que se utilizan en esta fase de valoración y que, manejados con habilidad, potencian la asimilación y fijación de las enseñanzas impartidas. Aunque existan muchos modos eficaces de utilizarlas, es difícil encontrar alguno que satisfaga todos los requisitos que, en principio, serían deseables, sobre todo cuando los cursos son numerosos y el tiempo de corrección limitado.

En cualquier caso, el criterio de valoración debe conseguir una preponderancia de los aspectos positivos sobre los negativos. Entre los primeros pueden enumerarse los siguientes como más importantes:

- Ayudar al alumno a realizar su trabajo personal, siempre que las orientaciones de las clases se reflejen en las pruebas o controles que se realicen. Así, si en unas se consideran inútiles los esfuerzos memorísticos, en las otras no deben formularse aquellas cuestiones que los requieran. Si se insiste en la necesidad de un trabajo continuado, deben arbitrarse los medios que lo pongan de manifiesto. Por la misma razón, deben recibir una atención especial aquellos temas o conceptos que se hayan señalado como fundamentales, aunque sin olvidar los restantes. En caso contrario, se

corre el peligro de desdibujar la formación del alumno, fomentando la preparación exclusivamente con vistas a lograr la superación de un examen, en lugar de un aprendizaje gradual y continuado.

- Sirven tanto al profesor como al alumno, para conocer los puntos o facetas que no han sido convenientemente asimilados y que por lo tanto, deben ser analizados o estudiados de nuevo.
- Además, los ejercicios deben ser consecuentes con el contenido y nivel de las explicaciones recibidas, evitando que su preparación o realización vaya en detrimento de ésta o de otras enseñanzas.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, parece inaceptable basar un método de valoración en un sólo examen de final de curso, cuya validez, incluso como termómetro de la materia asimilada, puede ser cuestionable. Las bases en las que asentar la valoración de conocimientos, en su doble finalidad de instrumento de medida y aprendizaje, podrían ser las siguientes:

- Resolución de problemas semanalmente en horas no lectivas, de modo que el alumno disponga de las fuentes de información, consultas y tiempo que estime necesario. Si bien puede parecer que este tipo de prueba no aporta un dato fidedigno, puesto que en principio se presta a que tan sólo una parte de los alumnos resuelvan las cuestiones y el resto se limite a transcribirlas con su nombre, la experiencia ha demostrado que después de los primeros ejercicios, tan sólo aquellos que los resuelven, los presentan, mientras que los que en principio los transcribían, abandonan esta postura por considerarla inútil. Es indudable que esta prueba, por sí sola, es insuficiente para valorar al alumno, puesto que si éste conociera que es el único criterio de calificación, sacrificaría el esfuerzo personal en aras de una futura calificación. La finalidad positiva de este tipo de pruebas es que obligan al alumno, que cursa normalmente la disciplina, a un esfuerzo continuado, consciente de que su trabajo es valorado por el profesor.
- Discusión individual en clase de laboratorio. La realización de las prácticas, sobre todo si es posterior y acorde con las enseñanzas teóricas, permite, mediante preguntas adecuadas, conocer el esfuerzo realizado y la asimilación conseguida. Como parte positiva destaca la motivación del alumno para estudiar continuamente la teoría, y la oportunidad de enfocar adecuadamente su estudio, corrigiendo aquellos conceptos equivocados. El profesor debe hacer que el alumno conozca una técnica, sus aplicaciones y sus limitaciones.
- La formulación de cuestiones en clases de teoría, problemas o seminarios, impide valorar el nivel de cada alumno, si la clase como normalmente ocurre, es numerosa. Sin embargo, el profesor puede sacar conclusiones importantes sobre el grado de asimilación y sobre el modo en que se siguen sus enseñanzas.
- Realización de ejercicios o exámenes periódicos. El número de pruebas a realizar está sujeto a muchos condicionantes, pero puede considerarse como razonable una

cada dos meses. Se considera totalmente necesario que el planteamiento de estos ejercicios vaya encaminado a desterrar los esfuerzos de última hora, que además de su poca utilidad, implican una discontinuidad en el trabajo del alumno. Para ello, las preguntas formuladas serán concretas, abarcarán siempre la totalidad de materia y versarán sobre aplicaciones conceptuales, unas cualitativas y otras cuantitativas, aspectos críticos y comparativos. Una vez corregido un ejercicio, conviene dedicar una clase a su comentario, resaltando los errores más importantes y explicando detalladamente el significado y solución de cada una de las cuestiones. La información conseguida sobre los conocimientos adquiridos y la formación alcanzada, por cada uno de los alumnos, debe ser analizada y, posteriormente, traducida en la calificación final.

Evaluación del profesor por parte del alumno

La valoración por parte de los alumnos de la calidad de la enseñanza recibida es fundamental para que el profesor obtenga conclusiones sobre la marcha del curso. Esta información le permitirá revisar y reelaborar el programa de contenidos de acuerdo con las modificaciones necesarias para mejorar los resultados. Es fundamental que el profesor recabe el máximo de información sin temor a críticas, ya que de esta forma logrará corregir posibles errores en su planteamiento.

Esto puede abordarse en los cursos no muy numerosos a través del diálogo directo. Por razones obvias, en los cursos con mayor número de alumnos este diálogo se ve muy dificultado, por lo que la utilización de encuestas es recomendable, dado que éstas suministran una información objetiva y son libres dado su carácter anónimo.

El contenido de la encuesta debe centrarse en tres aspectos:

- Comportamiento personal, que se puede enfocar en preguntas sobre la actitud, accesibilidad, trato, puntualidad, etc., del profesor.
- Planificación docente, que se puede enfocar con preguntas sobre dificultades de comprensión, orden en la exposición, etc.
- Calidad e interés de la materia, que se puede enfocar con preguntas sobre la relación con otras asignaturas, etc.

La evaluación de estas encuestas debe fortalecer la reflexión sobre las actividades docentes y estar integrada en los mecanismos de control sobre la actividad del profesorado de cada Universidad.

1.2.4. Recursos didácticos y tecnológicos para la docencia

La mayoría de los profesores proporcionan a sus alumnos una lista de libros que pueden servir como base del aprendizaje o bien como apoyo. El profesorado que quiera mejorar

su actividad docente tiene a su disposición, además de los recursos clásicos de la docencia universitaria, una serie de recursos tecnológicos audiovisuales e informáticos que le permitirán realizar innovaciones para incrementar el interés y la motivación del alumnado.

El profesor que escoge la presentación o clase magistral, dispone, además de los libros de texto y de consulta, de una serie de recursos que le ayudarán en su tarea. A continuación se presentan los recursos didácticos y tecnológicos.

Libros

Prácticamente todos los profesores están de acuerdo en que, al comienzo del curso, debe proporcionarse al alumno bibliografía completa y actualizada sobre la materia a tratar lo más adecuada posible. La bibliografía a presentar en el programa de la asignatura debe contener los libros que sean realmente un recurso didáctico para el alumno, y asegurarse de la disponibilidad de estos libros en las bibliotecas y librerías. Un ejemplo de bibliografía útil para el alumno sería aquella que incluyera lo siguiente:

- Referencias fundamentales: son los libros de lecturas necesarias y que podrían considerarse como los libros de texto del curso. Hay que procurar no especificar un único libro de texto, para que el alumno no dependa de un solo documento o autor. Asimismo, puede ser conveniente preparar dos o tres referencias fundamentales para cada capítulo o tema, para que el alumno haga un mejor uso de la bibliografía. Otra condición indispensable para sugerir un libro como referencia fundamental es que este sea de fácil acceso (en la biblioteca y en librerías conocidas). También conviene que la lista de referencias no sea muy extensa, para facilitar al alumno el acceso a la información fundamental. Además de libros de texto, sería muy conveniente para la mayoría de las asignaturas de física, el proporcionar una colección de problemas, global o por capítulos y de antemano, a fin de que el alumno pueda ir resolviéndolos y trabajando en la materia.
- Referencias básicas: incluirían las referencias necesarias para una formación completa en la materia, dentro de la línea o con la interpretación que el profesor considere adecuada. Estaría dirigida a alumnos que quisieran tener una visión completa de la asignatura.
- Referencias complementarias y de ampliación: aquí se puede incluir una extensa lista de libros, artículos y material escrito que puedan aportar informaciones relevantes en el ámbito de la asignatura o de algún tema concreto tratado, y que permitan al alumno profundizar más en la materia.

Recursos de soporte a la presentación oral

La pizarra

La pizarra es el elemento soporte más utilizado para el desarrollo normal de las clases. Aunque tanto profesores como alumnos están muy habituados al uso de la pizarra, es

importante hacer un uso correcto de ella. A continuación se presentan una serie de consejos prácticos para la utilización de la pizarra como soporte docente. Algunos consejos para la buena utilización de la pizarra son:

- Escribir al lado de la pizarra al principio de clase un índice esquemático con los contenidos de la clase.
- Escribir siempre en la pizarra las palabras de grafía desconocida o que tengan que ser recordadas por los alumnos: términos científicos, referencias, expresiones numéricas, fórmulas, etc.
- Evitar textos largos.
- Distribuir el espacio físico de la pizarra convenientemente.
- Utilizar el color con moderación, y con alguna clave sencilla (por ejemplo, conceptos en blanco, ejemplos en azul, observaciones en verde, ...).
- Cuando sea importante que los alumnos conserven por escrito y con fidelidad la información de la pizarra, conviene repartirla por escrito.

Presentaciones con ordenador

El ordenador puede ser utilizado durante las clases don dos finalidades principales:

1. Para ayudar al profesor en su explicación a través de presentaciones con transparencias en las que se muestran los contenidos de la asignatura incluyendo un soporte visual para mostrar gráficas, fotografías, etc.
2. Para mostrar contenidos multimedia que incluyan vídeos, simulaciones o demostraciones informáticas relacionadas con la asignatura.

El uso de presentaciones de ordenador requiere atención en dos aspectos fundamentales: el diseño de las transparencias y la parte activa del uso de la transparencia en la clase. Desde el punto de vista del diseño, las transparencias han de resultar claras y no estar excesivamente sobrecargadas de texto que distraiga del discurso principal del profesor. Normalmente es interesante desde un punto de vista pedagógico, asociar a cada transparencia un único concepto principal. El uso de índices o referencias interpuestas que ayuden a relacionar los conceptos entre sí y a enmarcarlos en el contexto global de la asignatura, es también beneficioso. Por otro lado, el uso de la transparencia ha de ser cuidadoso, manteniendo los tiempos que permitan al alumnado comprender sus contenidos. El uso de punteros para enfocar y dirigir la atención del alumno por la transparencia facilita también la comprensión global de los conceptos.

Acceso telemático

El uso de Internet se ha extendido ampliamente, no sólo en nuestro país. La red de Internet es una red mundial que, si bien a mitad de los años 80 apenas tenía unos miles de usuarios, en la actualidad se ha convertido en la red de comunicaciones más extendida. Algunas de las posibilidades que presentan al acceder a una red son:

- Acceder a los archivos de bibliotecas de todo el mundo.
- Acceder a los archivos de biblioteca de la propia Universidad.
- Consultar documentos de cualquier origen, acceso a programas, datos, paquetes de aplicaciones, etc., copiarlos y disponer de ellos en el propio ordenador.
- Consultar información con otros usuarios de ordenador mediante 'tablones de anuncios informáticos', correo electrónico, chats, etc.
- Tener acceso a información sobre planes de estudio, titulaciones, relación de profesores e investigadores, becas, cursos, actualidad, etc., de prácticamente cualquier universidad del mundo.

Además, hay que tener en cuenta el desarrollo del plan de innovación docente, en el Aula Virtual de la Universidad (ver Sección 1.2.2), posibilitando el acceso a temarios, apuntes, trabajos, planes de estudio, ejercicios, problemas, exámenes, o el uso de nuevas plataformas de aprendizaje como Kahoot, Space Race, etc.

1.3. La Física y los estudios de Física

1.3.1. Importancia de la Física

La Física es una ciencia experimental básica cuyo desarrollo es importante para el sistema de la ciencia y la tecnología de cualquier país moderno, por lo que tiene una fuerte implantación en todos los sistemas universitarios de los países desarrollados. Los estudios de Física, sin embargo, no sirven solamente a aquellos estudiantes interesados en integrarse profesionalmente en el sistema de investigación, sino que les provee de una formación amplia que, según se observa a través de diferentes estudios realizados en el contexto nacional y de los estudios realizados por el proyecto TUNING a nivel europeo⁶, proporciona una capacidad de empleo muy elevada. Además se observa también que el espectro de trabajos que desarrollan los titulados es muy amplio. Esto indica que la amplitud y aplicabilidad de las destrezas adquiridas por los estudiantes de Física es apreciada por la sociedad y no se limita, como en ocasiones se cree, a formar futuros docentes e investigadores. Debido a la versatilidad que ofrece es importante que se siga impartiendo una titulación de Física variada y de calidad.

⁶<http://www.unideusto.org/tuningeu/subject-areas/physics/summary-of-outcomes.html>

1.3.2. Objetivos de la enseñanza de la Física

El objetivo general de un físico es el conocimiento científico del universo, desde los fragmentos atómicos y subatómicos más pequeños hasta las grandes formaciones estelares. Ello requiere el dominio de numerosas técnicas y la búsqueda de aplicaciones de los conocimientos. Así se imparte una formación tanto en los principios básicos de la Física como en las aplicaciones punteras con el fin de que el futuro licenciado pueda incorporarse a la vanguardia de la ciencia y la tecnología. La licenciatura proporciona una formación multidisciplinar donde, además de Física, se adquieren importantes conocimientos de matemáticas, informática y computadores, química, electrónica, técnicas experimentales y modelización de fenómenos.

Los objetivos educativos y profesionales que se pretende conseguir con el grado de físico son muchos y variados. Antes de relacionarlos con un cierto grado de detalle, según se nombran en el Libro Blanco de Física elaborado por la ANECA⁷, podemos encuadrar los objetivos perseguidos en tres grandes bloques:

1. El físico debe ser capaz de evaluar y discernir entre los órdenes de magnitud, así como de desarrollar una clara percepción de situaciones que son físicamente diferentes, pero que muestran analogías, lo que permite el uso de soluciones conocidas a nuevos problemas. Para ello es importante que el estudiante, además de dominar las teorías físicas, adquiera un buen conocimiento y dominio de los métodos matemáticos y numéricos más comúnmente utilizados.
2. El estudiante debe desarrollar la capacidad de identificar los elementos esenciales de un proceso o una situación compleja, lo que le permitirá construir un modelo simplificado que describa con la aproximación necesaria el objeto de estudio y permita realizar predicciones sobre su evolución futura. El físico debe ser capaz también de identificar la forma de comprobar la validez del modelo y de introducir las modificaciones necesarias cuando se observen discrepancias entre las predicciones del modelo y las observaciones.
3. El estudiante debe familiarizarse con el trabajo en el laboratorio, la instrumentación y los métodos experimentales más usados. Además debe de ser capaz de realizar experimentos de forma independiente y describir, analizar y evaluar críticamente los datos obtenidos.

1.3.3. Competencias desarrolladas en la titulación de Física

Podemos distinguir entre competencias transversales (o genéricas) y competencias específicas. Las primeras son competencias no intrínsecamente relacionadas con los conocimientos específicos de la Física y podemos decir que son las que tienen que ver con competencias transversales a diferentes estudios. Estas competencias son nombradas en el

⁷http://www.aneca.es/var/media/150412/libroblanco_jun05_fisica.pdf

Libro Blanco de Física por los propios licenciados, los profesores y los empleadores como importantes para el futuro profesional. Algunas se adquieren total o parcialmente en la titulación y otras por actividades colaterales; a su vez se dividen entre instrumentales, personales y sistémicas. Las segundas son las competencias desarrolladas específicamente por los estudios elegidos, en este caso la Física.

Competencias transversales o genéricas

1. Instrumentales

- Capacidad de análisis y síntesis
- Capacidad de organización y planificación
- Comunicación oral y escrita en lengua nativa
- Conocimiento de una lengua extranjera
- Conocimientos de informática
- Capacidad de gestión de la información
- Resolución de problemas
- Toma de decisiones

2. Personales

- Trabajo en equipo
- Trabajo en un equipo de carácter interdisciplinar
- Trabajo en un contexto internacional
- Habilidades en las relaciones interpersonales
- Razonamiento crítico
- Compromiso ético

3. Sistémicas

- Aprendizaje autónomo
- Adaptación a las nuevas situaciones
- Creatividad
- Liderazgo
- Conocimiento de otras culturas y costumbres
- Iniciativa y espíritu emprendedor
- Motivación por la calidad
- Sensibilidad hacia temas medioambientales

Competencias Específicas de Formación Disciplinar

1. Adquirir cualificaciones adicionales para la profesión, a través de unidades opcionales diferentes a la Física (*Actitudes interpersonales/habilidades*).
2. Adquirir una comprensión de la naturaleza de la investigación física, de las formas en que se lleva a cabo, y de cómo la investigación en Física es aplicable a muchos campos diferentes al de la Física, por ejemplo la ingeniería; habilidad para diseñar procedimientos experimentales y/o teóricos para: (i) resolver los problemas corrientes en la investigación académica o industrial; (ii) mejorar los resultados existentes (*Destrezas de investigación básica y aplicada*).
3. Ser capaz de trabajar en un grupo interdisciplinario, de presentar su propia investigación o resultados de búsqueda bibliográficos tanto a profesionales como a público en general (*Habilidades específicas de comunicación*).
4. Ser capaz de llevar adelante las siguientes actividades: actividades profesionales en el marco de tecnologías aplicadas, tanto a nivel de laboratorio como industrial, relativos en general a la Física y, en particular, a la radio protección; telecomunicación; tele-sensing; control remoto por satélite, control de calidad, participación en actividades de centros de investigación públicos y privados (incluyendo gerencia); teniendo en cuenta el análisis y cuestiones de modelado y de la física compleja y aspectos informáticos. (*Espectro de empleos accesibles*).
5. Ser capaz de llevar adelante las siguientes actividades: promover y desarrollar la innovación científica y tecnológica; planificación y gestión de tecnologías relacionadas con la Física, en sectores tales como la industria, medio ambiente, salud, patrimonio cultural, administración pública, banca; alto nivel de popularización de las cuestiones concernientes a la cultura científica y de aspectos aplicados a la Física clásica y moderna. (*Espectro de empleos accesibles*).
6. Ser capaz de comparar nuevos datos experimentales con modelos disponibles para revisar su validez y sugerir cambios con el objeto de mejorar la concordancia de los modelos con los datos. (*Destrezas de modelación*).
7. Ser capaz de desarrollar un sentido personal de la responsabilidad dada la libre elección de cursos a través del amplio espectro de técnicas científicas ofrecidas en el currículo, el estudiante/graduado debería ser capaz de obtener flexibilidad profesional. (*Destrezas humanas / profesionales*).
8. Ser capaz de iniciarse en nuevos campos a través de estudios independientes (*Capacidad de aprender a aprender*).
9. Ser capaz de evaluar claramente los ordenes de magnitud, de desarrollar una clara percepción de las situaciones que son físicamente diferentes, pero que muestran analogías, por lo tanto permitiendo el uso de soluciones conocidas. (*Destrezas para la resolución de problemas*).

10. Ser capaz de realizar lo esencial de un proceso / situación y establecer un modelo de trabajo del mismo; el graduado debería ser capaz de realizar las aproximaciones requeridas con el objeto de reducir el problema hasta un nivel manejable; pensamiento crítico para construir modelos físicos. (*Destrezas de modelado y de resolución de problemas*).
11. Ser capaz de interpretar cálculos de forma independiente, aún cuando sea necesario un ordenador pequeño o uno grande, el graduado debería ser capaz de desarrollar programas de software. (*Destrezas de resolución de problemas y destrezas informáticas*).
12. Ser capaz de buscar y utilizar bibliografía en Física y otra bibliografía técnica, así como cualquier fuente de información relevante para trabajos de investigación y desarrollo técnico de proyectos. (*Búsqueda de bibliografía y otras destrezas*).
13. Ser capaz de entender los problemas socialmente relacionados que confrontan la profesión y comprender las características éticas de la investigación de la actividad profesional en Física y su responsabilidad para proteger la salud pública y el medio ambiente. (*Conciencia ética general y específica*).
14. Ser capaz de trabajar con un alto grado de autonomía, aún aceptando responsabilidades en la planificación de proyectos y en el manejo de estructuras. (*Destrezas de Gestión*).
15. Estar preparado para competir por un puesto docente en Física en la educación secundaria. (*Espectros de empleos accesibles*).
16. Aprovechar la facilidad para mantenerse informado de los nuevos desarrollos y la habilidad para proveer consejo profesional en un rango de aplicaciones posibles. (*Destrezas específicas de actualización*).
17. Tener un conocimiento en profundidad sobre las bases de la Física moderna, por ejemplo en lo concerniente a teoría cuántica, etc. (*Cultura General Profunda en Física*).
18. Tener un buen conocimiento sobre la situación del arte en, por lo menos, una de las especialidades actuales de la Física. (*Familiaridad con las fronteras de la investigación*).
19. Tener una buena comprensión de las teorías físicas más importantes, localizando en su estructura lógica y matemática, su soporte experimental y el fenómeno físico que puede ser descrito a través de ellos. (*Comprensión teórica de fenómenos físicos*).
20. Haberse familiarizado con el "trabajo de genios", es decir, con la variedad y deleite de los descubrimientos y teorías físicas, desarrollando de este modo una conciencia de los más altos estándares. (*Sensibilidad con respecto a estándares absolutos*).
21. Haberse familiarizado con las áreas más importantes de la Física, no sólo a través de su significado intrínseco, sino por la relevancia esperada en un futuro para la Física y sus aplicaciones, familiaridad con los enfoques que abarcan muchas áreas en Física. (*Cultura general en Física*).

22. Haberse familiarizado con los modelos experimentales más importantes, además ser capaces de realizar experimentos de forma independiente, así como describir, analizar y evaluar críticamente los datos experimentales. (*Destrezas experimentales y de laboratorio*).
23. Haber mejorado el manejo de lenguas extranjeras a través de cursos impartidos en otros idiomas, por ejemplo estudios en el extranjero a través de programas de intercambio, reconocimiento de créditos en universidades extranjeras o centros de investigación. (*Destrezas generales y específicas en lenguas extranjeras*).
24. Comprender y dominar el uso de los métodos matemáticos y numéricos más comúnmente utilizados. (*Destrezas en resolución de problemas y destrezas matemáticas*).

1.3.4. Proyección profesional

La variada formación que se recibe en esta titulación hace que los físicos sean muy versátiles, con capacidad para trabajar en materias muy diversas, pudiendo adaptarse a la evolución del mercado de trabajo. La mayor parte de los licenciados en Física encuentran empleo en la industria, laboratorios, centros de investigación e instituciones de educación. Algunos ejemplos actuales de trabajos de físicos: la producción de energía (centrales nucleares, energía eólica, reactores de fisión, etc.), meteorología y medio ambiente (predicción del clima, predicción de desastres naturales, satélites meteorológicos, etc.), diseño y desarrollo de nuevos materiales (nanotecnologías, superconductores, semiconductores, etc.), óptica (fibras ópticas, visión artificial, láseres, tratamiento de imágenes, etc.), biofísica (protección a radiaciones, resonancia magnética, efectos de campos eléctricos y magnéticos, diseño de fármacos, etc.), informática y computadores (robótica, diseño de procesadores, programación de sistemas de alta seguridad, redes de comunicaciones, etc.), consultorías y estudios financieros (consultorías de nuevas tecnologías, modelización de incertidumbres financieras, etc.). Actualmente, es una de las carreras con una ratio más alta entre ofertas de trabajo y número de licenciados, de forma que la tasa de desempleo es muy baja. Si bien aún no existen datos acerca de los graduados en Física, debido a la muy reciente implantación de Grado en Física en las Universidades españolas, todo indica que esta tendencia continuará en los próximos años.

En resumen, podemos decir que el 90 % de los físicos responden a uno de estos perfiles profesionales: docencia universitaria y/o investigación, docencia no universitaria, administración pública, empresas de banca, finanzas y seguros, empresas de consultoría, empresas de informática y telecomunicaciones o industria.

1.3.5. El Grado de Física en la Universidad de Cantabria

El grado de Física en la Universidad de Cantabria está regulado por el Real Decreto 1393/2007, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales, impartidas en los Centros Universitarios propios de la Universidad de Cantabria. Los

detalles de esta regulación se hallan recogidos en la “Normativa de Gestión Académica de Estudios de Grado” cuya última modificación fue aprobada por el Consejo de Gobierno de la Universidad en 2021⁸.

Estructura del Grado de Física

El Grado de Física consta de un total de 240 ECTS repartidos en un total de 60 créditos asociados a asignaturas de formación básica, 126 a asignaturas obligatorias, 36 a asignaturas optativas y finalmente 18 créditos asociados al Trabajo de Fin de Grado. A su vez, dentro del programa se encuentran diferentes secciones temáticas:

- Módulo Básico: contiene el conjunto de asignaturas que proporcionan una formación básica tanto en el ámbito de la física como en el de las matemáticas o la computación.
- Capacitación lingüística en inglés y formación en valores, competencias y/o estrechas personales.
- Módulo Central: desarrolla el conjunto de asignaturas obligatorias que establecen los fundamentos de las diferentes ramas principales de la física, así como de las técnicas de laboratorio y/o computación utilizadas en la disciplina.
- Módulo de Orientación: compuesto por asignaturas dirigidas a aportar una perspectiva de aspectos no estrictamente científicos de la Física.
- Mención en Física Fundamental: conjunto de asignaturas que profundizan en los aspectos más básicos de la estructura de la materia y sus interacciones y el conocimiento del cosmos.
- Mención en Física Aplicada: conjunto de asignaturas que abarcan aplicaciones de la física a sistemas concretos con una perspectiva tecnológica y de utilidad.
- Módulo transversal Física Fundamental / Aplicada: asignaturas que proveen de competencias compatibles con ambas menciones, especialmente en lo que se refiere a la experimentación en laboratorio y a técnicas de computación.
- Módulo de Trabajo de Fin de Grado.

Las menciones en Física Fundamental y/o Aplicada constituyen itinerarios curriculares alcanzados cuando el estudiante cursa 30 créditos de asignaturas optativas pertenecientes a la mención correspondiente. Resulta obligatorio para la consecución del título final, la obtención de una mención.

⁸<https://web.unican.es/estudiantesuc/Documents/NormativayLegislacion/NormativaGrado/NormativaGrado2027-07-2021.pdf>

Competencias

En la sección 1.3.3 se detallaron las competencias especificadas en el libro blanco de la ANECA sobre la disciplina de física. A continuación se muestra el desglose concreto de la implementación de dichas competencias en el Grado de Física de la Universidad de Cantabria.

Competencias Básicas

- Que los estudiantes hayan demostrado poseer y comprender conocimientos en un área de estudio que parte de la base de la educación secundaria general, y se suele encontrar a un nivel que, si bien se apoya en libros de texto avanzados, incluye también algunos aspectos que implican conocimientos procedentes de la vanguardia de su campo de estudio.
- Que los estudiantes sepan aplicar sus conocimientos a su trabajo o vocación de una forma profesional y posean las competencias que suelen demostrarse por medio de la elaboración y defensa de argumentos y la resolución de problemas dentro de su área de estudio.
- Que los estudiantes tengan la capacidad de reunir e interpretar datos relevantes (normalmente dentro de su área de estudio) para emitir juicios que incluyan una reflexión sobre temas relevantes de índole social, científica o ética.
- Que los estudiantes puedan transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado.
- Que los estudiantes hayan desarrollado aquellas habilidades de aprendizaje necesarias para emprender estudios posteriores con un alto grado de autonomía.

Competencias generales

- (Conocimiento): que los estudiantes hayan demostrado poseer y comprender conocimientos en un área de estudio que parte de la base de la educación secundaria general, y se suele encontrar a un nivel que, si bien se apoya en libros de texto avanzados, incluye también algunos aspectos que implican conocimientos procedentes de la vanguardia de su campo de estudio.
- (Aplicación): que los estudiantes sepan aplicar sus conocimientos a su trabajo o vocación de una forma profesional y posean las competencias que suelen demostrarse por medio de la elaboración y defensa de argumentos y la resolución de problemas dentro de su área de estudio.
- (Análisis): que los estudiantes tengan la capacidad de reunir e interpretar datos relevantes (normalmente dentro de su área de estudio) para emitir juicios que incluyan una reflexión sobre temas relevantes de índole social, científica o ética.

- (Comunicación): que los estudiantes puedan transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado.
- (Aprendizaje): que los estudiantes hayan desarrollado aquellas habilidades de aprendizaje necesarias para emprender estudios posteriores con un alto grado de autonomía.

Competencias específicas

- (Conocimiento): conocer y comprender los fenómenos físicos, las teorías, leyes y modelos que los rigen, incluyendo su dominio de aplicación y su formulación en lenguaje matemático.
- (Aplicación): saber utilizar los métodos matemáticos, analíticos y numéricos básicos, para la descripción del mundo físico, incluyendo en particular la elaboración de teorías y modelos y el planteamiento de medidas experimentales.
- (Análisis): Entender el papel del método científico en la discusión de teorías y modelos, y ser capaz de plantear y realizar un experimento específico, analizando los resultados del mismo con la precisión requerida.
- (Comunicación): saber presentar de forma adecuada, en castellano y en su caso en inglés, el estudio realizado de un problema físico, comenzando por la descripción del modelo utilizado e incluyendo los detalles matemáticos, numéricos e instrumentales y las referencias pertinentes a otros estudios.
- (Aprendizaje): saber acceder a la información necesaria para abordar un trabajo o estudio utilizando las fuentes adecuadas, incluyendo literatura científico-técnica en inglés, y otros recursos on-line. Planificar y documentar adecuadamente esta tarea.
- (Herramientas): dominar el uso de las técnicas de computación necesarias en la aplicación de los modelos. Conocer los principios y técnicas de medida así como la instrumentación más relevante en los diferentes campos de la Física, y saber aplicarlos en el diseño y ejecución de un montaje instrumental completo en el laboratorio.
- (Iniciativa): ser capaz de trabajar de modo autónomo, mostrando iniciativa propia y sabiendo organizarse para cumplir los plazos marcados. Aprender a trabajar en equipo, contribuyendo constructivamente y asumiendo responsabilidades y liderazgo.
- (Ejecución): abordar la realización de proyectos científico-técnicos: planteamiento, selección de recursos, ejecución, análisis de resultados, presentación y discusión de los mismos.
- (Ética): analizar los posibles problemas éticos y de impacto social relacionados con la actividad profesional en Física, y en particular su responsabilidad en la protección de la salud pública y el medio ambiente.

- (Visión): ser capaz de participar en iniciativas interdisciplinares, aportando una visión, conocimientos y técnicas propios de la Física. Conocer el desarrollo histórico de teorías y conceptos en Física y su relación con temas actuales de frontera en Física. Ser capaz de transmitir el interés por la Física presentando de forma atractiva los avances logrados gracias a la misma, y su impacto en otras áreas de investigación y desarrollo.

El Doble Grado de Física y Matemáticas

La Universidad de Cantabria ofrece la posibilidad de realizar un Doble Grado de Física y Matemáticas. Los alumnos que cursen este itinerario obtendrá dos titulaciones oficiales de grado válidas a todos los efectos. Acumulará los conocimientos, competencias y habilidades de ambas titulaciones, lo que le permitirá acceder al mercado laboral de ambas titulaciones. El doble grado estructura en 5 años las asignaturas de ambas carreras para adquirir los conocimientos de las dos titulaciones de forma gradual. El primer curso de la titulación plantea las asignaturas básicas de Física y Matemáticas, así como herramientas informáticas y experimentales. En segundo y tercero se profundiza en las grandes ramas de la Física y Matemáticas. Los dos últimos cursos incluyen una formación más especializada, de acuerdo con las especialidades y los trabajos fin de grado.

1.4. Asignatura: Física de Partículas Elementales

1.4.1. Presentación de la asignatura

Objetivos principales

La Física de Partículas se encarga del estudio de los bloques últimos que componen la materia y de sus interacciones. Esta disciplina se construye sobre los desarrollos teóricos que supusieron la Mecánica Cuántica y la Relatividad Especial, y sobre los datos obtenidos a partir de los experimentos llevados a cabo durante los siglos XX y XXI. El Modelo Estándar de las partículas recoge el conocimiento actual de esta disciplina en el marco de una teoría cuántica de campos.

Esta asignatura proporciona una primera toma de contacto con el formalismo del Modelo Estándar y, por lo tanto, tiene como objetivo que los alumnos profundicen en los conceptos fundamentales que rigen la dinámica de las partículas fermiónicas y la explicación de las fuerzas de naturaleza como un intercambio de partículas bosónicas. Los resultados de aprendizaje incluirán el conocimiento de los principios de funcionamiento de los detectores de partículas; el tratamiento matemático de los experimentos de colisión; el cálculo de diagramas de Feynman sencillos utilizando la electrodinámica cuántica como punto de partida; ; el entendimiento básico de las fuerzas electromagnética, débil y fuerte; y el principio de ruptura de simetría y el bosón de Higgs.

Práctica docente

La práctica docente será ejecutada de acuerdo a los principios metodológicos explicados en la sección 1.2. Todos los conceptos serán abordados con un plantamiento matemático simplificado que haga incidencia en los aspectos físicos, sin profundizar en aspectos matemáticos o formales. En este sentido, la aproximación propuesta es similar a la que el profesor Mark Thomson del Laboratorio Cavendish de Reino Unido, propone en su libro *Modern Particle Physics* [10]. Este libro será una de las referencias bibliográficas de la asignatura, así como algunos de los materiales ofrecidos con el libro.

La asignatura se dividirá en clases magistrales, haciendo uso de transparencias y pizarra, clases de problemas, una práctica de laboratorio sobre detectores de partículas y una práctica computacional para medir la anchura del bosón Z en datos del experimento CMS. De la misma forma, a lo largo del curso, se propondrán trabajos relacionados con las clases teóricas en concepto de evaluación continua. Todos los contenidos serán recogidos en el lugar específico de la asignatura dentro de un Campus Virtual como es *Moodle*, en el caso de la Universidad de Cantabria.

Relación con otras asignaturas

Esta asignatura pertenece al área temática de Física Atómica, Molecular y Nuclear y por lo tanto guarda relación con asignaturas de este mismo área. La asignatura utiliza conceptos de Física Cuántica y de Relatividad Especial, así como de técnica experimentales y computacionales para el desarrollo de las prácticas. De manera más detallada se pueden encontrar relaciones con las siguientes asignaturas.

- Asignaturas teóricas con relación vertical directa:
 - *Física Básica Experimental III: La Materia y sus propiedades*. Esta asignatura básica proporciona los primeros conceptos relacionados con la física cuántica y la estructura de la materia: sólidos, átomos y moléculas, núcleos y partículas.
 - *Fundamentos de Física Cuántica*. Esta asignatura profundiza en el desarrollo de la física cuántica, desde los primeros hallazgos, la radiación del cuerpo negro y la hipótesis de Planck, hasta la ecuación de Schrödinger.
 - *Física Cuántica y Estructura de la Materia IV: Núcleos y Partículas*. En esta asignatura se profundiza en la fenomenología y modelos físicos relacionados con los núcleos y las partículas. También se proporcionan los fundamentos de la interacción de las partículas con la materia y una introducción a los detectores de partículas.
 - *Mecánica Clásica y Relatividad*. Esta asignatura proporciona los fundamentos de la Mecánica Clásica incluyendo los conceptos de Lagrangiano y Hamiltoniano. También se desarrollan los conceptos fundamentales de la teoría de la relatividad. Muchos de estos conceptos resultan esenciales para Física de Partículas Elementales.

- Asignaturas teóricas con relación vertical indirecta:

- *Física Cuántica y Estructura de la Materia II: Átomos, Moléculas y Sólidos.*

Esta asignatura profundiza en la aplicación de la física cuántica al estudio de sistemas como los átomos, moléculas y sólidos. A pesar de no guardar una relación directa, existen varios elementos y conceptos comunes en la aplicación de las leyes de la Física Cuántica a estos sistemas y a las partículas.

- Asignaturas teóricas con relación horizontal:

- *Mecánica Cuántica.* Esta asignatura se centra en el formalismo matemático de la Mecánica Cuántica. El formalismo de la mecánica cuántica es común a la Física de Partículas Elementales y por lo tanto son asignaturas relacionadas.

- Asignaturas prácticas y computacionales con relación vertical:

- *Herramientas Computacionales en el Laboratorio.* En esta asignatura se proporcionan las herramientas básicas para realizar análisis numérico y computacional de los datos experimentales obtenidos en el laboratorio. La asignatura guarda una relación vertical con Física de Partículas Elementales ya que estas herramientas serán utilizadas para la realización de las prácticas propuestas en la asignatura.

- *Programación.* Esta asignatura proporciona los conocimientos básicos de programación, que serán necesarias para la realización de la práctica de computación propuesta en la asignatura.

- *Laboratorios de Física I y II.* Estas dos asignaturas proporcionan los fundamentos de las técnicas experimentales y guardan por lo tanto una relación vertical con la asignatura en lo que respecta a la realización de su práctica de laboratorio.

- Asignaturas prácticas y computacionales con relación horizontal:

- *Técnicas Experimentales avanzadas.* Esta asignatura, dedicada al desarrollo de experimentos en diferentes áreas de la física, contiene una práctica centrada en la medida de la vida media del muon, guardando relación directa tanto con la parte experimental de la asignatura, como con el capítulo de interacción débil.

1.4.2. Guía docente

Datos de la asignatura

| Datos de la asignatura | |
|-------------------------------|---|
| Nombre | Física de Partículas Elementales |
| Centro | Facultad de Ciencias |
| Créditos ECTS | 6 |
| Módulo/Materia | Mención en Física Fundamental |
| Titulación | Grado de Física (4º curso) Doble Grado Física y Matemáticas (5º curso) |
| Tipología | Optativa |

Conocimientos previos

| Imprescindible haber cursado |
|---|
| Física Básica Experimental III: La materia y sus propiedades |
| Fundamentos de Física Cuántica |
| Física Cuántica y Estructura de la Materia IV: Núcleos y Partículas |
| Mecánica Clásica y Relatividad |
| Recomendable haber cursado |
| Laboratorio de Física I |
| Laboratorio de Física II |
| Herramientas Computacionales en el Laboratorio |
| Programación |
| Recomendable estar cursando |
| Mecánica Cuántica |

Competencias Genéricas del plan de estudios trabajadas

- (Análisis): que los estudiantes tengan la capacidad de reunir e interpretar datos relevantes (normalmente dentro de su área de estudio) para emitir juicios que incluyan una reflexión sobre temas relevantes de índole social, científica o ética.
- (Comunicación): que los estudiantes puedan transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado.

- (Conocimiento): que los estudiantes hayan demostrado poseer y comprender conocimientos en un área de estudio que parte de la base de la educación secundaria general, y se suele encontrar a un nivel que, si bien se apoya en libros de texto avanzados, incluye también algunos aspectos que implican conocimientos procedentes de la vanguardia de su campo de estudio.

Competencias Específicas del plan de estudios trabajadas

- (Conocimiento): conocer y comprender los fenómenos físicos, las teorías, leyes y modelos que los rigen, incluyendo su dominio de aplicación y su formulación en lenguaje matemático.
- (Análisis): Entender el papel del método científico en la discusión de teorías y modelos, y ser capaz de plantear y realizar un experimento específico, analizando los resultados del mismo con la precisión requerida.
- (Comunicación): saber presentar de forma adecuada, en castellano y en su caso en inglés, el estudio realizado de un problema físico, comenzando por la descripción del modelo utilizado e incluyendo los detalles matemáticos, numéricos e instrumentales y las referencias pertinentes a otros estudios.
- (Herramientas): dominar el uso de las técnicas de computación necesarias en la aplicación de los modelos. Conocer los principios y técnicas de medida así como la instrumentación más relevante en los diferentes campos de la Física, y saber aplicarlos en el diseño y ejecución de un montaje instrumental completo en el laboratorio.
- (Visión): ser capaz de participar en iniciativas interdisciplinares, aportando una visión, conocimientos y técnicas propios de la Física. Conocer el desarrollo histórico de teorías y conceptos en Física y su relación con temas actuales de frontera en Física. Ser capaz de transmitir el interés por la Física presentando de forma atractiva los avances logrados gracias a la misma, y su impacto en otras áreas de investigación y desarrollo.

Resultados del aprendizaje

- Conocer la relevancia de un modelo de Partículas Elementales para entender el mundo microscópico.
- Entender las características de las fuerzas elementales y las propiedades de las partículas.
- Entender los aspectos básicos del Modelo Estándar.
- Conocer los resultados experimentales básicos en que se apoya el Modelo Estándar
- Conocer y hacer uso de las herramientas de cálculo de procesos básicos entre partículas elementales.

- Líneas actuales de desarrollo en relación con los modelos teóricos propuestos.
- Identificar los procesos de interacción de una partícula al atravesar un medio físico.
- Conocer las técnicas de detección empleadas y la instrumentación relevante.
- Manejar detectores sencillos y algunas técnicas de análisis usuales.

Objetivos

1. Conocer el Modelo Estándar de las Partículas Elementales.
2. Conocer las herramientas de calculo de procesos de interaccion entre particulas.
3. Entender los fundamentos físicos de la detección, las principales tecnologías y su aplicación en experimentos actuales.
4. Conocer las líneas de investigación actuales en el campo.

Modalidades organizativas y métodos docentes

| Actividades | Horas de la asignatura |
|--|------------------------|
| Actividades presenciales | |
| Horas de clase | |
| Teoría | 33 |
| Prácticas en el aula | 7 |
| Prácticas de Laboratorio Experimental | 10 |
| Prácticas de Laboratorio en Ordenador | 10 |
| Subtotal horas de clase | 60 |
| Actividades de seguimiento | |
| Tutorías | 10 |
| Evaluación | 10 |
| Subtotal Seguimiento | 20 |
| Subtotal Actividades Presenciales | 80 |
| Actividades no presenciales | |
| Trabajo en grupo | 20 |
| Trabajo autónomo | 50 |
| Subtotal no presencial | 70 |
| Horas totales | 150 |

Organización docente

La asignatura se encuentra organizada en un total de ocho bloques temáticos. La descripción detallada de los objetivos, contenidos y actividades propuestas en cada uno de los bloques puede encontrarse en la sección 1.4.3. La tabla mostrada a continuación contiene la partición exacta de horas dedicadas a cada uno de los bloques en las diferentes modalidades docentes. Cabe destacar que el bloque 2 “Detección de Partículas” y el bloque 6 “La Interacción Débil” incluyen una práctica de laboratorio y de ordenador respectivamente, lo que queda reflejado en el reparto de horas. En la tabla siguiente se han utilizado las siguientes abreviaturas: *TE* (Clase de Teoría), *PA* (Prácticas en Aula), *PLE* (Prácticas de Laboratorio Experimental), *PLO* (Prácticas de Laboratorio con Ordenador), *TU* (Tutorías), *EV* (Evaluación), *TG* (Trabajo en Grupo) y *TA* (Trabajo Autónomo).

| CONTENIDOS | TE | PA | PLE | PLO | TU | EV | TG | TA |
|---|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Introducción | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Detección de Partículas | 3 | 1 | 10 | 0 | 1 | 2 | 10 | 13 |
| La ecuación de Dirac | 6 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 6 |
| Interacción por intercambio de partículas | 6 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 6 |
| Aniquilación electrón-positrón | 5 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 5 |
| La Interacción Débil | 5 | 1 | 0 | 10 | 1 | 2 | 10 | 14 |
| La Interacción Fuerte | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 3 |
| El bosón de Higgs | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| Total | 33 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 50 |

Métodos de evaluación

La asignatura será evaluada con arreglo a tres bloques independientes: exámenes, prácticas de laboratorio y evaluación continua de trabajos en clase.

Exámenes

La asignatura incluirá exámenes en donde se desarrollarán temas y cuestiones teóricas y se resolverán problemas y ejercicios prácticos.

1. Examen parcial 1. Supondrá un 25 % de la nota final.
2. Examen parcial 2. Supondrá un 25 % de la nota final.

Ambos exámenes parciales podrán ser recuperados en un examen final. En caso de usarse esta opción la nota más alta obtenida entre el parcial y el examen final será man-

tenida. Será necesario alcanzar al menos un 3/10 en este bloque para poder promediar con las prácticas.

Prácticas

La asignatura incluirá dos prácticas, una de laboratorio y otra computacional. La nota final de cada práctica será un promedio de la actividad del alumno en el transcurso de la práctica y de la calidad de un informe sobre la práctica.

1. Práctica de laboratorio. Supondrá un 25 % de la nota final.
2. Práctica computacional. Supondrá un 25 % de la nota final.

No entregar el informe de cualquier práctica supondrá la no evaluación de dicha práctica. Si ninguna de las dos prácticas es entregada, el alumno no será evaluado.

Evaluación continua

La evaluación continua se llevará a cabo a través de la realización de ejercicios propuestos en clase incluyendo la exposición de las soluciones. La evaluación continua puede puntuar hasta un punto adicional sobre la nota total de los exámenes.

Desglose de horas de evaluación

- Cuatro horas dedicadas a los exámenes.
- Cuatro horas dedicadas a la corrección de las prácticas.
- Dos horas dedicadas a la evaluación de problemas y ejercicios realizados por los estudiantes a lo largo del curso.

Bibliografía

Bibliografía básica

- *Modern Particle Physics*, Mark Thomson, Cambridge University Press. Este libro constituye la referencia básica de la asignatura. El libro de Mark Thomson profundiza en el Modelo Estándar de las partículas con un tratamiento matemático muy simplificado, haciendo énfasis en los conceptos físicos y proporcionando herramientas de cálculo efectivas. El libro viene acompañado con un conjunto de transparencias que son también utilizadas en las clases magistrales.
- *Particle Physics*, BR Martin and G. Shaw, Ed Wiley. Este libro ofrece una introducción al Modelo Estándar con una perspectiva experimental y fenomenológica. El libro complementa al libro de Mark Thomson proporcionando más información acerca de los experimentos y hallazgos que han dado forma al Modelo Estándar de las Partículas.

Bibliografía Complementaria

- *An Introduction to the standard model of particle physics, W.N. Cottingham and D.A. Greenwood, Cambridge University Press.* Este libro se presenta como una alternativa al libro de Mark Thomson, compartiendo un planteamiento simplificado de los aspectos matemáticos, pero algo más avanzado. Resulta una referencia muy apropiada para aquellos estudiantes que quieran reforzar, de manera sencilla, aspectos matemáticos del Modelo Estándar.
- *Particle Physics at the new millenium, B. Roe, Springer.* Este libro se presenta como una alternativa al libro de BR. Martin y G. Shaw. El libro presenta un recorrido fenomenológico por los aspectos más importantes del Modelo Estándar.
- *Introduction to Quantum Field Theory, Michel E. Peskin and Daniel V. Schroeder, CRC Press.* Este libro contiene los aspectos más formales de la teoría cuántica de campos y el Modelo Estándar. Constituye una referencia para aquellos alumnos interesados en conocer los detalles matemáticos de la teoría.
- *Techniques for Nuclear and Particle Physics experiments, WT Leo, Springer Verlag, Second Edition.* Este libro clásico contiene una descripción detallada de las principales técnicas de detección utilizadas en los experimentos de física de partículas, así como del tratamiento matemático y estadístico que se utiliza normalmente para su análisis.
- *Detector for Particle Radiation, K. Kleinknech, Cambridge University Press.* Este libro es complementario al libro de WT Leo, proporcionando más información acerca de los procesos físicos que sufren las partículas cuando atraviesan la materia y cómo pueden ser utilizados para construir detectores de partículas.

1.4.3. Desarrollo de temas

En esta sección se desarrollan los temas propuestos para el perfil docente del concurso. Estas secciones contienen el resumen relativo a la segunda prueba que se especifica en la convocatoria y que quedan así aportados. Para cada uno de los temas se detallan los objetivos, los resultados del aprendizaje concretos, los contenidos y las actividades propuestas.

Tema 1: Introducción

Objetivos

El objetivo fundamental de este capítulo es el de introducir y contextualizar la Física de Partículas, definiendo su ámbito de estudio, relacionándola con disciplinas como la Mecánica Cuántica y la Relatividad Especial, y estableciendo los sistemas de unidades y las notaciones usadas comúnmente en esta materia.

Resultados de aprendizaje

- Entender de forma descriptiva el contenido material y de fuerzas del Universo según el Modelo Estándar de las Partículas.
- Conocer y manejar el Sistema Natural de Unidades.
- Conocer el concepto de función de onda cuántica como representación matemáticas de las Partículas.
- Manejar con destreza la notación cuántica “bras” y “kets” para expresar funciones de onda cuánticas, operadores y productos escalares.
- Manejar con destreza la notación relativista de cuadrvectores covariantes y contravariantes y la convención de Einstein para las sumas.
- Entender el principio de acción y el formalismo Lagrangiano en el contexto de los campos cuánticos.
- Entender los fundamentos del teorema de Noether y las teorías Gauge.

Contenidos

Este tema comienza delimitando el ámbito del conocimiento de la Física de Partículas, como aquel que se encarga del estudio de los bloques fundamentales de la materia y de sus interacciones. A continuación, se establece una breve reseña histórica que muestra la evolución de esta disciplina desde el descubrimiento de los átomos hasta el entendimiento de su estructura interna con los descubrimientos del electrón y el núcleo, y se culmina con la presentación del Modelo Estándar de las Partículas que considera que el contenido material del Universo está formado por fermiones, que pueden ser de tipo leptón o de tipo quark, y que éstos a su vez se organizan en familias o sabores de masa creciente: electrón, muon, tau y sus respectivos neutrinos, y los quarks “up” y “down”; “charm” y “strange”; y “top” y “bottom”. De la misma forma, se manifiesta que en dicho modelo, las tres fuerzas de la naturaleza: electromagnetismo, fuerza débil y fuerza fuerte son interpretadas como un intercambio de partículas bosónicas: fotones, bosones W y Z y gluones respectivamente. Finalmente, se menciona la existencia de un bosón adicional, el bosón de Higgs, cuya interacción con las otras partículas genera su masa. En este punto se enfatiza que la fuerza de la gravedad no ha podido ser descrita satisfactoriamente en el marco de una teoría cuántica hasta la fecha, siendo una de las ramas de investigación actuales.

Una vez introducidas las partículas fundamentales junto con su escala de tamaño y de masa, se procede a introducir el Sistema Natural de Unidades utilizado en Física de Partículas. En este sistema la velocidad de la luz y la constante reducida de Plank toman un valor unidad $c = \hbar = 1$. Puesto que dichas constantes tienen unidades, esta identidad hace que las dimensiones de otras magnitudes físicas difieran en relación al Sistema Internacional. Particularmente relevante para los alumnos, es entender que en el Sistema Natural de Unidades, la masa, el momento y la energía adoptan todas unidades de energía.

El tema continúa explicando brevemente el marco matemático en el que se desarrolla el Modelo Estándar, en primer lugar, identificando a las partículas con funciones de onda o rayos pertenecientes a un espacio de Hilbert en el que pueda definirse un producto interno adecuado. De la misma forma se procede a identificar a los observables físicos como operadores y se introduce la notación de “bras” y “kets”. En este contexto, se incide también en la interpretación probabilística de las funciones de onda y de sus productos. Igualmente, se repasan brevemente los principios de la Relatividad Espacial, presentando el espacio-tiempo como un único ente dotado, matemáticamente, de una estructura de espacio de Minkowski, en el que los sistemas inerciales se relacionan a través de las transformaciones de Lorentz. Finalmente se introduce la notación covariante para cuadrvectores y la convención de Einstein para sumas y contracción de índices.

Posteriormente, se introduce el principio de acción, el concepto de Lagrangiano y el de densidad del Lagrangiano en el contexto cuántico. En este punto, se procede a la derivación de las ecuaciones de Euler-Lagrange a partir de la minimización de la acción. También se introduce brevemente el teorema de Noether, demostrando cómo una transformación que deja invariante la acción del sistema da lugar a una ecuación de continuidad, que integrada a todo el espacio genera una ley de conservación. Usando este contexto se expone un ejemplo de la aplicación de una transformación Gauge (cambio de fase global) y de la ley de conservación que genera (conservación de la carga).

Actividades

| Ejercicios de clase |
|---|
| Uso del sistema natural de unidades |
| Problemas sencillos de cinemática de colisiones de partículas usando cuadrimomentos |
| Trabajos de evaluación continua |
| Derivación del tensor electromagnético $F^{\mu\nu}$ a partir de su definición $F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$ y la definición del cuadropotencial vector $A^\mu = (\Phi, \vec{A})$ |
| Derivación de las ecuaciones de Maxwell aplicando las ecuaciones de Euler-Lagrange a la Lagrangiana del electromagnetismo en el vacío |

Tema 2: Detección de partículas

Objetivos

Este capítulo tiene como finalidad mostrar los principios básicos de los detectores de partículas. Con este propósito, el capítulo desarrolla las principales interacciones de las partículas con la materia que atraviesan. En base a dichas interacciones, el capítulo ofrece un breve repaso a los detectores de partículas más típicos y finalmente una breve introducción a los grandes detectores de partículas construidos hoy en día.

Resultados del aprendizaje

- Entender los fundamentos de los detectores de partículas: material activo y sistemas de recolección de la señal.
- Conocer las principales formas en las que los fotones interaccionan con la materia: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares.
- Conocer las principales formas en las que los neutrones de energía baja y moderada interaccionan con la materia: “scattering”, absorción y fisión.
- Conocer las principales formas en las que hadrones neutros de alta energía interaccionan con la materia a través de reacciones nucleares.
- Conocer las principales formas en las que las partículas cargadas interaccionan con la materia: ionización, Bremsstrahlung, scattering múltiple, radiación Cerenkov y reacciones nucleares.
- Conocer algunos de los detectores clásicos: centelleadores, cámaras multihilo, etc.
- Profundizar en el conocimiento de detectores de partículas basados en silicio.
- Conocer la estructura básica de los grandes detectores de partículas en experimentos de colisión.

Contenidos

El capítulo comienza con la definición de un detector de partículas como aquel dispositivo capaz de identificar el paso de una partícula y de medir una o varias de sus propiedades: momento, energía, carga, spin, tipo de partícula, etc. Desde un punto de vista lógico, los detectores de partículas están compuestos por dos elementos: el material activo en el que la partícula reacciona con el detector produciendo algún tipo de señal (típicamente electrones, iones o luz) y el sistema colector de dicha señal que se encargará de atrapar y procesar la señal para su posterior análisis.

A continuación, el capítulo se centra en la exposición de las formas más usuales en las que las partículas interaccionan con el material activo de los detectores para generar una señal. La discusión se divide según la carga eléctrica de las partículas incidentes. En primer lugar se discuten las interacciones de las partículas neutras, y más concretamente los fotones. Los fotones interaccionan, principalmente, a través del efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares. En el efecto fotoeléctrico el fotón cede toda su energía a un electrón de un átomo del material, produciendo un electrón libre y un átomo ionizado. Los átomos ionizados suelen aparecer en un estado excitado. El proceso de desexcitación genera luz en un proceso conocido como fluorescencia. En el efecto Compton por el contrario, el fotón cede únicamente una parte de su energía a electrones libres (o prácticamente libres) dando lugar a otro electrón y fotón con energías y direcciones diferentes. Finalmente, se analiza el proceso de producción de pares, en el que el fotón interacciona con el campo eléctrico de algún núcleo dando lugar a un par electrón-positrón.

El efecto fotoeléctrico es el dominante para energías bajas de los fotones, mientras que a energías altas la producción de pares es el proceso más probable. Seguidamente, se analizan las interacciones de los neutrones de energía baja o moderada, describiendo brevemente los procesos de “scattering”, absorción y fisión; y también las interacciones de hadrones neutros de alta energía.

Una vez descritas las interacciones de partículas con carga neutra se pasa a la descripción de las interacciones con partículas con carga eléctrica. La primera interacción es la ionización y/o excitación, como proceso en el que la partícula incidente cede algo de su energía a un electrón del átomo, excitándolo o ionizándolo completamente. La pérdida de energía media viene dada por la fórmula de Bethe-Bloch, aunque con frecuencia se utiliza la pérdida de energía media específica o “Stopping Power” que absorbe la mayor parte de la dependencia con el material al dividir por la densidad. En segundo lugar se discute el proceso de Bremsstrahlung por el que la partícula cargada en presencia del campo de un núcleo o un electrón del medio, es acelerado, emitiendo un fotón. En este punto, se comparan las probabilidades relativas de que ocurra ionización o bremsstrahlung en función de la energía incidente de la partícula, dominando la primera a bajas energías y la segunda a energías altas. El siguiente proceso considerado es el “multiple scattering” que consiste en un conjunto de interacciones Coulombianas consecutivas que la partícula sufre al pasar por la cercanía de los núcleos de los átomos. El efecto neto sufrido por la partícula es un cambio de dirección global y un desplazamiento transversal neto, que dependen del número de longitudes de radiación de material que atraviesa y del momento de la partícula. La siguiente interacción considerada es el conocido como efecto “Cerenkov” por el que las partículas que viajan a una velocidad mayor que la luz en un medio concreto emiten luz de una frecuencia relacionada con su velocidad. Finalmente se analizan también procesos de interacción nuclear para partículas con carga.

La parte final del tema se dedica a la descripción de algunos sistemas de detección clásicos como son los centelleadores, las cámaras de ionización de gas, o los detectores de estado sólido basados en silicio. En relación a estos últimos, este tema incluye una práctica de laboratorio dedicada a estudiar más en detalle este tipo de tecnología. Los detalles se dan al final de esta sección. El último elemento de este tema da una panorámica de la morfología y características típicas de los grandes detectores de partículas instalados en grandes aceleradores como el LHC.

Actividades

| Ejercicios de clase |
|--|
| Ejercicios de aplicación de fórmulas de interacción entre partículas y la materia |
| Trabajos de evaluación continua |
| Trabajo bibliográfico sobre aplicaciones tecnológicas de la detección de partículas |
| Práctica de laboratorio |
| “Introduction to semiconductors radiation detectors: Transient Current Technique characterization of a PIN semiconductor diode using a 670 nm laser” |

Práctica de laboratorio

La práctica de laboratorio constituye una introducción a los detectores de radiación basados en semiconductores. El título de la práctica es “Transient Current Technique characterization of a PIN semiconductor diode using a 670 nm laser”. El objetivo fundamental de este experimento es el de observar y medir las características de la corriente generada en un diodo del tipo n-in-p cuando éste se ilumina con un láser con una longitud de onda $\lambda = 670$ nm. Este montaje emula el comportamiento del diodo cuando es atravesado por otro tipo de partículas, como partículas α entre otras. El dispositivo experimental asociado a esta práctica puede verse esquematizado en la Fig. 1.2.

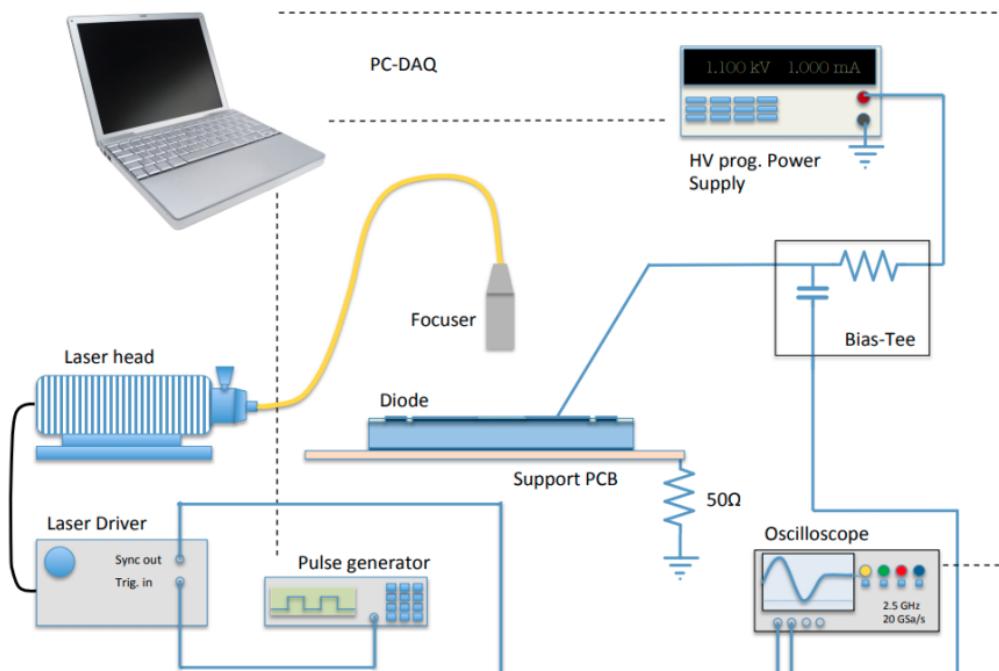


Figura 1.2: Esquema del montaje experimental para la realización de la práctica de laboratorio.

El desarrollo de esta práctica requiere que los alumnos se familiaricen con los fundamentos de la física de dispositivos semiconductores como los diodos. Los alumnos harán cálculos para determinar la forma del campo eléctrico en el interior del diodo, la “depletion depth”, o el nivel de dopado de los semiconductores. Las medidas principales son la curva “Voltaje de Bias vs. Intensidad”, y la curva “Voltaje de Bias vs. carga recolectada”. A partir de dichas curvas los alumnos estimarán las cantidades requeridas.

Tema 3: La ecuación de Dirac

Objetivos

Este capítulo tiene como objetivo presentar la ecuación de Dirac que rige la dinámica

de las partículas fermiónicas. En el proceso de derivación de la ecuación se exponen las motivaciones teóricas que llevaron a su desarrollo. Igualmente, el tema profundiza en las implicaciones que la ecuación tiene desde el punto de vista de la aparición de un nuevo tipo de materia, la antimateria, o del surgimiento del espín como una propiedad inherente de las partículas.

Resultados del aprendizaje

- Conocer y saber derivar las expresiones de la densidad y la corriente de probabilidad para la ecuación de Schrödinger.
- Conocer la derivación de la ecuación de Klein-Gordon a partir de la expresión de la energía relativista y sus expresiones para la densidad y la corriente de probabilidad.
- Entender el problema de la energía y densidad de probabilidad negativas para la ecuación de Klein-Gordon.
- Entender la derivación de la ecuación de Dirac como un intento de linearizar la ecuación de Klein-Gordon para evitar el problema de la energía negativa y sus expresiones de densidad y corriente de probabilidad.
- Entender el concepto de “espinor”.
- Manejar con destreza la ecuación de Dirac prestando atención al álgebra de comunicación de sus matrices.
- Saber cómo derivar soluciones de onda plana para la ecuación de Dirac.
- Entender el surgimiento de la antimateria como una nueva especie de partícula que se corresponde con los estados de energía negativos.
- Entender el surgimiento del espín como una magnitud que necesariamente ha de añadirse al momento angular orbital para que éste commute con el Hamiltoniano asociado a la ecuación de Dirac.
- Entender el concepto de helicidad.
- Saber cómo derivar soluciones de onda plana para la ecuación de Dirac, que sean simultáneamente autoestados de la helicidad.
- Entender el concepto de paridad y conjugación de carga y su relación con los espinores de la ecuación de Dirac.

Contenidos

El tema comienza con un cálculo de la densidad y corriente de probabilidad, junto con su ecuación de continuidad para la ecuación de Schrödinger. Tras esta derivación se evalúa la densidad de probabilidad para una onda plana obteniendo un valor estrictamente positivo. A continuación, se deriva la ecuación de Klein-Gordon, partiendo de

la relación energía-momento relativista y haciendo las correspondientes sustituciones de la energía como derivada temporal y del momento como el gradiente espacial. Para esta nueva ecuación se calculan de nuevo la densidad de probabilidad y su corriente. Al evaluar en la ecuación una onda plana se observan dos cosas: existen soluciones de energía tanto positivas como negativas; y la densidad de probabilidad es proporcional a la energía y por lo tanto, no es estrictamente positiva. La interpretación probabilística de la ecuación de Klein-Gordon es por lo tanto inconsistente.

Una vez expuesto el problema se incide en el hecho de que la existencia de soluciones con energías negativas parece estar relacionada con la aparición en la ecuación de Klein-Gordon de una derivada temporal de segundo orden. En este punto, se expone cómo Paul Dirac intentó resolver el problema encontrando una ecuación que sólo involucrase derivadas de primer orden. Es evidente que para mantener la consistencia con la relación de energía-momento relativista, al elevar al cuadrado la ecuación linearizada de Dirac debía obtenerse la ecuación de Klein-Gordon. Para que esto sea posible es necesario añadir unos coeficientes a los términos de la ecuación linearizada α_i y β , que además para reproducir la ecuación de Klein-Gordon han de ser matrices de dimensión 4x4, cumpliendo además reglas de anticommutación $\{\alpha_i, \alpha_j\} = 0$ con $i \neq j$ y $\{\alpha_i, \beta\} = 0$. De esta forma queda establecida la ecuación de Dirac como una ecuación de dimensión cuatro y por lo tanto la función de onda ha de contar con cuatro componentes formando lo que se conoce como un “espinor”.

Una vez la ecuación de Dirac ha sido establecida se estudia su comportamiento desde el punto de vista del momento angular orbital. El comutador $[H, \vec{L}]$ es calculado para la ecuación de Dirac, poniéndose de manifiesto su no nulidad, lo que implica la imposibilidad de encontrar una base común de autoestados de la energía y el momento angular. Utilizando el resultado del comutador, se define un operador \vec{S} que hace que el comutador $[H, \vec{L} + \vec{S}]$ se cancele. Dicho operador involucra a las matrices de Pauli y puede claramente relacionarse con la definición del espín clásico, introducido ad hoc en la teoría de Schrödinger. De esta forma, queda establecido el espín como un momento angular intrínseco que surge de manera natural en el contexto de la ecuación de Dirac.

A continuación se procede a introducir la ecuación de Dirac en su versión covariante. Para ello, se multiplica a la ecuación de Dirac obtenida previamente por la matriz β de modo que se definen las matrices γ^μ con $\gamma^0 = \beta$ y $\gamma^i = \beta\alpha^i$. Las nuevas matrices cumplen las relaciones de anticomutación $\{\gamma^i, \gamma^j\} = 2g^{i\mu\nu}$, en donde $g^{\mu\nu}$ es la métrica de Minkowski. Con esta nueva formulación, y con la definición del espinor adjunto, se procede al cálculo de la densidad y corriente de probabilidad, observándose que la densidad de probabilidad es siempre estrictamente positiva, y que por tanto la ecuación de Dirac proporciona resultados consistentes desde el punto de vista de una interpretación probabilística. Por otro lado, se evalúan en la ecuación de Dirac soluciones de tipo onda plana, para ver qué condiciones tienen que cumplir los espinores para ser soluciones efectivas de la ecuación. Se obtienen un total de cuatro soluciones diferentes, dos con energía positiva y dos con energía negativa.

En este punto, y por simple interés histórico, se repasan algunas interpretaciones de las soluciones de energía negativa, como son la interpretación de Dirac (soluciones de

energía negativa como huecos de energía positiva en un mar lleno de electrones de energía negativa) o la interpretación de Feynman-Stückelberg (soluciones de energía negativa como partículas propagándose hacia atrás en el tiempo). Desde un punto de vista experimental, se incide en el descubrimiento del positrón como primera antipartícula por parte de Anderson. Finalmente, se procede con la interpretación moderna en el que las soluciones de energía negativa pueden asimilarse dentro de soluciones de energía negativa con un espinor de una nueva especie, el espinor de antipartícula. De esta forma, resulta posible elegir una base de cuatro soluciones de onda plana en las que todas ellas tienen energía positiva, siendo dos, espinores de partícula, y otros dos espinores de antipartícula. A continuación se procede a la introducción del operador de conjugación de carga que transforma a los espinores de partícula en espinores de antipartícula y viceversa.

Finalmente, el tema introduce el concepto de helicidad como un observable cuyo número cuántico resulta conveniente en el contexto de la ecuación de Dirac. Puesto que el Hamiltoniano de Dirac y la helicidad comutan, es posible obtener una base de cuatro soluciones que sean autoestados de los dos. La derivación se lleva a cabo resolviendo la ecuación de autovalores asociada a la helicidad sobre los autoestados del Hamiltoniano calculados previamente. Como resultado de este cálculo se obtiene la base de soluciones de la ecuación de Dirac en la que se tienen dos estados de partícula, una con helicidad positiva y otra con helicidad negativa, y dos estados de antipartícula, también con los dos estados de helicidad posibles. Como último elemento del tema se introduce el operador paridad para indicar cómo su autovalor asociado adquiere signo contrario para las partículas y las antipartículas.

Actividades

| Ejercicios de clase |
|---|
| Resolución de problemas sencillos relacionados con las propiedades de las matrices γ^μ |
| Resolución de problemas sencillos utilizando las propiedades de la ecuación de Dirac |
| Cálculo de densidades y corrientes de probabilidad para casos concretos |
| Trabajos de evaluación continua |
| Demostración sobre la mínima dimensión necesaria para las matrices α^i y β |
| Demostración de la invarianza-Lorentz de la ecuación de Dirac |
| Discusión y presentación en clase del artículo sobre el descubrimiento del positrón |
| Resolver el átomo de hidrógeno utilizando la ecuación de Dirac |

Tema 4: Interacción por intercambio de partículas

Objetivos

Este tema tiene como objetivo principal el tratamiento de las interacciones entre partículas en el contexto de experimentos de colisión. El tema profundiza en los conceptos

de tasa de transición y sección eficaz y deriva expresiones para calcularlas a partir de la regla de oro de Fermi, utilizando los conceptos de densidad de estados y elemento de matriz. En segundo lugar, el tema incide en el concepto de interacción como un intercambio de partículas, para acabar explicando los conceptos de partícula virtual, diagramas de Feynman usando el electromagnetismo como ejemplo.

Resultados del aprendizaje

- Entender el concepto de tasa de transición y el significado de la regla de oro de Fermi.
- Entender el concepto de densidad de estados y ser capaz de derivar su expresión para casos sencillos.
- Entender el concepto de elemento de matriz así como de su naturaleza perturbativa.
- Entender los parámetros de un experimento de colisión de partículas y derivar a través de ellos el concepto de sección eficaz.
- Ser capaces de derivar expresiones para la tasa de transición y sección eficaz para casos sencillos atendiendo únicamente a la densidad de estados.
- Entender el concepto de interacción como un intercambio de partículas.
- Entender el concepto de diagrama de Feynman y ser capaces de identificar sus propiedades básicas.
- Identificar el Hamiltoniano o potencial de interacción en la electrodinámica cuántica.
- Entender y derivar la forma del elemento de matriz para una interacción electromagnética sencilla.
- Comprender los elementos básicos de las reglas de Feynman y ser capaces de aplicarlas a casos sencillos.

Contenidos

El tema comienza introduciendo el concepto de tasa de transición como la probabilidad por unidad de tiempo de que una partícula efectúe una transición a un estado diferente (por ejemplo, un decaimiento a otras partículas). Se incide en la importancia de esta magnitud como uno de los observables básicos en los experimentos de física de partículas. A continuación se discute la regla de oro de Fermi presentando sus dos componentes fundamentales: la densidad de estados y el Elemento de Matriz.

El tema continúa profundizando en el concepto de densidad de estados expandiendo su expresión en términos de integrales y deltas de Dirac que hagan explícitas la conservación de la energía y el momento. En este punto, resulta aún más evidente la definición de esta magnitud como el número de estados finales posibles, compatibles con la energía inicial del sistema por unidad de volumen. El siguiente paso consiste en el cálculo de la densidad

de estados para una partícula que decae en otras dos partículas. El cálculo parte de un volumen con forma cúbica en el que la aplicación de las condiciones de contorno hace que el momento de las partículas sufra una cuantización. Dentro de ese esquema, se calcula el número de posibles estados dn por unidad de volumen en función del número de posibles valores del momento $|d\vec{p}|$. A continuación se desarrolla este término utilizando el elemento de volumen esférico $|d\vec{p}| = p^2 \sin(\theta) d\phi d\theta dp$. Asumiendo homeogeneidad en el espacio de momento se integran las coordenadas angulares obteniéndose $4\pi p^2 dp$. Finalmente, se utiliza la relación energía-momento relativista para relacionar el módulo del momento con la energía para llegar de esta manera a la expresión final. A continuación se utilizan estas expresiones para calcular la dependencia cinemática del elemento de matriz para el caso en el que una partícula decae en el sistema de referencia de su centro de masas obteniendo.

Tras la definición de la tasa de transición, se presenta el esquema tradicional de los experimentos de colisión en el que dos haces de partículas colisionan entre sí. En este contexto, se define el concepto de flujo asociado a un haz, y se introduce la probabilidad por unidad de tiempo y partícula de que se produzca una interacción. En este contexto se define la sección eficaz de interacción, aportando su interpretación geométrica y exponiendo también el concepto de sección eficaz diferencial. Una vez halladas las expresiones de la sección eficaz se calcula para casos concretos como la colisión de dos partículas en el sistema de referencia del centro de masas y en el sistema de referencia de laboratorio en el que una de las partículas está en reposo.

Una vez analizadas las propiedades de la densidad de estados, el tema continúa desarrollando el elemento de matriz como la parte de la regla de oro de Fermi que contiene la dinámica de la interacción. En primer lugar, se parte de la expresión perturbativa del elemento de matriz y se desarrolla el concepto de intercambio de partículas. A tal efecto, se modeliza el proceso de interacción como compuesto por un estado inicial en el que están presentes las dos partículas que interactúan, a y b , un estado intermedio en el que una de las partículas iniciales, a , decae en otras dos, $a \rightarrow c + x$, siendo x absorbida por la partícula b y transformándose en d , $b + x \rightarrow d$, y un estado final en el quedan como resultantes c y d . En este esquema, en el que se han identificados los estados iniciales, finales e intermedio, es posible calcular el elemento de matriz introduciendo el potencial de interacción V . En este punto se pone de manifiesto la arbitrariedad introducida en el planteamiento anterior al haber atribuido a la partícula a el papel de emisor y a la partícula b el papel de receptor. Para resolver la arbitrariedad, se suma al elemento de matriz, la contribución correspondiente a la inversión de papeles entre a y b , obteniéndose así una expresión final para el elemento de matriz $T_{ab \rightarrow cd}$. Llegados a este punto, se define un elemento de matriz invariante Lorentz, $M_{ab \rightarrow cd}$, utilizando funciones de onda normalizadas a dos veces el valor de la energía. De manera trivial, $M_{ab \rightarrow cd}$ y $T_{ab \rightarrow cd}$ se relacionan a través de los productos de las energías de las partículas involucradas, y por lo tanto, puede utilizarse la expresión obtenida para $T_{ab \rightarrow cd}$ para derivar la expresión de $M_{ab \rightarrow cd}$, que ahora tendrá una expresión manifiestamente invariante Lorentz: $M_{ab \rightarrow cd} = \langle \Psi_c | V_{int} | \Psi_a \rangle \frac{1}{q^2 - m_x^2} \langle \Psi_d | V_{int} | \Psi_b \rangle$. De esta manera, se establece una identificación entre el elemento de matriz y los llamados diagramas de Feynman. Y en este contexto se introduce también el concepto de partícula virtual para hacer referencia a aquellas partículas que propagan la fuerza y cuyos estados no se corresponden con sus estados de masa.

El siguiente desarrollo del tema persigue la aplicación de estos conceptos al caso particular de la fuerza electromagnética. Para ello, se repasa el concepto de teoría Gauge, que en el caso del electromagnetismo, derivará de una transformación de fase local del tipo $\Psi' = e^{-i\alpha(x)}\Psi$ que se corresponde con un grupo de tipo U(1). Dicha transformación propicia la aparición de un término $-q_e\gamma^\mu A_\nu \Psi$ en la ecuación de Dirac, pudiéndose identificar el potencial de interacción con $V_{int} = q_e\gamma^0\gamma^\mu A_\mu$, siendo A_μ el cuadripotencial vector. Introduciendo este resultado en la expresión del elemento de matriz $M_{ab \rightarrow cd}$, puede desarrollarse el término como $M_{ab \rightarrow cd} = \langle \Psi_c | q_e \gamma^0 \gamma^\mu | \Psi_a \rangle \frac{A_\mu A_\nu}{q^2 - m_x^2} \langle \Psi_d | q_e \gamma^0 \gamma^\nu | \Psi_b \rangle$. Tras las correspondientes integraciones de momento y sustituyendo las funciones de onda por sus espinores, y en el caso del cuadripotencial vector, sumando a todos los posibles estados de polarización ϵ_ν^λ , se obtiene $M_{ab \rightarrow cd} = \langle \Psi_c | q_e \gamma^0 \gamma^\mu | \Psi_a \rangle \sum_{\lambda} \frac{\epsilon_\mu^\lambda \epsilon_\nu^\lambda}{q^2 - m_x^2} \langle \Psi_d | q_e \gamma^0 \gamma^\nu | \Psi_b \rangle = [\bar{u}_c q_e \gamma^\mu u_a] \frac{-g_{\mu\nu}}{q^2} [\bar{u}_d q_e \gamma^\nu u_b]$. Finalmente se definen las cuadricomponentes $j_{ac}^\mu = \bar{u}_c \gamma^\mu u_a$ y $j_{bd}^\nu = \bar{u}_d \gamma^\nu u_b$, de manera que el elemento de matriz puede escribirse fácilmente como: $M_{ab \rightarrow cd} = q_e^2 \frac{j_{ac} j_{bd}}{q^2}$.

Finalmente, el tema generaliza el desarrollo para enumerar las reglas de Feynman para el electromagnetismo en el que las líneas entrantes y salientes de los diagramas aportan sus espinores o espinores adjuntos respectivamente, los vértices aportan el término $i q_e \gamma^\mu$ y los fotones de intercambio el término $-i \frac{g_{\mu\nu}}{q^2}$.

Actividades

| Ejercicios de clase |
|--|
| Ejercicios acerca de la validez de diagramas de Feynman propuestos |
| Dibujar diagramas de Feynman asociados a procesos sencillos |
| Cálculo de cantidades relevantes en procesos de scattering |
| Trabajos de evaluación continua |
| Demostrar el origen del término de interacción electromagnético aplicando la transformación local gauge U(1) y observando su efecto en la Lagrangiana de Dirac |
| Demostrar cuál es el número de estados posibles de polarización de un fotón |
| Demostrar que la suma de los vectores de polarización de los fotones es igual a menos el tensor métrico de Minkowski |

Capítulo 5: Aniquilación electrón-positrón

Objetivos

Este tema tiene como objetivo el cálculo detallado de la sección eficaz y de la sección eficaz diferencial del proceso de aniquilación electrón-positrón. En el cálculo del elemento de matriz correspondiente se tendrán en cuenta todos los posibles estados de helicidad de las partículas entrantes y salientes, prestando atención a las diferencias entre diferentes combinaciones. El tema introduce finalmente el concepto de quiralidad como límite de la

helicidad para partículas sin masa.

Resultados del aprendizaje

- Entender las diferencias entre un haz polarizado de fermiones (helicidad única bien determinada) o un haz no polarizado (mezcla de helicidades).
- Ser capaz de aplicar las reglas de Feynman para el caso de la aniquilación electrón-positrón utilizando los espinores autoestados de la helicidad.
- Entender que las contribuciones a la sección diferencial de este proceso dependen fuertemente de las helicidades de las partículas entrantes y salientes.
- Entender el concepto de quiralidad.
- Comprender y saber realizar cálculos sencillos con los operadores de proyección quiral.

Contenidos

Este tema comienza describiendo las condiciones de helicidad en las que se suelen producir la mayor parte de los experimentos de colisión de fermiones. Salvo en algunos experimentos específicos donde los haces de fermiones son filtrados y preparados convenientemente, su composición de helicidades suele contener una mezcla equiprobable de estados positivos y negativos. La sección eficaz total del proceso vendrá dada por la suma de las secciones eficaces de interacción asociadas a cada combinación de helicidad entrante, pero también a cada combinación de helicidad saliente. Por lo tanto resulta necesario calcular los elementos de matriz $M_{XY \rightarrow X'Y'}$ en donde X, Y, X' e Y' hacen referencia a las helicidades de las dos partículas entrantes y salientes respectivamente.

En el resto del capítulo se llevan a cabo estos cálculos aplicando las reglas de Feynman con los espinores autoestados de la helicidad correspondientes. Para simplificar la tarea, se asumirá en todo momento que las partículas se encuentran en el límite relativista en el que $m \approx 0$. El cálculo de las corrientes para cada caso y su producto refleja cómo aquellas combinaciones en las que las partículas entrantes o salientes tienen la misma helicidad entre sí, el elemento de matriz se anula. Esto permite identificar los diferentes casos simplemente a través del estado de helicidad de la partícula entrante o saliente, ya que la correspondiente antipartícula ha de tener helicidad opuesta para que el elemento de matriz no sea nulo.

En estas condiciones se calculan las secciones eficaces diferenciales para los cuatro casos posibles $M_{R \rightarrow R}$, $M_{R \rightarrow L}$, $M_{L \rightarrow R}$, $M_{L \rightarrow L}$, en donde en este caso la helicidad hace referencia únicamente a la partícula (en oposición a la antipartícula). Los resultados arrojan el siguiente resultado: las secciones eficaces diferenciales de los casos con igual helicidad, RR o LL, contribuyen con un término $(1 + \cos(\theta))^2$ y por lo tanto tienen mayor probabilidad de que la partícula (antipartícula) saliente vaya en una dirección parecida a la de la partícula (antipartícula) incidente. Por el contrario los casos RL y LR contribuyen

con un término $(1 - \cos(\theta))^2$, haciendo que la probabilidad sea mayor de que la partícula (antipartícula) saliente vaya en la dirección de la antipartícula (partícula) entrante. Finalmente, se comparan estos resultados con las medidas de algunos experimentos del siglo XX que estudiaron el proceso en detalle.

El tema continúa introduciendo el concepto de quiralidad. La quiralidad es un operador que coincide con la helicidad en el caso de partículas no masivas. En ese límite los autoestados de helicidad son también autoestados de la quirilidad. Fuera de ese límite los autoestados de helicidad positiva tienen una componente no nula de los dos estados de quiralidad. Resulta práctico para obtener dicha componente definir los operadores de proyección quiral P_R y P_L que proyectan un estado cualquiera sobre el espacio de quiralidad “left-handed” y “right-handed” respectivamente. Las propiedades observadas anteriormente acerca del valor de los elementos de matriz puede ponerse en términos de la quiralidad. Esto resulta particularmente relevante, ya que la fuerza débil que se explicará a continuación tiene un comportamiento muy diferente desde el punto de vista de la quiralidad.

Actividades

| Ejercicios de clase |
|---|
| Ejercicios sobre el cálculo de elementos de matriz para fermiones polarizados |
| Ejercicios acerca de las propiedades de los operadores de proyección quiral |
| Trabajos de evaluación continua |
| Relacionar las reglas de selección de helicidad con el spin de las partículas |

Tema 6: La interacción electrodébil

Objetivos

Este tema tiene como objetivo proporcionar una descripción de los fundamentos básicos de la fuerza débil. El punto de partida será el análisis de las propiedades de paridad de la fuerza electromagnética así como el experimento de Madame Wu que demostró que existían interacciones que violaban dicha paridad. Posteriormente se derivarán reglas de Feynman que sean capaces de violar la paridad y se identificarán éstas con la fuerza débil. Finalmente, el tema construye la teoría débil a través de un principio de invarianza Gauge y proporciona el mecanismo de unificación de las fuerzas electromagnética y débil.

Resultados de aprendizaje

- Entender el concepto de paridad y el significado de que un proceso físico no la conserve.
- Comprender la relevancia del experimento de Madame Wu.

- Ser capaces de derivar cuadri-corrientes con capacidad para violar la paridad del sistema y relacionarlas con las propiedades quirales de las partículas.
- Comprender la relevancia del decaimiento del pion cargado.
- Conocer y entender el significado de la constante de Fermi y de los conceptos de hipercarga débil e isospin débil.
- Entender la interacción débil a través de un principio de invarianza Gauge.
- Comprender el principio de unificación de la fuerza electromagnética y débil.
- Entender el significado del ángulo de “mixing” θ .
- Ser capaces de aplicar las reglas de Feynman para la teoría electrodébil.
- Entender el concepto de resonancia y de cómo medir su anchura con datos de un acelerador hadrónico.

Contenidos

El tema comienza analizando la invarianza de los elementos de matriz M de la electro-dinámica cuántica cuando sobre sus espinores se ejecuta una transformación de paridad. A continuación, se introduce el experimento de Madame Wu en el que a través del estudio de decaimientos de núcleos de Cobalto se observó una violación de la paridad, sugiriendo que el origen de la interacción que había provocado los decaimientos era diferente a la electromagnética. En este punto, se introducen los conceptos de bilineales covariantes como escalares, pseudoescalares, axial, axial-vector, etc; y se comprueba cómo el uso de reglas de Feynman con vértices que contengan una combinación lineal de un bilineal axial y axial-vector ($\gamma^\mu + a\gamma^5\gamma^\mu$) proporciona una violación de paridad, desde el punto de vista de que el elemento de matriz es diferente cuando se transforman los espinores a través del operador de paridad. Se establece que los experimentos determinan que la violación de paridad ha de ser máxima, lo cuál hace coincidir la forma de los vértices con los operadores de proyección quiral para partículas y antipartículas respectivamente. Finalmente se identifican estas propiedades con la fuerza débil, mostrándose cómo este tipo de interacción puede verse como una interacción que sólo es efectiva con la parte “left-handed” (“right-handed”) de las (anti)partículas. A continuación se analiza uno de los casos más paradigmáticos en el que este efecto se manifiesta ampliamente: el decaimiento del pion cargado. Este proceso se analizará en detalle, estimando cuál es la fracción de quiralidad “left-handed” tienen los electrones y muones de helicidad positiva y negativa respectivamente. En este punto, se muestran las reglas de Feynman para este tipo de interacción prestando atención a la constante de la fuerza débil.

Una vez analizada esta fenomenología, se procede a introducir la interacción débil como una teoría Gauge, en la que se establecen transformaciones de simetría $SU(2)_L$ y se construyen los nuevos espinores asociados a la fuerza débil como elementos de un espacio de 2 dimensiones que se corresponden con la fracción de leptón cargado y neutrino de dicho elemento. La aplicación de transformaciones de fase locales en este espacio de

dos dimensiones genera la aparición de 3 nuevas partículas de interacción W_1 , W_2 y W_3 , moduladas por las tres matrices de Pauli propias de la representación SU(2). Combinaciones de los bosones W_1 y W_2 , gracias a las propiedades de las matrices de Pauli, pueden identificarse con los bosones W^+ y W^- que se observan en las interacciones débiles que conllevan corrientes cargadas. Sin embargo, la teoría Gauge predice un nuevo bosón W_3 cuya existencia estaba ya postulada ya que los procesos de producción de pares W^+W^- con las partículas conocidas hasta la época violaban el principio de unitariedad, siendo necesaria la adición de algún diagrama adicional que mantuviese al elemento de matriz acotado.

El bosón W_3 podría ser identificado con el bosón Z , sin embargo, debido al mecanismo de ruptura de simetría por el que los bosones adquieren masa (ver 1.4.3) puede inferirse que en realidad el bosón Z , y de la misma forma el fotón A , son en realidad combinaciones lineales del estado W_3 y de un nuevo bosón B . La fracción que determina el grado de combinación se da como un ángulo, el ángulo de “mixing”. De esta forma, la fuerza electromagnética y la fuerza débil quedan unificadas como la manifestación de un mismo fenómeno. A continuación, y utilizando el ángulo de “mixing” pueden relacionarse la constante de fuerza electromagnética y la débil. Igualmente, usando las propiedades de los bosones W_3 y B pueden derivarse las reglas de Feynman para el bosón Z .

Finalmente, en este tema se realiza una práctica computacional centrada en la medida de las propiedades del bosón Z utilizando datos del experimento CMS y que se describen a continuación.

Actividades

| Ejercicios de clase |
|--|
| Ejercicio relacionado con el experimento de Madame Wu |
| Ejercicio relacionados con la fracción de quiralidad en estados de helicidad puros |
| Trabajos de evaluación continua |
| Obtener los estados de polarización de los bosones masivos |
| Actividad en grupo |
| El experimento de Madame Wu. Competición usando <i>Socrative - Space Race</i> |
| Práctica de ordenador |
| Medida de la anchura del bosón Z con datos de CMS |

Actividad en grupo

La actividad en grupo tiene su origen en el empleo de la técnica de “Flipped classroom” en la que se intercambia la parte de transmisión de conocimiento, tradicionalmente hecha en el aula durante la clase magistral, al trabajo autónomo del alumno, sustituyendo el tiempo en clase por alguna actividad de refuerzo y aplicación de los conocimientos. En

en este caso concreto, la propuesta está relacionada con el experimento de Madame Wu. Los alumnos reciben por parte del profesor, el artículo de Madame Wu sobre la violación de paridad, así como otros recursos públicos que explican el experimento. Posteriormente los alumnos se organizan en equipos y se dedica un espacio de aproximadamente 20 minutos para que dichos alumnos, trabajando en grupo, resuelven una prueba con preguntas sobre el experimento de Madame Wu. La plataforma utilizada es Socrative⁹, en su modalidad de “Space Race”, de manera que los diferentes equipos pueden ver de forma interactiva su puntuación en un formato que simula una carrera.

Práctica de ordenador

La práctica de ordenador constituye una introducción al análisis de datos en los grandes detectores de partículas como es el detector CMS. El título de la práctica es “Medida de la anchura del bosón Z con datos de CMS”. El objetivo fundamental de la práctica es que los alumnos se familiaricen con las herramientas de análisis de datos de física de partículas, como ROOT¹⁰, que repasen los conceptos de cómo funcionan los grandes detectores de partículas y que profundicen en el concepto de resonancia en el contexto de física de partículas y más concretamente en la del bosón Z.

Esta práctica se desarrolla en una aplicación tecnológica conocida como “Jupyter notebook”¹¹ que permite acceder a través del navegador, a terminales con un entorno completo de programas y datos previamente cargados. En este caso concreto, el alumno se encontrará con un entorno del lenguaje de programación Python con las librerías de la herramienta de análisis ROOT. El alumno también tendrá acceso a datos de colisiones recogidos por el experimento CMS y filtrados para contener sucesos con muones. En el transcurso de la práctica los alumnos tendrán que determinar cómo seleccionar los sucesos atendiendo a los diferentes indicadores de calidad de los objetos presentes en ellos. El objetivo final es el de obtener una gráfica aceptable de la masa invariante de los dos muones presentes en el suceso, en la que se observe la resonancia del bosón Z. Una vez obtenida esta gráfica se realizará un ajuste de dicha resonancia para estimar su anchura.

Capítulo 7: Introducción a la interacción fuerte

Objetivos

El objetivo principal de este tema consiste en dar una visión general y breve acerca de la interacción fuerte. Para ello se introduce brevemente el modelo de quarks que derivó en la existencia de una carga fuerte, el color, con tres valores posibles. En virtud de esta carga, se utiliza el principio de invarianza Gauge dando lugar a los 8 gluones que median la interacción fuerte. A continuación se discuten conceptos como el confinamiento de color y se estudia cómo construir funciones de onda adecuadas para los posibles mesones y bariones. Finalmente se detallan las reglas de Feynman para la interacción fuerte.

⁹www.socrative.com

¹⁰<http://root.cern.ch>

¹¹<http://jupyter.org>

Resultados del aprendizaje

- Entender el concepto de color como la carga asociada a la fuerza fuerte.
- Comprender el modelo de quarks y su relación con los mesones y bariones observados en la naturaleza.
- Entender el concepto de confinamiento de color.
- Entender los conceptos de isospin fuerte e hipercarga fuerte.
- Ser capaces de derivar funciones de onda para mesones y bariones sencillos; y para gluones
- Entender el concepto de hadronización y de jet.
- Entender la estructura de las reglas de Feynman para la fuerza fuerte.

Contenidos

El tema comienza exponiendo el concepto de color como la carga asociada a la fuerza fuerte y por lo tanto como una propiedad de los quarks. En base a los tres posibles valores del color, se aplica el principio de invarianza Gauge, proponiendo funciones de onda en un espacio de 3 dimensiones e imponiendo rotaciones en este espacio de acuerdo con las transformaciones del grupo SU(3). Dadas las características del grupo SU(3) la imposición de la invarianza Lagrangiana antes estas transformaciones da lugar a la aparición de 8 nuevos bosones, modulados por las matrices de Gell-Mann. A continuación se introducen también los conceptos de isospin fuerte e hipercarga fuerte.

Una vez introducidos los principios de la fuerza fuerte se profundiza en el concepto de confinamiento de color, según el cuál, los quarks sólo dan lugar a estados ligados estables cuando éstos tienen un color global neutro. Esta observación experimental impone condiciones a la manera en la que se construyen las funciones de onda de los mesones (combinaciones de 2 quarks) y bariones (combinaciones de 3 quarks), así como condiciones al número de quarks que pueden combinarse para formar estados ligados. Ejemplos acerca de la construcción de funciones de onda de mesones y bariones son estudiados en este punto. A continuación, se estudian las funciones de onda de los gluones. Puesto que los gluones no son estables, su color neto no ha de ser neutro, dando lugar a 8 posibles gluones con combinaciones de color y anticolor.

Posteriormente se estudian las interacciones de los gluones consigo mismos y se presenta el concepto de hadronización. Dos quarks producidos en libertad interaccionan a través de redes de gluones que acaban dando lugar a nuevos quarks que se combinan con los iniciales para producir estados neutros de color. Este proceso es conocido como hadronización y su huella en los detectores de partículas es lo que se conoce como un “jet”. Finalmente se explican los experimentos de producción de jets en interacciones electromagnéticas como una manera de confirmar la multiplicidad debida al color así como las cargas fraccionales de los quarks. Para concluir, el tema presenta de forma somera las

reglas de Feynman para el caso de la fuerza fuerte incluyendo la evolución de los factores de color y sus sumas.

Actividades

| Ejercicios de clase |
|---|
| Cálculos sencillos de factores de color con las matrices de Gell-Mann |
| Trabajos de evaluación continua |
| Resumen y breve presentación del resultado sobre pentaquarks de LHC-b en 2015 |

Capítulo 8: El bosón de Higgs

Objetivos

Este tema tiene como objetivo presentar una introducción al mecanismo de ruptura de simetría propuesto por Brout, Englert y Higgs, por el cuál las partículas del Modelo Estándar adquieren masa a través de una interacción con un bosón escalar llamado Bosón de Higgs.

Resultados del aprendizaje

- Entender el problema que los bosones W^+ , W^- y Z presentaban por el hecho de ser masivos, al provocar los términos de masa que la Lagrangiana no fuese invariante ante las transformaciones Gauge correspondientes.
- Entender el Mecanismo de Ruptura de Simetría a través de la introducción en la Lagrangiana de un campo escalar con un potencial del tipo $V(\Phi) = \mu^2\Phi^2/2 + \lambda\Phi^4/4$.
- Entender que el desarrollo del nuevo campo en torno a su mínimo da lugar a un término de masa en la lagrangiana.
- Entender el concepto de bosón de Goldstone.
- Entender cómo aplicar este concepto al caso de una teoría Gauge U(1).
- Entender cómo aplicar este concepto al Modelo Estándar con una teoría Gauge $U(1)\times SU(2)_L$: aparición de los bosones A , W^+ , W^- y Z .
- Entender de forma breve el mecanismo por el que los fermiones adquieren masa incluyendo el mecanismo de “seesaw” y el concepto de masa de Majorana.

Contenidos

Este capítulo comienza describiendo los problemas que surgen en la Lagrangiana de un supuesto Modelo Estándar con bosones de intercambio masivos. En efecto, la aparición

de dichos bosones hace que la Lagrangiana no sea invariante ante transformaciones Gauge U(1) y $SU(2)_L$. Con objeto de resolver este problema, Brout, Englert y Higgs, desarrollaron un mecanismo basado en la introducción de un nuevo campo escalar Φ dotado de un potencial con la estructura: $V(\Phi) = \mu^2\Phi^2/2 + \lambda\Phi^4/4$. En el caso de un campo escalar de una dimensión, el mínimo de potencial no se encuentra para el valor nulo del campo, sino para dos valores $\Phi = \pm v$ distintos de 0. La naturaleza romperá la simetría escogiendo uno de los dos, de manera, que se puede redefinir el campo en torno a dicho mínimo de la forma $\Phi = v + \eta(x)$. Escribiendo la Lagrangiana en términos de este nuevo campo η es posible comprobar que este mecanismo hace surgir un término de masa para el nuevo campo η .

A continuación se desarrolla este concepto en términos de una teoría gauge U(1). Para ello, se define un campo análogo al anterior pero en el dominio complejo $\Phi = \Phi_1 + i\Phi_2$ y de nuevo un potencial de tipo $V(\Phi) = \mu^2\Phi^2/2 + \lambda\Phi^4/4$. El mínimo del potencial es un conjunto infinito de puntos que cumplen que $\Phi_1^2 + \Phi_2^2 = v^2$. En estas condiciones se redefinen nuevos campos en torno al mínimo, elegido sin pérdida de generalidad como un número real en $\Phi = v$. Los nuevos campos son: $\Phi = v + \eta(x) + i\xi(x)$. En este punto, se exige que la Lagrangiana asociada a estos campos, que incluye el término cinemático y el de potencial, sea invariante bajo transformaciones Gauge $\Phi' = e^{-i\alpha(x)}\Phi$, dando lugar a la aparición de un nuevo bosón Gauge B . El desarrollo de la Lagrangiana completa en términos de η y ξ , eligiendo los Gauge adecuados para el bosón B da lugar a una Lagrangiana en la que aparecen los términos cinéticos de $\eta(x)$ y el bosón B ambos con un término de masa, y los correspondientes términos de interacción entre ellos y entre sí mismos.

Una vez explicado el mecanismo para el caso sencillo de una teoría U(1), el concepto se aplica al Modelo Estándar. Puesto que en este modelo hay un total de 3 bosones masivos, es necesario ampliar la dimensión del campo Φ , por lo que se escoge como un doblete de dos campos complejos $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2)$. Finalmente, el procedimiento llevado a cabo en detalle para el caso de U(1) se repite de forma superficial para el caso $U(1) \times SU(2)_L$, mostrando cómo al final, en este contexto, es posible redefinir los bosones de intercambio para que sus términos de masa aparezcan en la Lagrangiana.

La parte final del capítulo se dedica a describir de manera muy superficial cómo el mecanismo de Brout-Englert-Higgs permite también que los fermiones adquieran masa a través del mecanismo seesaw. Finalmente se discuten brevemente conceptos como la masa de Majorana y las masas de los neutrinos.

Actividades

Trabajos de evaluación continua

Resumen y breve presentación del descubrimiento del bosón de Higgs por parte de CMS y ATLAS en el año 2012

Bibliografía

- [1] Jérôme Bindé and colaboradores, Hacia las sociedades del conocimiento, Publicaciones de la UNESCO, 2005, 240, <http://www.unesco.org/publications>
- [2] C. Yaniz and L. Villardon, Planificar desde competencias para promover el aprendizaje, 2006, Universidad de Deusto, Bilbao, Cuadernos monográficos del Instituto de Ciencias de la Educación, núm. 12
- [3] M. A. Zabalza, La enseñanza universitaria: roles, funciones y características. In J. M. Rodríguez, editor, Seminario sobre Formación y evaluación del profesorado universitario, pages 17–42, Huelva, 1996. Instituto de Ciencias de la Educación, Universidad de Huelva
- [4] Duderstadt, J. J., The future of the University in an age of knowledge, Journal for Asynchronous Learning Networks, 1997, 1, 2, Agosto
- [5] Pimentel, J. R., Design of net-learning systems based on experimental learning, Journal for Asynchronous Learning Networks, 1999, 3, 2
- [6] Reid, I. C., Beyond models: developing a University strategy for online instruction, Journal for Asynchronous Learning Networks, 1999, 3, 1
- [7] Area, M., La oferta de educación superior a través de internet: análisis de los campus virtuales de las Universidades españolas, <http://www.edulab.ull.es/campusvirtuales/informe/documentos.htm>, 2001
- [8] Turoff, M., Designing a virtual classroom. International Conference on Computer assisted instruction, Proceedings of the ICCAI'95 conference, 1995, <http://www.shss.montclair.edu/useful/desing.html>, Taiwan
- [9] Bergmann, J. Sams, A., Flip Your Classroom: Reach Every Student in Every Class Every Day, International Society for Technology in Education, 2012
- [10] Mark Thomson, Modern Particle Physics, University of Cambridge

Capítulo 2

Proyecto investigador

2.1. La investigación como parte esencial de la actividad universitaria

La investigación científica ocupa un papel fundamental en las sociedades actuales. Durante los siglos XX y XXI, los avances científicos han permitido establecer nuestro conocimiento básico del universo y de los fenómenos naturales. Paralelamente, la ciencia ha propiciado el desarrollo tecnológico, transformando profundamente la sociedad y convirtiéndose en un factor de desarrollo económico y humano. Además, en las últimas décadas, se observa cómo el método científico consolida su importancia como una herramienta de pensamiento crítico en el contexto de la era de la información y de la proliferación de contenidos falsos o manipulados.

La universidad ha sido siempre motor y vehículo de la investigación científica. La ley universitaria en su título VII recoge este aspecto de la siguiente forma: “La investigación científica es fundamento esencial de la docencia y una herramienta primordial para el desarrollo social a través de la transferencia de sus resultados a la sociedad. Como tal, constituye una función esencial de la universidad, que deriva de su papel clave en la generación de conocimiento y de su capacidad de estimular y generar pensamiento crítico, clave de todo proceso científico.” La función investigadora resulta, por lo tanto, una tarea de carácter central para el profesor universitario e inseparable de su actividad docente. La generación de nuevos conocimientos y el proceso de constante actualización sobre los últimos desarrollos y avances de un campo, repercuten en la calidad de la docencia, que tendrá un carácter vigente y actual. Igualmente, la investigación científica, acerca el método científico a las aulas, fomentando el pensamiento crítico y la elaboración de juicios objetivos. Finalmente, resulta esencial que los resultados científicos deriven en avances que en última instancia proporcionen un retorno positivo a la sociedad.

La Universidad de Cantabria ha mantenido desde sus orígenes un firme compromiso con la investigación científica como prueba el alto nivel de las publicaciones científicas que año tras año salen de sus departamentos e institutos de investigación. En las siguientes

líneas, expondré mi plan investigador, centrándome primero en el contexto en el que éste se desarrolla, y describiendo a continuación las principales líneas de investigación que cubrirán tanto aspectos de investigación básica como de investigación aplicada y transferencia de conocimiento.

2.2. Contexto del proyecto investigador

Este proyecto de investigación se enmarca dentro de la Física Experimental de Altas Energías y de una forma más específica dentro de la Física en Colisionadores. Las dos principales líneas de investigación expuestas en este documento tienen como escenario principal el detector de partículas Solenoide Compacto de Muones (Compact Muon Solenoid, CMS) instalado en el Gran Colisionador de Hadrones (Large Hadron Collider, LHC), así como su evolución tecnológica, que funcionará en el Gran Colisionador de Hadrones de Alta Luminosidad (High Luminosity Large Hadron Collider, HL-LHC) a partir del año 2026. Estas líneas abordarán diferentes aspectos de la Física Experimental de Altas Energías como son el análisis de datos, el desarrollo y optimización de herramientas de reconstrucción y la instrumentación de detectores. La tercera línea de investigación tiene como objetivo la aplicación de algunas de las tecnologías desarrolladas en los detectores de partículas a la resolución de problemas industriales. Finalmente, la última línea tiene que ver con el posicionamiento científico de cara a los nuevos aceleradores que serán construidos en el futuro. Existe además una línea de investigación de carácter transversal que tiene que ver con el desarrollo y aplicación de nuevas técnicas de computación basadas en aprendizaje automático a la resolución de problemas en cada una de las líneas principales.

2.2.1. Física de Altas Energías

El átomo y el descubrimiento del núcleo

La Física de Altas Energías es la disciplina que se encarga del estudio de las componentes fundamentales de la materia y sus interacciones. El origen histórico de esta disciplina se remonta al siglo XVIII, en el momento en el que John Dalton descubre que la materia está compuesta de átomos de diferentes especies, que podían ser clasificados de acuerdo a sus propiedades químicas. En las últimas décadas del siglo XIX, las diferentes especies atómicas habían sido clasificadas en la tabla periódica de los elementos. En esa época, investigaciones de Henri Becquerel y posteriormente de Pierre y Marie Curie y Ernest Rutherford establecieron la existencia de tres tipos diferentes de radiación en la naturaleza (denominadas α , β y γ). Paralelamente, J.J. Thomson, en sus investigaciones sobre *rayos catódicos*, descubrió la existencia de los electrones y determinó su masa y su carga, proponiendo un modelo atómico en el que los átomos estaban compuestos por una región de carga positiva que ocupaba la totalidad del volumen del átomo, con algunos electrones de carga negativa insertados en él. En 1911, Rutherford y sus colaboradores desarrollaron una serie de experimentos, consistentes en la interacción de radiación α con una lámina delgada de oro, en los que determinaron que la carga positiva del átomo estaba

confinada en una zona minúscula del volumen total del átomo. Rutherford propuso un modelo planetario del átomo en el que los electrones orbitaban un núcleo de carga positiva. En el caso del hidrógeno, el núcleo estaba compuesto por un protón, una partícula con una carga opuesta a la del electrón. Núcleos más pesados estaban compuestos por varios protones.

Teoría cuántica de campos, electrodinámica cuántica y modelo de quarks

Durante las primeras décadas del siglo XX, la Mecánica Cuántica y la Teoría de la Relatividad fueron desarrolladas. Bohr, en el año 1913, usó la idea de la cuantización para proponer un modelo atómico capaz de explicar el espectro de líneas de emisión de los átomos. En la década de 1930, los estudios realizados por Chadwick sobre los núcleos isotópicos, condujeron al descubrimiento del neutrón como una de las componentes del núcleo atómico. Enrico Fermi, a su vez, postuló la existencia de una nueva partícula llamada neutrino, para explicar la aparente no conservación del momento en decaimientos tipo β en el núcleo. La sucesiva aplicación de la Mecánica Cuántica a sistemas relativistas, dio lugar a los desarrollos de Paul Dirac para proporcionar una descripción relativista de los electrones que incorporase observables físicos como el spin. Esta descripción predijo también la existencia de la antimateria, que fue confirmada en el año 1932 con el descubrimiento del positrón por parte de Anderson. En esa misma década, el estudio de la radiación cósmica dio lugar al descubrimiento de una nueva partícula llamada muon. En la década de los años cuarenta, Richard Feynman estableció las bases de la electrodinámica cuántica proporcionando una descripción precisa de la interacción entre electrones y fotones. Los desarrollos tecnológicos en los años posteriores dieron lugar a varios experimentos con haces de partículas de alta energía, en los que numerosas partículas inestables fueron descubiertas. Murray Gell-Mann y George Zweig propusieron el modelo de quarks que establecía que la mayor parte de las nuevas partículas eran en realidad estados ligados de unas partículas fundamentales llamadas quarks.

El Modelo Estándar de las partículas

A principios de la década de los setenta, S. Glasgow, S. Weinberg y A. Salam propusieron un modelo para las partículas conocido actualmente como el Modelo Estándar [1–4], en el que la materia está constituida por dos tipos de partículas: leptones y quarks, ambos fermiones, y las fuerzas son transmitidas por el intercambio de bosones: el fotón para la fuerza electromagnética, los bosones W y Z para la fuerza débil y los gluones para la fuerza fuerte. Los leptones y quarks se agrupan en tres familias o *sabores*, de masa creciente. Entre los leptones encontramos al electrón, al muón y al tau y sus respectivos neutrinos, y entre los quarks, los quarks *up* y *down*, *charm* y *strange*, y *top* y *bottom*. Adicionalmente, una nueva partícula, el bosón de Higgs [5–11] fue predicha como parte de un mecanismo que permitía al resto de partículas adquirir masa. En los años siguientes, la construcción de aceleradores de partículas de potencia creciente, permitieron el descubrimiento del resto de partículas fundamentales del Modelo Estándar: los bosones W [12, 13] y Z [14, 15] en el año 1983, el quark top [16, 17] en el año 1995, y finalmente el bosón de Higgs [18, 19]

en el año 2012.

Limitaciones del Modelo Estándar

A pesar del éxito rotundo del Modelo Estándar describiendo los experimentos realizados hasta la fecha, diferentes argumentos tanto teóricos como experimentales, parecen indicar que se trata de una teoría efectiva a baja energía.

En primer lugar, desde un punto de vista teórico, el modelo depende de 19 parámetros cuyos valores son determinados experimentalmente pero cuyo origen permanece desconocido. Por otra parte, las correcciones cuánticas recibidas por la masa del bosón de Higgs debido a la presencia de partículas virtuales (fundamentalmente del quark top), deberían conferirle una magnitud comparable a la escala en la que se espera que aparezca Nueva Física. El hecho de que esto no sea así sugiere la existencia de una increíble cancelación o *fine tuning*, que da lugar a lo que comúnmente se refiere como el *problema de la jerarquía* [20, 21]. El Modelo Estándar sufre también del problema de la *trivialidad cuántica* [22] que sugiere la imposibilidad de crear una teoría cuántica de campos consistente, que involucre a un único tipo de bosón de Higgs. Finalmente, el sector *fuerte* del modelo debería incluir un término que permitiese la violación CP (carga y paridad) por parte de la fuerza fuerte. Sin embargo, los experimentos realizados hasta la fecha no han observado jamás dicho tipo de violación [23].

Desde un punto de vista experimental, existen varios fenómenos que el Modelo Estándar no es capaz de explicar. En primer lugar, el modelo no es capaz de incorporar una descripción de la gravedad, quedando esta fuerza al margen del modelo. El modelo tampoco aporta ningún candidato válido para conformar la materia oscura observada en el universo [24], ni tampoco para explicar el origen de la energía oscura [25]. Los neutrinos en el Modelo Estándar son partículas no masivas, lo cuál contradice a las medidas de oscilaciones de neutrinos [26] que implican masas distintas de cero para todos los sabores de neutrinos. El mecanismo por el que los neutrinos adquieren masa en el Modelo Estándar no está completamente bien establecido. Por último, el Modelo Estándar no es capaz de explicar la asimetría observada en el universo entre la materia y la antimateria.

Física más allá del Modelo Estándar (Nueva Física)

En las últimas décadas, varias extensiones al Modelo Estándar han surgido para intentar resolver total o parcialmente los problemas mencionados. La Supersimetría (SUSY) [27], es una de las que ha gozado de mayor popularidad en los últimos años. Este modelo postula la existencia de una simetría universal que asigna un bosón (fermión) a cada fermión (bosón) del Modelo Estándar. Las partículas supersimétricas de los fermiones contribuyen a la cancelación de las correcciones radiativas a la masa del bosón de Higgs, resolviendo así el problema de la jerarquía. A su vez, combinaciones lineales de las partículas supersimétricas de los bosones del Modelo Estándar, dan lugar a partículas masivas y neutras que resultan candidatas idóneas para conformar la materia oscura. Otros modelos, conocidos comúnmente como *modelos con dimensiones extra* [28–30], postulan la existencia de di-

mensiones espacio-temporales adicionales en las que sólo la gravedad puede operar. Estos modelos, por tanto, son capaces de proporcionar una descripción para la fuerza gravitatoria y de resolver a la vez el problema de la jerarquía. Muchos de estos ingredientes (SUSY, dimensiones extra) son recogidos en la *teoría de cuerdas* [31] en la que se abandona la concepción puntual de las partículas para dotarlas de un grado de libertad adicional en forma de longitud (cuerda). Este tipo de teoría es referida con frecuencia como *teoría del todo* por su capacidad para describir la gravedad y para proporcionar la *Gran Unificación* de las Fuerzas [32] en escalas altas de energía. Otras extensiones populares del Modelo Estándar incluyen los modelos de *Higgs compuesto* [33], en los que el bosón de Higgs se postula como un estado ligado de algún tipo nuevo de interacción fuerte.

Todos estos modelos de Nueva Física y otros no mencionados, predicen la existencia de nuevas partículas desconocidas hasta la fecha. Dichas partículas pueden ser detectadas en experimentos de colisión tanto de forma indirecta, a través de medidas de precisión de procesos del Modelo Estándar, para determinar posibles desviaciones provocadas por las correcciones cuánticas inducidas por las nuevas partículas; como de forma directa, produciéndolas en su forma resonante y determinando su presencia a través de sus productos de desintegración.

2.2.2. El Gran Colisionador de Hadrones

El LHC [34] es un colisionador de protones circular con una longitud de 27 km. Se encuentra alojado 100 metros bajo tierra atravesando la frontera franco-suiza en las proximidades de la ciudad de Ginebra. El acelerador se encuentra formado por un total de 8 sectores circulares de 2460 m, conectados por 4 regiones rectas de 540 m en los que los experimentos están ubicados. El acelerador está compuesto por 1232 imanes de tipo dipolo con cavidades de radiofrecuencia con capacidad para incrementar la energía de los protones 0.5 MeV en cada vuelta. El LHC acelera dos haces de protones en direcciones opuestas, haciendo que colisionen en 4 puntos alrededor de los cuales se han construido cuatro experimentos: ALICE [35], ATLAS [36], CMS [37] y LHC-b [38]. Una vista esquemática del acelerador puede verse en la figura 2.1. El número de sucesos de un proceso específico, producidos por unidad de tiempo en un acelerador viene dado por la probabilidad específica de dicho proceso (dada como una sección eficaz) y una magnitud conocida como luminosidad instantánea. La energía de diseño del LHC para cada haz de protones es de 7 TeV y su luminosidad instantánea nominal es $L=10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, dando lugar a alrededor de 10^{10} interacciones protón-protón por segundo.

El LHC comenzó su funcionamiento en el año 2010 operando durante los años 2010-2012 a una energía del centro de masas de $\sqrt{s}=7\text{-}8 \text{ TeV}$. En este periodo, conocido como Run 1, se acumuló una luminosidad integrada de aproximadamente 30 fb^{-1} . Durante los años 2013 y 2014, el LHC permaneció inactivo para realizar actividades de mantenimiento y mejora. En el año 2015, comenzó el llamado Run 2, con una energía del centro de masas de $\sqrt{s}=13 \text{ TeV}$. Durante la duración total del Run 2, comprendiendo los años 2016, 2017 y 2018 el LHC acumuló una luminosidad integrada de aproximadamente 150 fb^{-1} . En el año 2022, se espera que el LHC comience el Run 3, con una energía del centro de masas aún

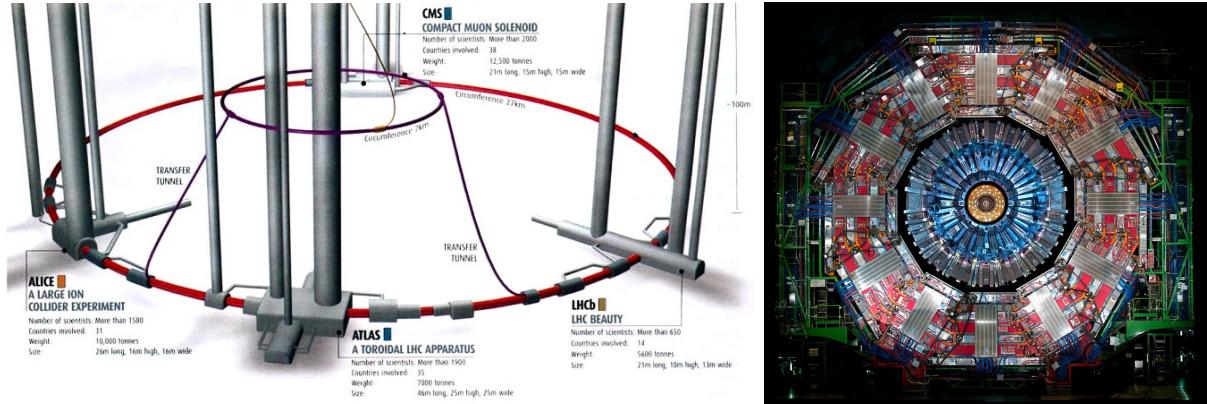


Figura 2.1: Esquema del LHC incluyendo la localización de los cuatro experimentos, así como parte de la cadena de aceleración e inyección (izquierda). Fotografía transversal del detector CMS (derecha).

por determinar, en el rango $\sqrt{s}=13\text{-}14$ TeV y con una previsión de luminosidad integrada de otros 150 fb^{-1} aproximadamente.

2.2.3. El Solenoide Compacto de Muones

El Solenoide Compacto de Muones, CMS, es un detector de propósito general instalado en el P5 (punto 5) del LHC, en la proximidad del pueblo de Cessy en Francia. Las componentes principales de CMS son: el sistema de *tracking*, basado completamente en tecnología de silicio; el calorímetro electromagnético formado por cristales centelleadores; el calorímetro hadrónico, con estructura de sandwich en capas de latón y centelleador; el imán superconductor capaz de proporcionar un campo de 3.8 T en la zona central del detector; y finalmente el sistema de muones, con cámaras que utilizan tecnología de tubos de deriva, de tiras catódicas y de placas resistivas. La figura 2.1 (derecha) muestra una fotografía del detector CMS en su vista transversal. El detector está dotado además de un sistema de disparo o *trigger* con dos niveles, uno basado en hardware y conocido como trigger de nivel 1 (L1) y otro basado en software y conocido como trigger de alto nivel (HLT). Ambos sistemas conjuntamente seleccionan los sucesos más interesantes desde un punto de vista físico, efectuando una reducción de 7-8 órdenes de magnitud y proporcionando una tasa final de 1000 sucesos por segundo. Estos sucesos son almacenados y posteriormente procesados utilizando la estructura de computación de CMS, basada en el concepto GRID y con centros de computación distribuidos por todo el mundo.

Las prestaciones más importantes del detector CMS incluyen una excelente identificación de muones y resolución de momento sobre un amplio rango de momento y pseudorapidez; buena resolución del momento de partículas cargadas y alta eficiencia de reconstrucción en el *tracker*; buena resolución de energía en el calorímetro electromagnético, con buena resolución en la masa invariante de pares de fotones y electrones; y buena resolución de la energía en el calorímetro hadrónico, incluyendo buena resolución en la masa invariante de parejas de jets y con una alta hermeticidad (hasta 5 en pseudorapidez).

2.2.4. El programa de física del LHC

El LHC permite realizar estudios detallados de un amplio rango de aspectos del Modelo Estándar, así como de búsquedas de física más allá de él. Uno de los objetivos principales del LHC consiste en el estudio del mecanismo de ruptura de simetría electrodébil, primero con la detección del bosón de Higgs, que tuvo lugar en el año 2012, y luego con la medida detallada de sus propiedades. La búsqueda de física más allá del modelo estándar, constituye otro de los ejes principales del programa de física del acelerador. En términos muy generales, se puede condensar el programa de física del LHC en los siguientes elementos:

- Estudio del mecanismo de ruptura de simetría, el bosón de Higgs y sus propiedades.
- Búsquedas de Nueva Física: Supersimetría, dimensiones extra, etc.
- Estudios de Quantum Electrodynamics (QCD) y física con multi-jets.
- Estudio de la física del quark top.
- Medidas de la Matriz CKM a través de estudios de violación CP en el sector de Bs.
- Estudio de propiedades del plasma de quark-gluones en colisiones de iones pesados.

Los datos recogidos por CMS y ATLAS durante el Run 1 y 2, han permitido profundizar en varios aspectos de este programa. El elemento más relevante es sin duda el descubrimiento del bosón de Higgs en el año 2012, usando la combinación de los canales de desintegración $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow W^+W^-$, $H \rightarrow ZZ$, $H \rightarrow b\bar{b}$ y $H \rightarrow \tau\tau$. En los meses y años posteriores, se estimaron las propiedades del nuevo bosón tales como la masa [39, 40], las fracciones de desintegración [41, 42] o el espín [43, 44]. También se produjeron estudios atendiendo a los modos de producción del bosón de Higgs (fusión de gluones y fusión de bosones vector) y se observaron desintegraciones de sección eficaz más pequeña como la desintegración $H \rightarrow \tau\tau$ [45, 46], y $H \rightarrow \mu\mu$ [47, 48]. En los últimos años también se han observado procesos de producción del bosón de Higgs en asociación con pares de quarks top-antitop ($t\bar{t}H$) [49, 50].

La física del quark top ha sido estudiada con gran nivel de detalle durante los primeros años de funcionamiento del LHC. Medidas de la sección eficaz total y diferencial de la producción de pares de quarks top-antitop en sus diferentes canales de desintegración [51–54], así como de la producción de *single-top* [55, 56] han sido realizadas con algo grado de precisión. Otras propiedades, como su masa [57, 58], han sido también estudiadas de forma exhaustiva.

Pese al éxito rotundo del LHC y de sus experimentos, durante el Run 1 y 2, ningún indicio de nueva física ha sido observado. Tanto CMS como ATLAS han contado con ambiciosos programas de búsqueda de Nueva Física, en los que se han realizado búsquedas inspiradas en modelos supersimétricos, modelos con dimensiones extra, búsquedas de materia oscura o búsquedas de resonancias de alta masa, entre otros. El espacio de parámetros de dichos modelos ha sido constreñido a través del establecimiento de límites

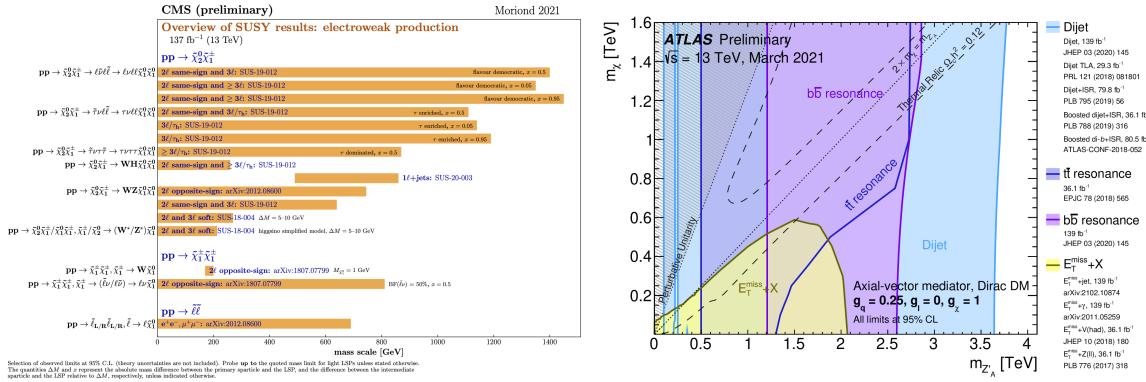


Figura 2.2: Resumen de exclusiones en las masas de partículas supersimétricas producidas de forma electrodébil (izquierda). Zonas de exclusión en el plano de masa de la partícula de materia oscura y masa del mediador para el caso de mediadores leptofóbicos de tipo axial-vector (derecha).

superiores a su sección eficaz de producción. Además de las búsquedas directas, búsquedas indirectas de nueva física, como la medida de la sección eficaz de la desintegración del bosón $B_s \rightarrow \mu\mu$ [59, 60] producida en LHC-b y CMS, parecen dificultar la existencia de una Nueva Física fácilmente accesible. De la misma forma, la masa del Bosón de Higgs, $m_H = 125$ GeV, impone fuertes restricciones a las teorías supersimétricas, que para resolver el problema de la jerarquía han de permitir grandes correcciones de squarks stop, o una gran fracción de *mixing* entre ellos. Las figuras 2.2 muestran algunas de las exclusiones realizadas hasta la fecha en las masas de diferentes partículas supersimétricas (izquierda) y en el contexto de modelos de materia oscura (derecha).

La aparente ausencia de indicios de Nueva Física ha dada lugar a un aumento del interés por búsquedas en topologías no tradicionales como son las búsquedas de partículas con larga vida media, *Heavy Stable Charge Particles*, topologías con trazas *desvanecientes*, etc. Los algoritmos de reconstrucción de los experimentos no están optimizados para este tipo de objetos, siendo posible que de manifestarse la Nueva Física en este tipo de topologías, los experimentos fallasen en encontrarla. Este argumento justifica el creciente interés por este tipo de búsquedas y también por el desarrollo de algoritmos que permiten captar este tipo de topologías.

2.2.5. El High Luminosity Large Hadron Collider

El HL-LHC

El High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) [61] será instalado en el túnel ocupado actualmente por el LHC y comenzará a funcionar en el año 2027. Este acelerador aumentará en un orden de magnitud la luminosidad integrada que recogerá el LHC desde los 300 fb^{-1} hasta los 3000 fb^{-1} . Este objetivo ha requerido un gran salto tecnológico que incluye la fabricación de nuevos y más poderosos imanes de enfocado (12 T, en lugar de los 8 T del LHC) y de curvatura (11 T, en lugar de 8.3 T en el LHC); nuevas líneas de

transmisión superconductoras con capacidad para conducir intensidades de hasta 100000 A; o la renovación de la cadena de aceleración, entre otros aspectos.

El programa de física del HL-LHC extiende el del LHC persiguiendo realizar medidas mucho más precisas de las propiedades del bosón de Higgs y de sus *couplings* (como por ejemplo del *trilinear coupling* a través de la medida del proceso de producción de pares de Higgs); estudios de QCD como la medida de las *parton distribution functions* (pdfs), o análisis de sucesos con alto q^2 ; o búsquedas de Nueva Física, con énfasis en resonancias de alta masa, partículas de larga vida media o búsquedas de Materia Oscura.

El “Phase-2 Upgrade” de CMS

El HL-LHC impondrá nuevas y exigentes condiciones de operación a los experimentos. La alta luminosidad instantánea del nuevo acelerador requerirá que los experimentos desarrollos nuevos y más rápidos sistemas de trigger; por otro lado el aumento en el número de colisiones espúreas (pile-up) incrementará sustancialmente la ocupancia en los detectores y la multiplicidad de trazas. Con objeto de adaptarse a estas nuevas condiciones, los experimentos se encuentran en proceso de mejora y renovación de sus sistemas.

La colaboración CMS se encuentra actualmente en proceso de diseño y construcción de sus nuevos sistemas. Concretamente, CMS instalará un nuevo *tracker* de silicio [62] con un mayor número de canales y una resolución espacial mejorada. El detector de píxeles será también mejorado y extendido para cubrir un mayor rango de pseudorapidez. Además, el uso de nuevas tecnologías de computación, como las FPGA, permitirá la mejora de los sistemas de trigger para que sean capaces de utilizar la información del tracker a nivel L1 [63]. Los calorímetros serán otro elemento innovador, usando una nueva tecnología que permitirá disponer de una mayor granularidad y de la capacidad de realizar medidas tridimensionales de los depósitos de energía de las partículas incidentes [64,65]. El sistema de muones y otros sub-sistemas serán también transformados o extendidos [66]. Además, CMS será dotado de un detector completamente nuevo: *el MIPs Timing Detector (MTD)*.

El MIPs Timing Detector

El MTD [67] es un nuevo detector con capacidad para medir el tiempo de paso de las partículas cargadas con una precisión de unos 40 ps al principio de operación y unos 60 ps al final de su vida útil. Este detector está compuesto por una zona *Barrel*, *Barrel Timing Layer (BTL)* y dos *Endcaps*, *Endcap Timing Layer (ETL)*, que serán instalados a continuación del tracker, dentro del tubo de soporte de su barril, y en la nariz del calorímetro, respectivamente. La Fig. 2.3 muestra un diagrama del MTD con sus componentes. La tecnología de detección usada en el BTL estará basada en cristales centelleadores (cristales de LYSO), mientras que el ETL utilizará tecnología basada en sensores de silicio y más concretamente de sensores *LGAD Low Gain Avalanche Diodes* [68,69].

El MTD tendrá un papel fundamental en el contexto del HL-LHC como un instrumento para reducir los altos niveles de pile-up que producirá dicho acelerador. La asignación

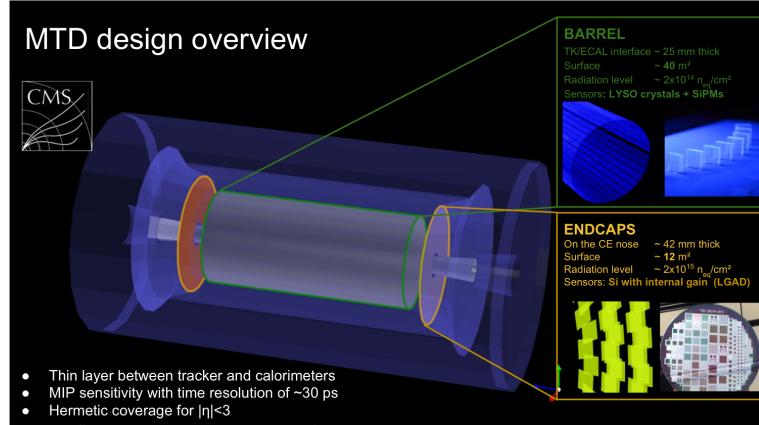


Figura 2.3: Esquema del MIPs Timing Detector con la zona del barril, BTL, con tecnología de cristales centelleadores (LYSO) y la zona *endcap*, ETL, con tecnología de LGADs.

del tiempo de producción a cada traza, permitirá añadir una nueva coordenada a la discriminación de trazas y vértices, reduciendo de esta forma los niveles de pile-up, desde los 200 esperados en el HL-LHC hasta niveles parecidos al actual LHC. El MTD, además, abrirá posibilidades únicas en muchos sectores del programa de física de CMS, como por ejemplo, en las búsquedas de partículas de larga vida media, ya que permitirá medir además de su desplazamiento, su retraso temporal. El MTD también permitirá realizar una identificación de partículas basándose en su tiempo de vuelo *Time-Of-Flight Id*, lo cuál tendrá importantes repercusiones en varios análisis y muy especialmente en la física de iones pesados.

2.3. Análisis de datos con el experimento CMS

Esta línea de investigación persigue la búsqueda de evidencias de Nueva Física en los datos recogidos por el experimento CMS tanto durante el Run 3 del LHC como durante la operación del HL-LHC. Varios modelos de Nueva Física serán estudiados incluyendo modelos supersimétricos, modelos exóticos con presencia de Materia Oscura, y modelos exóticos con partículas de larga vida media. También se prestará atención al proceso de producción de *pares de Higgs* para estudiar posibles desviaciones con respecto al Modelo Estándar. El factor común a todos los análisis será la presencia de al menos un leptón (electrón o muon) en los estados finales de los modelos de señal. En el desarrollo de esta línea de investigación adquirirá también un papel fundamental el uso de técnicas modernas de computación basadas en aprendizaje automático como herramienta para optimizar el alcance de los diferentes análisis. El objetivo de esta línea de investigación es el posible descubrimiento de nuevas partículas, o en su defecto, el establecimiento de límites estadísticos a sus secciones eficaces de producción, para constreñir el espacio de parámetros de los modelos estudiados.

2.3.1. Experiencia previa

Búsquedas de SUSY con leptones del mismo sabor y carga opuesta

Mi experiencia en búsquedas de Nueva Física en el experimento CMS comienza en el año 2010 con mi incorporación al *Swiss Federal Institute of Technology Zürich* (ETHZ) como investigador postdoctoral y ha continuado de forma ininterrumpida hasta la actualidad. Durante los años 2010 a 2017 mi actividad investigadora estuvo centrada en las búsquedas de Supersimetría. Concretamente, durante este periodo me convertí en referente y líder, dentro de la colaboración CMS, de uno de los análisis principales del grupo de SUSY: las búsquedas en sucesos con dos leptones del mismo sabor y carga opuesta. En este contexto, lideré durante años a un grupo de doctorandos y postdocs de varias universidades, y supervisé a dos doctorandos dentro de la ETHZ en esta temática. Mi contribución a esta saga de análisis, que dio lugar a 8 publicaciones [70–77], fue integral, pasando por el diseño global del análisis y las herramientas de software, hasta el diseño de los métodos de predicción de fondo, el análisis estadístico y las funciones de *persona de contacto* de cara a la colaboración CMS. Resulta relevante mencionar, que uno de estos análisis, el realizado con los datos recogidos con $\sqrt{s} = 8$ TeV presentó un exceso de datos en la masa invariante de los leptones con una significancia de 2.9σ (ver Fig.2.4). El análisis fue sometido a un proceso de escrutinio sin precedentes por parte de la colaboración y debido a ello fue reconocido como el análisis más robusto hasta la fecha. Este exceso supuso también el mayor indicio de Nueva Física hasta la fecha en CMS, atrayendo la atención de la comunidad de teóricos. Como resultado de estos trabajos la colaboración CMS me seleccionó para presentar estos resultados de CMS en conferencias tan importantes como las ediciones de ICHEP (International Conference in High Energy Physics) en 2012 y en 2014. Por otro lado, además de este tipo de análisis, también tuve contribuciones a otras búsquedas de Supersimetría como son las búsquedas con leptones de la misma carga [78–81], o las búsquedas hadrónicas utilizando la variable MT2 [82–85].

Desarrollo de triggers y de simulaciones para el grupo de SUSY de CMS

Durante los años 2014-2016 fui seleccionado por el grupo de SUSY de CMS como el co-coordinador (L3) del grupo de *SUSY Trigger, Montecarlo and Interpretations*. Mis responsabilidades en este ámbito pasaban fundamentalmente por la coordinación del diseño de las estrategias de trigger y de simulación de Monte Carlo de todos los análisis de SUSY dentro de CMS y de cara a la toma de datos del año 2016, la primera con una energía del centro de masas de $\sqrt{s} = 13$ TeV. En este contexto, también era el responsable de defender los intereses del grupo de SUSY dentro de los correspondientes grupos de Trigger y Simulación en la colaboración. Este trabajo me permitió adquirir una visión global y privilegiada del grupo, al trabajar de forma conjunta con todos los equipos de análisis, siendo en la mayor parte de los casos yo mismo el que implementaba técnicamente los triggers dentro del sistema de trigger de CMS, o el encargado de generar las simulaciones, especialmente en el caso de procesos de señal. En el año 2016, fui invitado por la colaboración CMS para mostrar los primeros resultados de SUSY de la historia, a una energía de $\sqrt{s}=13$ TeV, en el prestigioso *LHC seminar*. También fui organizador de los *CMS SUSY*

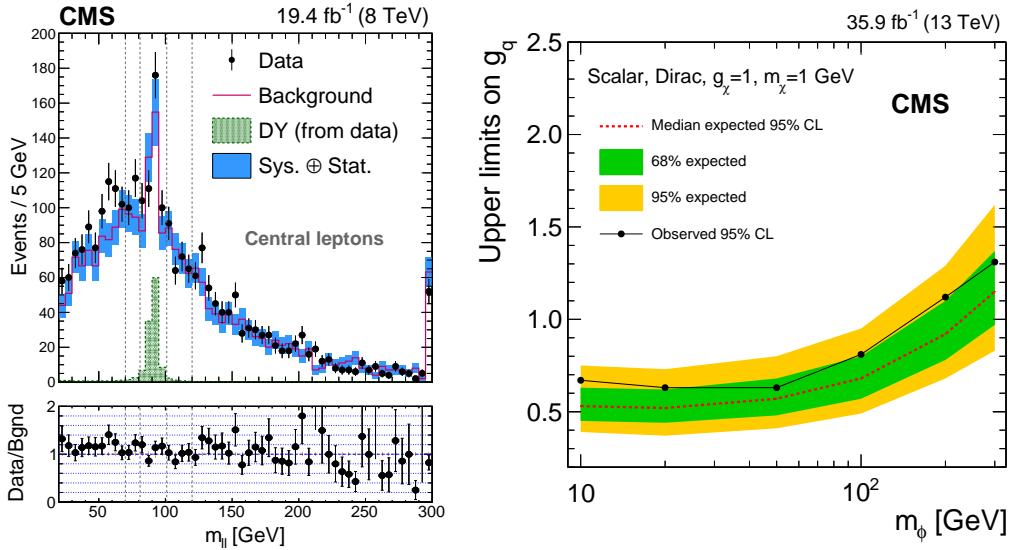


Figura 2.4: Masa invariante de dos leptones: comparación entre datos observados y predicciones de fondo (izquierda). Límites superiores observados y esperados, con nivel de confianza del 95 %, en la constante de acoplamiento de un mediador de Materia Oscura escalar al quark top (derecha).

Workshops de 2014 y 2015 en Lisboa y Chicago respectivamente y editor del capítulo de SUSY del artículo de trigger de CMS [86].

Búsquedas de partículas supersimétricas de tercera generación

A finales del año 2016, con mi inminente incorporación al Instituto de Física de Cantabria (IFCA) comencé a trabajar en una búsqueda de producción directa de charginos y stops en sucesos con dos leptones de diferente sabor y carga contraria [87], que fue íntegramente realizado por miembros del IFCA. También hice contribuciones a una búsqueda de producción directa de stops en el régimen en el que la masa del stop es próxima a la masa del quark top [88], haciendo que la topología final disponga de escaso momento transverso faltante. Durante los años 2016 a 2018 fui seleccionado como co-coordinador (L3) del grupo de búsquedas de partículas supersimétricas de tercera generación, estando bajo mi responsabilidad la mejora, escrutinio y aprobado de este tipo de búsquedas, así como el diseño de la estrategia global del grupo y la combinación de los diferentes sub-análisis. En este papel, fui parte del comité científico organizador de los “CMS SUSY Workshops” de 2017 en Gante y 2018 en Viena. En el año 2019 la colaboración CMS me encomendó también la organización del “CMS SUSY Workshop” en Santander.

Búsquedas directas de Materia Oscura

Entre los años 2017 y 2018 lideré en el IFCA una búsqueda de materia oscura en asociación con pares de quark top-antitop [89]. En este análisis desarrollé un método para estimar el momento transverso del mediador de materia oscura. Esta búsqueda dio lu-

gar a una tesis doctoral de la cuál fui co-director y a dos trabajos de fin de grado: uno sobre una extensión analítica para calcular el momento transverso del mediador, y otro sobre una aplicación de un *Variational Autoencoder* para la producción de simulaciones de MC realistas partiendo de sucesos reales. La Fig. 2.4 muestra los límites superiores a la constante de acoplamiento de un mediador de materia oscura al quark top, obtenidos en el análisis. En el año 2019, presenté el resumen de resultados de materia oscura de CMS en una charla plenaria en los “LHC Split Days” en Croacia. Posteriormente y hasta la actualidad, he seguido liderando en el IFCA una nueva búsqueda de materia oscura en asociación con quarks top, incluyendo todos los datos del Run 2 y nuevos modelos con producción de “single-top”. Este hecho ha requerido una intensa investigación para añadir zonas de señal con menor multiplicidad de jets. Dos métodos de aprendizaje automático (Redes Neuronales y *Boosted Decision Trees*) están siendo utilizados para mejorar la discriminación de señal. El análisis está siendo realizado en colaboración con DESY y la Universidad de Wisconsin-Madison, y se espera que sea público en los próximos meses. Este trabajo está dando lugar también a otra tesis doctoral de la que soy co-director. Como una mejora adicional al método de estimación del momento transverso del mediador de materia oscura, también dirigí un TFG en el que la estimación era realizada por una red neuronal en modo regresión, y otro TFG estudiando el efecto de los errores sistemáticos en la respuesta de una red neuronal discriminadora. Ambos resultados fueron presentados en la conferencia *10th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2021)*.

Producción de partículas con larga vida media

En el año 2018, en el contexto del *Technical Design Report* (TDR) del MIPs Timing Detector (MTD) [67] de CMS, desarrollé una búsqueda de leptones desplazados que tenía como objetivo demostrar las posibilidades únicas que el MTD proporciona para discriminar los leptones desplazados en base a su retraso, y también para medir la masa de la partícula de larga vida media utilizando la medida de su velocidad, estimada a través de la posición y tiempo del vértice desplazado con respecto al primario. El estudio fue incluído en el TDR del MTD y se convirtió en uno de los estudios de referencia para dicho sub-detector. Adicionalmente, en 2019 comencé a desarrollar una búsqueda de partículas con larga vida media dando lugar a pares de leptones desplazados. Estas búsquedas son del máximo interés, dada la aparente ausencia de Nueva Física en las topologías convencionales. Actualmente me encuentro co-dirigiendo una tesis doctoral en este tema. Las novedades de este análisis incluyen el diseño de nuevos objetos tanto de electrones como de muones desplazados que han sido adoptados como nuevos estándares por parte de los grupos de muones y *e-gamma* de CMS respectivamente. El análisis comenzará en breve el escrutinio interno de CMS, tras haber sido presentado en los *EXO workshops* de CMS en 2019 en Aachen y de 2020 (virtual).

Producción de pares de bosones de Higgs

En el año 2018, fui nombrado co-coordinador (L3) del sub-grupo de Física del *Data*

Performance Group (DPG) del MTD, siendo responsable de elaborar una serie de análisis en donde se pudiese observar de forma clara y evidente el potencial del MTD y su impacto en el programa de Física de CMS para el HL-LHC. Una descripción más detallada sobre este papel puede encontrarse en 2.4.1. En este contexto, estuve a cargo de coordinar a los cuatro equipos de investigación que trabajaban en el análisis de la medida de la sección eficaz del proceso de producción de pares de bosones de Higgs, en los cuatro canales estudiados $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$, $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$, $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$, $HH \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$, $HH \rightarrow b\bar{b}ZZ$. El análisis suponía una proyección de la significancia estadística con la que podía observarse el proceso proyectando al total de la luminosidad integrada que se espera que recoja el HL-LHC. Mi papel tuvo que ver con la implementación de las mejoras producidas por el uso del MTD en los diferentes objetos físicos. También estuve a cargo de la combinación y fui editor de la nota interna de CMS que describía el análisis, así como el encargado de defenderlo frente a la colaboración.

2.3.2. Búsquedas de Nueva Física con datos del Run 3 en CMS

El Run 3 del LHC comenzará en el año 2022 y se extenderá hasta el año 2024, recogiendo una cantidad de datos esperada de 160 fb^{-1} , a una energía del centro de masas aún por determinar y que estará en el rango $\sqrt{s}=13\text{-}14 \text{ TeV}$. Esta línea de investigación persigue extender y optimizar las búsquedas previas con especial énfasis en las zonas del espacio de parámetros de los modelos con una sensitividad reducida.

Búsqueda de SUSY con dos leptones del mismo sabor y carga opuesta

Este análisis supone una extensión de los análisis previos usando toda la luminosidad del Run 3. La búsqueda es particularmente relevante si la energía del centro de masas del acelerador se incrementa, ya que el análisis buscaría la aparición de estructuras en la masa invariante de los dos leptones a dicha energía sin precedentes, constituyendo una de las búsquedas esenciales de la colaboración. En cualquier caso, la búsqueda será optimizada para aquellos modelos de sección eficaz más baja, como son la producción directa de sleptons o la producción de charginos y neutralinos, en donde los límites superiores establecidos hasta ahora en el LHC aún tienen margen de mejora. Las últimas medidas del factor $g-2$ motivan fuertemente las búsquedas de sleptons ya que éstas favorecen la existencia de sleptons con masas en el rango del TeV.

El análisis contará con varias mejoras técnicas para aumentar su sensitividad a la Nueva Física. En primer lugar, se estudiará el uso de nuevos triggers de dileptones de CMS, que usando mejoras como la inclusión del algoritmo *Kalman-Filter* [90] en el trigger L1, podrían reducir los umbrales del momento transverso de los leptones, aumentando la sensitividad a modelos con espectro comprimido. La Fig. 2.5 muestra los límites superiores en la sección eficaz de producción de pares de sleptons y de producción directa de charginos y neutralinos. Las diagonales son zonas de baja sensitividad debido a que la escasa diferencia de masa entre sleptons (neutralinos/charginos) y los neutralinos más ligeros, hace que los leptones en el estado final sean muy poco energéticos y no pasen el umbral

de trigger. En esta misma línea, se añadirán también zonas de señal que incluyan un jet muy energético de tipo *Initial State Radiation*, provocando un *boost* del sistema del par de partículas supersimétricas e incrementando así su momento transverso. El objetivo final será explorar la existencia de partículas supersimétricas en configuraciones de espectro de masas comprimidos.

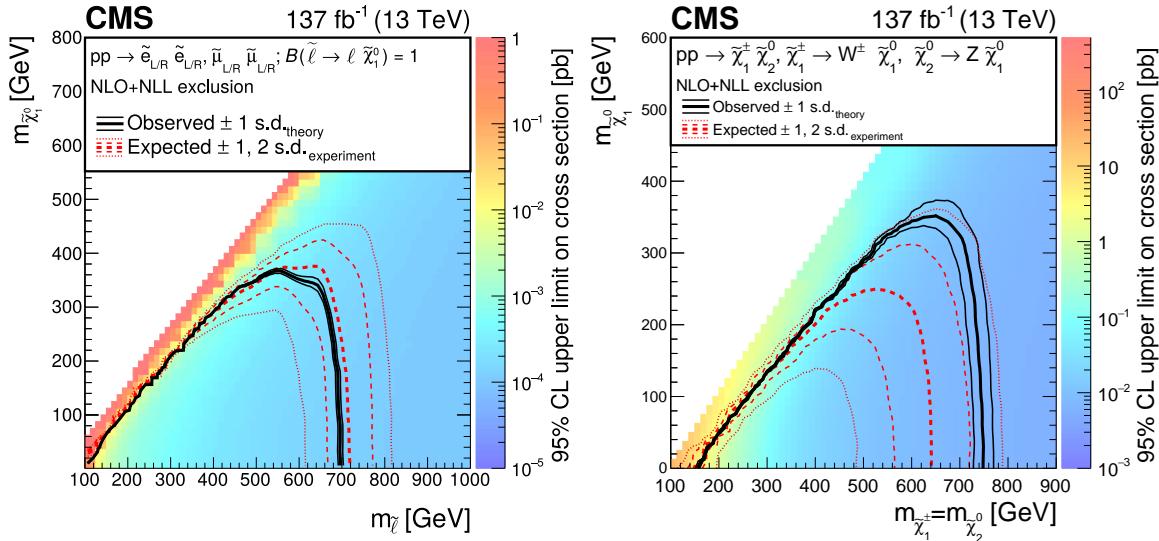


Figura 2.5: Límites superiores en la sección eficaz de producción de pares de sleptones en función de su masa y de la masa de los neutralinos a los que decae (izquierda). Límites superiores en la sección eficaz de producción de charginos y neutralinos en función de su masa y de la masa del neutralino más ligero al que decaen (derecha).

En segundo lugar, se explorará el uso de algoritmos de aprendizaje automático para caracterizar la presencia de bosones W decayendo a jets en los sucesos. La sensitividad de las búsquedas de producción de charginos y neutralinos está limitada en la zona de alta masa (ver Fig. 2.5, derecha), por el hecho de que el bosón W adquiere suficiente momento como para que los dos jets producto de su desintegración se fundan en uno solo. En versiones anteriores del análisis se introdujeron zonas de señal utilizando *fat jets* y obteniéndose una mejora sustancial. En el Run 3 se utilizarán métodos de aprendizaje automático (taggers) para determinar a través de la sub-estructura, si un jet proviene de la desintegración de un W de alto momento.

Búsqueda de materia oscura en asociación con top quark(s)

Este análisis constituye también una extensión y optimización del análisis llevado a cabo con los datos del Run 2. La búsqueda de materia oscura sigue constituyendo uno de los ejes del programa de física del LHC, y su producción en asociación con el quark top tiene una gran relevancia, debido a la singular relación del quark top y el sector del bosón de Higgs.

Existen tres nuevos desarrollos de gran calado en el análisis. En primer lugar, el análisis del Run 3 no se limitará al canal dileptónico, sino que también se llevará a cabo el

canal semileptónico, en el que uno de los W decae hadrónicamente. El grupo encargado de realizar la versión semi-leptónica del análisis en el Run 2 ha demostrado grandes dificultades para desarrollar la búsqueda, así que, se procederá a la colaboración con dicho grupo para realizar esa parte del análisis que constituye una parte importante de la sensitividad total al modelo. En segundo lugar, se va a potenciar el uso de *taggers* basados en algoritmos de aprendizaje automático para identificar la presencia de decaimientos de quarks top o bosones W de alto momento, dando lugar a un sólo jet que no puede ser resuelto como la unión de dos o tres jets.

El último elemento novedoso, surge de las investigaciones realizadas recientemente en un TFG dirigido por mí, en el que se investigaba la posibilidad de predecir el momento transverso del mediador de materia oscura utilizando una red neuronal en modo regresión. El método demostró un mejor desempeño que las versiones numérica y analítica desarrolladas previamente. Además, el método permite estimar también el momento transverso del mediador en el caso de los modelos con presencia de un único quark top. La información del momento del mediador será utilizada para mejorar la discriminación señal-fondo en el contexto del análisis.

Búsqueda de partículas de larga vida media decayendo a pares de leptones

Los resultados del Run 2 del LHC no han mostrado evidencias de Nueva Física. Una de las posibles explicaciones consiste en que la Nueva Física aparezca en topologías para las que los detectores no fueron optimizados y que por tanto son difíciles de reconstruir. Los modelos con partículas de larga vida media entran dentro de esta categoría ya que los productos de su desintegración ocurren alejados del centro del detector, confundiéndolo a los algoritmos de reconstrucción, en general optimizados para reconstruir partículas que provienen del punto de interacción. Este análisis propone una búsqueda similar a la ejecutada en el Run 2, en el que una interacción mediada por un bosón de Higgs produce dos bosones con largo tiempo de vida que decaen en pares de leptones desplazados. La búsqueda también considera la exploración de un modelo de Supersimetría con *violación de la paridad-R*, en el que dos stops con larga vida media decaen a dos leptones del mismo sabor y un neutrino.

Una de las grandes complicaciones relacionadas con esta búsqueda en el Run 2 tuvo que ver con la ausencia o ineficiencia de los triggers de leptones desplazados. Uno de los objetivos para el Run 3 consiste en la exploración y estudio de nuevos triggers para este tipo de objetos. En el caso de los muones se pretende utilizar el nuevo algoritmo de Kalman-Filter en el nivel L1 del trigger para desarrollar nuevos triggers en el High Level Trigger que maximicen la sensitividad de la búsqueda. Los desarrollos llevados a cabo en el análisis del Run 2 para conseguir un nuevo objeto de muon desplazado serán implementados a nivel de trigger para intentar reducir los umbrales de momento de los leptones, aumentando de esta manera la sensitividad a modelos comprimidos en los que los leptones son de bajo momento. Una colaboración con miembros de la Universidad de Oviedo ha sido iniciada en la actualidad para perseguir este objetivo.

2.3.3. Búsqueda de Nueva Física en el HL-LHC

El HL-LHC que comenzará en los próximos años recogerá una cantidad de datos sin precedentes, $L_{int} = 3000 \text{ fb}^{-1}$, durante sus años de operación. Por otro lado, sus condiciones de operación serán extremadamente complejas fundamentalmente debido al alto número de colisiones simultáneas *pile-up* que tendrán lugar en cada *bunch-crossing* entre los haces de protones. Si durante el Run 2 del LHC el nivel medio de pile-up estuvo en torno a 40-50, en el HL-LHC este valor aumentará hasta 200. El incremento masivo del número de *hits* en el tracker de CMS complicará enormemente la reconstrucción de trazas y la identificación del vértice primario, haciendo que el análisis de datos sea un reto en muchos casos. El nuevo detector MTD tiene como objetivo reducir el impacto del pile-up ayudando a reducir sus niveles a valores parecidos a los del LHC. La segunda línea de investigación presentada en este proyecto tiene que ver con mi participación en el proyecto del MTD. La experiencia adquirida en ese contexto será utilizada para conseguir una posición de liderazgo en el análisis de datos del HL-LHC. Concretamente se perseguirá realizar un gran impacto en dos tipos de análisis en los que el MTD ha demostrado ofrecer ventajas sustanciales: búsquedas de partículas con larga vida media y la búsqueda de la producción de pares de bosones de Higgs.

Búsqueda de partículas de larga vida media en el HL-LHC

El objetivo de este análisis consiste en mejorar la sensitividad del experimento CMS a modelos de Nueva Física con leptones desplazados. Si el análisis del Run 3 tuvo éxito encontrando indicios de la existencia de nuevas partículas con larga vida media, éste análisis incidirá en la medida detallada de sus propiedades. Si por el contrario, el análisis del Run 3 no arrojó ningún resultado positivo, este análisis extenderá la búsqueda aprovechando la gran cantidad de datos proporcionada por el HL-LHC.

Para llevar a cabo esta tarea, se utilizará la información temporal proporcionada por el MTD para discriminar e identificar las posibles partículas desplazadas, prestando atención al retraso temporal que sufrirán si fueron producidas por una partícula de larga vida media y muy masiva. Tal y como mostré en el TDR del MTD, en algunos modelos, resulta posible incluso reconstruir la masa de las partículas de larga vida calculando su velocidad β a través de la diferencia temporal entre el vértice desplazado y el vértice primario y su distancia. Este tipo de análisis supondría una potente herramienta para estudiar posibles modelos de Nueva Física.

Análisis de la producción de pares de bosones de Higgs en el HL-LHC

Este análisis constituye uno de los principales elementos del programa de física del HL-LHC. La producción de pares de bosones de Higgs aporta información sobre el acoplamiento triple, *trilinear coupling*, del potencial de Higgs y por lo tanto constituye una prueba fundamental del mecanismo de ruptura de simetría propuesto por Higgs. La sección eficaz de este proceso tiene una alta sensitividad a modelos de Nueva Física como por

ejemplo aquellos que incluyen *Higgs compuestos* o *Higgs portal* y por lo tanto su estudio es de una importancia capital también en el contexto de las búsquedas. El detector MTD eligió esta análisis como campo de pruebas en el que demostrar su impacto.

La propuesta de este proyecto consiste en aprovechar el conocimiento adquirido trabajando en el MTD para liderar uno de los canales asociados a este análisis: el caso en el que uno de los bosones de Higgs decae a un par de quarks bottom-antibottom, y el otro a dos bosones W ($HH \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$) con los W decayendo semi-leptónicamente a leptón (electrón o muon) y neutrino. El ingrediente principal de este análisis consiste en aprovechar la información temporal proporcionada por el MTD para desechar trazas espúreas del cono de aislamiento de electrones y muones, proporcionando así una selección de *aislamiento* mucho más eficiente, reduciendo también dramáticamente el número de leptones erróneamente reconstruidos como tales.

2.4. Participación en el “Phase 2 Upgrade”: el MTD

Esta línea de investigación consiste en la participación en el proyecto de *Phase 2 Upgrade* de CMS de cara a su puesta a punto para operar bajo las exigentes condiciones del HL-LHC. Concretamente la línea discurrirá en el contexto del *MIPs Timing Detector* (MTD), un nuevo detector que será instalado a continuación del tracker de CMS y con capacidad para medir el tiempo de paso de las partículas cargadas con una precisión inicial de 35-40 ps al inicio del HL-LHC y de unos 60 ps al final de su tiempo de vida. El MTD será extremadamente útil para mitigar los efectos negativos del alto *pile-up* con el que el HL-LHC operará, y por lo tanto tendrá un impacto integral en el programa de Física de CMS. El trabajo propuesto se ocupará de dos líneas de actuación: el desarrollo del software de simulación, reconstrucción, calibración y alineamiento del detector; y el ensamblado de los módulos del *Endcap Timing Layer* (ETL) del MTD.

2.4.1. Experiencia previa

Física con el MTD

Comencé a trabajar en el proyecto del MTD en el año 2017 cuando me incorporé al Instituto de Física de Cantabria. Mi primera contribución fue el desarrollo de un búsquedas de Nueva Física en un estado final con leptones desplazados, aprovechando la información temporal proporcionada por el MTD para discriminar sucesos de señal de sucesos de fondo. Un resumen más detallado sobre este análisis se proporcionó en la sección anterior. En el año 2018, fui nombrado coordinador del sub-grupo de Física del *Data Performance Group (DPG)* del MTD, siendo responsable de elaborar una serie de análisis en donde se pudiese observar de forma clara y evidente el potencial del MTD y su impacto en el programa de Física de CMS para el HL-LHC. En este contexto y además del análisis mencionado anteriormente, coordiné y participé en otras búsquedas de Nueva Física usando el MTD, como por ejemplo, la búsquedas de fotones desplazados, de jets desplazados, o

también de búsquedas de *Heavy Stable Charged Particles (HSCP)*. Paralelamente también estuve a cargo de coordinar a los cuatro equipos de investigación que trabajaban en el análisis de la medida de la sección eficaz del proceso de producción de Higgs doble, tal y como se explicó en la sección anterior. Todos estos análisis fueron recogidos en dos notas internas de la colaboración de las que fui editor y que tuve que defender dentro del grupo correspondiente del Upgrade para que los resultados fueran aprobados. Finalmente, todos los análisis fueron incluidos en el TDR del MTD constituyendo su justificación como proyecto desde el punto de vista físico. También fui editor del capítulo correspondiente del TDR.

“L1 Trigger” usando el MTD

En el año 2018, el grupo de upgrade de CMS en conjunto con el MTD y el grupo de *Trigger L1* para el upgrade, me encomendaron la tarea de elaborar un estudio detallado sobre el impacto de incluir la información del MTD a nivel de trigger L1. Mis estudios mostraron un análisis exhaustivo de todos los posibles usos que podían darse de la información del MTD para elaborar *L1 seeds*, así como de ejemplos de análisis y búsquedas que pudieran beneficiarse de las mismas. Los resultados mostraron que las mejoras observadas no eran muy significativas en relación con el uso del MTD en el proceso de reconstrucción normal. Mis resultados fueron presentados por mí en dos workshops específicos del Upgrade de CMS y resultaron fundamentales para la decisión final adoptada por los grupos de Upgrade y del MTD de no incluir la información del MTD a nivel de trigger.

Simulación, reconstrucción, calibración y alineamiento del MTD

En septiembre del año 2019 fui elegido como co-coordinador (L2) del DPG del MTD. Como tal, estoy a cargo de la implementación de las geometrías del MTD en el software oficial de CMS, así como de los algoritmos de simulación, digitización, reconstrucción, cálculo de vértices, calibración, alineamiento y también del estudio de la mejora de los objetos de física tras la inclusión del MTD. Entre otros desarrollos, recientemente he llevado a cabo la integración del MTD en el sistema de “navegación” de CMS, de manera que los algoritmos de reconstrucción se extienden de manera natural al uso del MTD, o también los primeros pasos de la implementación de una simulación realista para la *digitización* de los sensores LGAD dentro del software de CMS. También he defendido las actuaciones del DPG en el “Annual Review” del proyecto ante el correspondiente comité de CMS (8 de octubre de 2020) y también he presentado el proyecto en conferencias como Lepton Photon 2019 o LHCP20. En el año 2021, el grupo del MTD decidió re-elegirme durante 2 años más como co-coordinador del DPG del MTD.

Ensamblado de los módulos del ETL

Dentro del proyecto de instrumentación del grupo de Altas Energías del Instituto de Física de Cantabria, soy el responsable del ensamblado de los módulos del Endcap Ti-

ming Layer del MTD. El IFCA ha adquirido el compromiso de ensamblar un total de aproximadamente 900 módulos del ETL. La figura 2.6 muestra un esquema de la estructura general del ETL (izquierda) y del diseño de los módulos que lo componen. Dentro de los módulos los componentes más importantes son el sensor LGAD y los módulos de electrónica (ETROC).

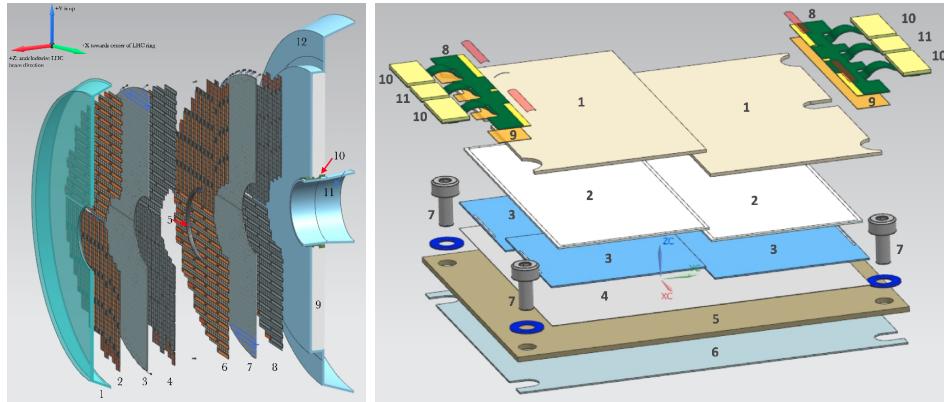


Figura 2.6: Esquema general del ETL del MTD (izquierda) y esquema de un módulo del ETL incluyendo las diferentes capas que lo conforman (derecha).

El ensamblado de los módulos del ETL será realizado de forma automática con ayuda de un robot de posicionamiento. Durante los años 2020 y 2021 he dirigido un Trabajo de Fin de Grado y un Trabajo de Fin de Máster con objeto de realizar el *commissioning* de un robot de posicionamiento disponible en las instalaciones del IFCA, así como dar los primeros pasos en su programación, utilizando un lenguaje dedicado conocido como V+.

2.4.2. Desarrollo del software del MTD

En septiembre del año 2021 fui reelegido como co-coordinador (L2) del Data Performance Group del MTD por un periodo de dos años. En este tiempo lideraré un programa completo de desarrollos que tendrán como objetivo poner los pilares básicos de la infraestructura de software del detector MTD. En este sentido se identifican varios actividades que serán acometidas por parte del DPG y que se describen a continuación.

Software de “digitización” del ETL

El software de digitización está encargado de simular la respuesta de los sensores y de los módulos electrónicos de lectura. En el caso del ETL, el software de digitización es una simple traducción de los llamados *SimHits* proporcionados por GEANT4 [91] en términos de coordenadas locales de activación dentro del sensor. Los desarrollos llevados a cabo por mí en los últimos meses, implementaron de manera lógica los píxeles dentro de los sensores LGADs, así como las zonas de no-ganancia entre píxeles. No obstante, una simulación realista del proceso de medida requiere parametrizar la forma de la señal obtenida en el sensor en función de la energía, posición y dirección de los SimHits. Dicha

forma de señal tiene que ser entonces transformada por la acción esperada que los módulos electrónicos de lectura ejerzan sobre ella. En la actualidad, me encuentro personalmente comenzando este esfuerzo en comunicación con los expertos en electrónica del ETL y con ayuda de un estudiante en el IFCA.

Integración del MTD en el tracking de CMS

La información temporal proporcionada por el MTD debe ser asignada a las trazas reconstruidas por el tracker de CMS y propagada hacia el punto de interacción para determinar el tiempo asociado a dicha traza en el origen. Puesto que el MTD añade de manera lógica nuevas capas al tracker de CMS, resulta conveniente extender toda la infraestructura de reconstrucción de trazas para que sea capaz de incorporar y reconocer al MTD. La primera acción en esta dirección fue realizada por mí en el año 2020, modificando la estructura de navegación del software de CMS, para que los algoritmos de reconstrucción sean capaces de incorporar información de las capas correspondientes al MTD. El siguiente paso consiste en la adaptación de las estructuras utilizadas por el algoritmo de Kalman-Filter para que pueda usar de forma efectiva la información aportada por el MTD. A continuación, será necesario integrar la propagación de la información temporal al punto de origen. Este proceso de propagación requiere hacer una hipótesis acerca de la masa de la partícula generadora de la traza. Encontrar un método para elegir la masa correcta a partir de la información disponible tanto en la traza como en el MTD, constituye otro desafío que será acometido en este punto. Las modificaciones resultantes deberán ser, además, integradas dentro del contexto del tracking iterativo de CMS. Todos estos desarrollos serán realizados personalmente por mí con ayuda de expertos de tracking de la colaboración CMS.

Reconstrucción de vértices utilizando información temporal

Una vez las trazas han sido provistas de un tiempo de generación en el origen, es posible utilizar dicha información para ayudar a reconstruir los vértices. Un primer intento fue llevado a cabo en el momento en el que se configuró el TDR. La aproximación consistió en extender el algoritmo estándar de reconstrucción de vértices de CMS basado en el concepto de *Deterministic Annealing* para que usase no sólo la información espacial longitudinal de las trazas sino también su tiempo de producción. Investigaciones posteriores al TDR han mostrado que los resultados de este algoritmo no son capaces de mejorar el desempeño del algoritmo clásico que utiliza únicamente la información espacial. Esta inconsistencia está siendo objeto de una intensa investigación por parte de expertos en reconstrucción de vértices y con la supervisión de los co-coordinadores del MTD. Si el problema no llega a resolverse en los próximos meses, se explorarán mecanismos alternativos, como puede ser el uso inicial de la información espacial para el *Deterministic Annealing*, y un segundo paso de refinamiento que utilice la información temporal para limpiar los vértices obtenidos de trazas espúreas.

Calibración y alineamiento del MTD

El MTD requiere de una infraestructura de software que permita calibrar sus componentes. El diseño de esta infraestructura parte en primer lugar de la identificación del total de constantes y calibraciones necesarias por los sistemas. En segundo lugar han de definirse los procedimientos para estimar dichas constantes y determinar la frecuencia con la que han de ser calculadas. Es preciso también disponer de una infraestructura de base de datos en las que las constantes puedan ser almacenadas con atención a los rangos de validez de cada conjunto de calibraciones. Finalmente, el software del detector tiene que ser capaz de leer y aplicar las calibraciones para proporcionar una respuesta óptima del detector. De la misma forma, el detector requiere también un conjunto de procedimientos que permitan alinear sus componentes. Además de los algoritmos de alineamiento es preciso dotar al detector de una infraestructura de software que permita implementar las correcciones de alineamiento así como dar cuenta de los errores de posicionamiento asociados. Todas estas actividades serán llevadas a cabo en los años venideros, lideradas por los co-coordinadores del DPG.

Desempeño del detector y “Physics case”

Todos los desarrollos de software acometidos en el detector han de tener como consecuencia la mejora de la reconstrucción de los diferentes objetos físicos. El DPG ha de garantizar que toda la información relevante está disponible en los diferentes formatos de datos de CMS. El DPG ha de proporcionar también todo el soporte necesario a los grupos dedicados a los diferentes objetos de física para que la nueva información temporal sea aplicada de forma efectiva. Durante los próximos años se espera un diálogo constante con estos grupos en el que aparezcan ideas acerca de cómo dar mejores usos a la información temporal y de cómo medir la eficacia de los objetivos conseguidos. De igual manera, durante los próximos años se buscará ampliar la gama de análisis de física en los que el MTD tenga un papel determinante. Las ideas más prometedoras actualmente tienen que ver con nuevos análisis que involucren partículas de larga vida media, así como análisis que utilizan leptones de bajo momento en donde el MTD ha demostrado producir mejoras de eficiencia muy sustanciales.

2.4.3. Ensamblado de los módulos del ETL

Durante los próximos años seré el responsable dentro del IFCA del ensamblado de aproximadamente 900 módulos del ETL. Este esfuerzo será compartido entre la Universidad de Nebraska-Lincoln, Fermilab y la Universidad de Torino-INFN. La figura 2.7 muestra la línea temporal en la que estos desarrollos serán llevados a cabo para garantizar que el MTD pueda ser instalado a tiempo para el HL-LHC. Existen tres fases de desarrollo diferenciadas, la fase de ingeniería y prototipado en la que los principales procedimientos y herramientas necesarias para llevar a cabo el ensamblado son implementados; la pre-producción en la que se ensamblarán una fracción de módulos, prestando atención a posibles problemas, inconvenientes y mejoras que deban ser realizadas; y finalmente la

producción en la que la mayor parte de los módulos serán ensamblados. Resulta preciso mencionar también las posibles sinergias entre el ensamblado de los módulos del ETL y los del Inner Tracker en el que el IFCA se haya también involucrado.

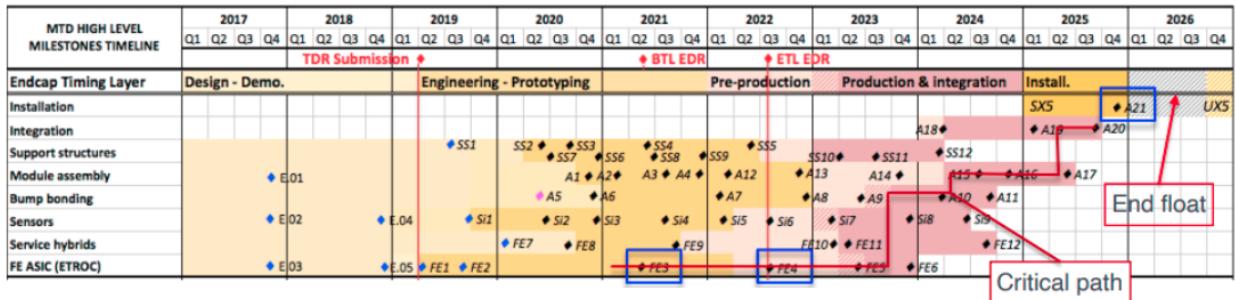


Figura 2.7: Horizonte temporal de los desarrollos del ETL en el que se incluyen los tiempos estimados para el inicio de la pre-producción y producción del ensamblado de los módulos.

“Commissionning” y puesta a punto del robot de montaje

Una de las primeras acciones a realizar consiste en la preparación del robot de montaje que será utilizado para realizar el ensamblado de los módulos. Esta tarea comenzó con anterioridad y dio lugar a un TFG y un TFM relacionado con el uso de dicho robot. Los siguientes pasos tienen que ver con la incorporación de una cámara de visión en el robot para poder realizar un alineamiento automático de los diferentes componentes del módulo; y el establecimiento de un software de control para manejar las 16 líneas de vacío necesarias en el montaje. Una vez establecidos dichos procedimientos es necesario medir la precisión espacial final que puede alcanzarse, así como los tiempos promedios necesarios para ensamblar cada módulo. Para llevar a cabo estas operaciones se dispondrá de un conjunto de piezas que emulen el montaje final de ensamblado.

Preparación del procedimiento de ensamblado

Una vez los elementos técnicos del robot de montaje hayan sido probados y validados, es necesario establecer el procedimiento de montaje. Este procedimiento comienza con un sistema de registro de los componentes recibidos así como de un primer control de inspección visual para comprobar su estado. El siguiente paso consiste en la programación del robot para que sea capaz de automatizar las tareas de ensamblado, auto-calibrando su posición gracias a la visión artificial y haciendo el control efectivo de las líneas de vacío para ejercer succión sobre los componentes correspondientes.

Evaluación y control de calidad de los módulos ensamblados

Finalizado el proceso de ensamblado es preciso garantizar la calidad de los módulos producidos. Resulta por lo tanto necesario disponer de un procedimiento que garantice

el correcto funcionamiento eléctrico de los módulos, así como su resistencia mecánica y térmica. Llevados a cabo los controles, los módulos producidos exitosamente han de ser registrados y almacenados para su futura instalación en el detector.

2.5. Tomografía muónica en aplicaciones industriales

La tomografía muónica o muografía es una técnica innovadora que consiste en el uso de los muones cósmicos provenientes de las altas capas de la atmósfera para realizar inspecciones del interior de objetos de difícil acceso. Los muones interaccionan con la materia perdiendo energía y desviando su trayectoria. Cuanto más denso es el objeto, mayor es la pérdida de energía y mayor la desviación. El análisis matemático de estos observables permite la elaboración de mapas de densidad de los objetos estudiados. Existen dos tipos de tomografía muónica dependiendo del principio físico utilizado. Aquellas aplicaciones que explotan la pérdida de energía y/o atenuación de los muones son conocidas como aplicaciones de tomografía muónica de transmisión. Por el contrario, aquellas aplicaciones que utilizan la desviación angular debida al *multiple scattering* sufrido por los muones, son conocidas como aplicaciones de tomografía muónica de *scattering*. En este documento se hará referencia todo el rato a este último tipo de tomografía muónica.

Esta línea de investigación persigue, de forma pionera, el estudio de esta tecnología como una técnica de ensayo no destructivo para ser utilizada en el mantenimiento preventivo de estructuras y equipamiento industrial, así como en el control de calidad de procesos productivos. Se trata por lo tanto de una línea de investigación de carácter aplicado y con una fuerte componente de transferencia tecnología. De la misma forma, se trata de una línea con un alto componente de innovación ya que la técnica es extremadamente novedosa hoy en día.

2.5.1. Experiencia previa

Recostrucción de muones en el detector CMS

El tema central de mi tesis doctoral tiene que ver con el alineamiento de las cámaras de muones de CMS, fundamentalmente desde una perspectiva del llamado alineamiento con trazas [92], pero también con contribuciones al alineamiento basado en hardware [93, 94]. También fui uno de los autores de los algoritmos de reconstrucción de muones de CMS. Dichos algoritmos constituyen la base de toda la física llevada a cabo por el detector usando muones en el estado final. De la misma forma, tuve participación en los procesos de calibración de las cámaras de tubos de deriva de CMS [95–97] y en general participé en prácticamente todas las campañas de *commissionning* de los detectores de muones del experimento [98–101]. En los años posteriores he participado también en otros aspectos relacionados con la detección de muones como son el trabajo en su software de DQM (*Data Quality Monitoring*) y certificación, siendo el co-coordinador (L3) del grupo de *DQM, validation and certification* durante los años 2017 y 2018. También he contribuido al desa-

rrollo de algoritmos novedoso de reconstrucción como el uso de una red neuronal para estimar el momento transverso de muones de muy alto momento con alta probabilidad de haber producido *showering* en el hierro del sistema de muones. Este trabajo fue recogido en un TFM en el año 2020.

Tomografía muónica

En el año 2015, mientras trabajaba como investigador postdoctoral en la ETHZ, co-fundé la compañía Muon Tomography Systems S.L., cuyo objetivo era el de desarrollar la tomografía muónica como una herramienta de ensayos no destructivos en el sector industrial. La figura 2.8 (izquierda) muestra un esquema en el que dos detectores de muones son colocados antes y después de una estructura industrial. El análisis de las desviaciones angulares permite obtener información acerca de la estructura interna del objeto.

Desde el año 2015 hasta mi incorporación a la Universidad de Cantabria en el año 2017 actué como consultor científico de la compañía, contribuyendo tanto al desarrollo de sus detectores de muones como a los algoritmos de reconstrucción de imagen. En ese periodo, la empresa ganó diversas subvenciones del sector público (Gobierno del País Vasco y CDTI), así como del sector privado (Fundación Repsol). Una vez incorporado en la Universidad de Cantabria continué dicha colaboración a través de un proyecto al amparo del Artículo 83 para convenios con empresas o en el desarrollo de publicaciones conjuntas [102]. En el año 2018, también comencé la co-dirección de un doctorando en el marco de un doctorado industrial financiado además por el Ministerio con la subvención para la realización de doctorados industriales. Igualmente en el año 2020 dirigí un TFM con el desarrollo de un método para aplicar el principio de Maximum Likelihood para la estimación de parámetros en el contexto de la tomografía muónica.

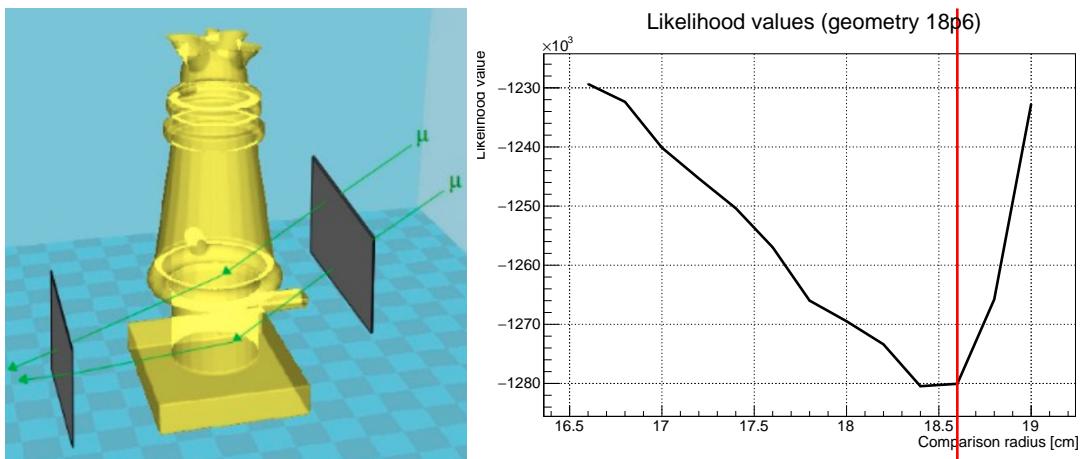


Figura 2.8: Esquema que muestra el modo de uso de tomografía muónica de *scattering* para inferir la geometría interna de una estructura industrial (izquierda); forma del Likelihood asociado a la estimación del radio interno de una tubería en el contexto de la tomografía muónica. La línea roja muestra el valor real de dicho radio (derecha).

En el año 2018 fui invitado por la Royal Society para dar una ponencia en un congreso de Tomografía Muónica en el que participaron las 10-15 instituciones trabajando en esta

técnica en el mundo. En el año 2019 fui elegido como representante español para participar en el *Technical Meeting* organizado por la Agencia Internacional de la Energía Atómica (AIEA en sus siglas en inglés). Dicho encuentro propició la creación de un documento que supondrá la recomendación de la agencia a sus países miembro en lo que respecta a dicha tecnología. En la reunión fui nombrado como editor del capítulo de Tomografía Muónica en aplicaciones industriales. El documento será publicado en los próximos meses. Todos estos desarrollos han sido también presentados en varias reuniones del CPAN, así como de la Red LHC y otros workshops internacionales.

2.5.2. Desarrollo de algoritmos de reconstrucción

Uno de los ingredientes básicos de la tomografía muónica consiste en el diseño de algoritmos que conviertan las medidas de los muones en información geométrica del sistema bajo estudio. Este problema pertenece a una categoría de problemas conocida en matemáticas como el *problema inverso*, ya que tanto la información de entrada y salida del sistema, como las ecuaciones que rigen el comportamiento del fenómeno dentro de dicho sistema son conocidas, permaneciendo como incógnitas los parámetros del sistema mismo. En el caso de la tomografía muónica este problema inverso es de naturaleza probabilística debido a la naturaleza estocástica del *multiple scattering*. Existen varios algoritmos en el mercado tales como el *Point of Closest Approach* (POCA) [103] o el basado en *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) [104] que son capaces de resolver este tipo de problemas aunque con grandes limitaciones en cuanto a la resolución espacial final obtenida. En esta línea de investigación se persigue el desarrollo de algoritmos más precisos.

Algoritmos de baja dimensión paramétrica

Una de las razones para iniciar el uso de la tomografía muónica en aplicaciones industriales tiene que ver con la naturaleza de sus problemas. Al contrario que en otros sectores, normalmente en las aplicaciones industriales se dispone de un conocimiento muy preciso de la geometría nominal de las estructuras estudiadas. En la mayor parte de los casos se persigue estimar el nivel de desgaste o la aparición de defectos que pueden verse como pequeñas variaciones geométricas sobre una geometría nominal bien conocida. Este hecho permite reducir dramáticamente la complejidad del problema inverso ya que con frecuencia puede reducirse la inferencia a unos pocos parámetros. Un ejemplo paradigmático puede encontrarse en una de las aplicaciones tratadas en los últimos años: la medida del desgaste de tuberías transportadoras de gas. En este problema, y a primer orden, existe un único parámetro de interés: el radio interno de la tubería que determina su grosor y por tanto el nivel de desgaste. Esta reducción en la dimensión parámetrica hace que estos problemas sean idóneos para tratamientos como el que ya se realizó basado en *Maximum Likelihoods* (ver Fig. 2.8, derecha), o de forma aún más interesante, para el uso de redes neuronales profundas que funcionen en modo de regresión a los parámetros de interés. En esta sublínea de trabajo se buscará el desarrollo de este tipo de algoritmos prestando atención a sus posibilidades de entrenamiento tanto con datos reales como con datos simulados.

“Machine-learning Optimized Design of Experiments”

En el año 2021 me convertí formalmente en miembro de la colaboración MODE¹ (*Machine-learning Optimized Design of Experiments*) cuyo objetivo principal es fomentar y avanzar en la producción de algoritmos de *Machine Learning* que faciliten la optimización y el diseño de experimentos. La colaboración MODE aglutina a una veintena de expertos en Estadística, Machine Learning y Física Experimental de Altas Energías. Los objetivos de la colaboración MODE son muy generales, ya que su diseño de algoritmos tiene la vocación de convertirse en un estándar para el diseño de experimentos, no exclusivamente de Física de Partículas. Por otro lado, con objeto de avanzar en este propósito, la colaboración ha elegido un conjunto de casos de uso, entre los cuáles el más importante y avanzado es el de la tomografía muónica.

Durante los próximos años, un conjunto de 5 miembros de la colaboración, estamos inmersos en la escritura de un software basado en el principio de *Differential Programming* [105], que hace uso de algoritmos secuenciales con capacidad para ser diferenciados y usados en procesos de minimización, para resolver el problema inverso asociado a la tomografía muónica de scattering.

Cabe destacar que si bien mi actividad actual en este grupo queda enmarcada en el contexto de la tomografía muónica, mi interés va más allá y en el futuro se perseguirán contribuciones más generales en relación con el concepto de diseño de experimentos optimizado con técnicas de Machine-learning.

2.5.3. Desarrollo de simulaciones basadas en redes adversarias

Muchos de los algoritmos de tomografía muónica mencionados anteriormente requieren una gran cantidad de simulación para ser entrenados. Tradicionalmente la simulación del paso de las partículas a través de la materia suele hacerse con el paquete GEANT4, que a pesar de estar altamente optimizado, presenta una gran complejidad computacional debido al nivel de detalle con el que produce las simulaciones. Con objeto de reducir estos tiempos, se plantea una línea de investigación que persiga la generación de simulaciones realistas de escenarios de tomografía muónica utilizando *Redes Neuronales Adversarias* (GAN) [106]. Estas redes funcionan con un principio de competición entre una red generadora que intenta crear simulaciones realistas a partir de entradas aleatorias, y una red discriminadora que persigue diferenciar si la información ofrecida como entrada es real o ha sido generada por la red. En el proceso de minimización conjunto es posible conseguir un generador con capacidad de producir simulaciones muy realistas.

¹<https://mode-collaboration.github.io/>

2.5.4. Medida del momento: tomografía muónica y LGADs

Dentro del IFCA y en colaboración con el Centro Nacional de Microelectrónica (CNM) y el Instituto Tecnológico de Aragón (ITAINNOVA), estoy liderando una iniciativa para mejorar los dispositivos de tomografía muónica con el uso de LGADs para medir el tiempo de paso de los muones por los detectores. A través de la diferencia temporal y del espacio recorrido es posible estimar la velocidad del muon y con ello su momento.

Es preciso destacar que los algoritmos de tomografía muónica sufren una grave pérdida de resolución debida a que la desviación angular de los muones no solo depende de las propiedades del material sino también de su momento. Tradicionalmente los experimentos de física de partículas estiman el momento a través de la medida de la curvatura de los muones en campos magnéticos intensos, sin embargo, este tipo de tecnología no resulta rentable para aplicaciones industriales. Por lo tanto, hasta la fecha todos los intentos de tomografía muónica han promediado el momento de los muones con la consecuente pérdida de resolución. Un sistema como el propuesto aquí es por lo tanto único y revolucionario dentro del campo.

Esta línea de investigación será desarrollada en el contexto del programa de Prueba de Concepto asociado al plan estatal. El proyecto ha sido concedido y se espera que entre en vigor en los próximos meses. El proyecto tiene como objetivo hacer una prueba de concepto con sensores LGAD y su correspondiente electrónica, capaces de proporcionar una resolución temporal de 50 ps, y con una superficie de detección de pocos centímetros. Dentro del proyecto se estudiarán también algoritmos de reconstrucción que sean capaces de explotar la información del momento, así como la escalabilidad del sistema para superficies de detección más extensas.

2.6. Futuros aceleradores

En el año 2019 tuvo lugar en Granada el *Open Symposium - Update of the European Strategy for Particle Physics*. Este evento, en el que participé, junto con una parte muy significativa de la comunidad europea de física de partículas, sirvió para discutir los pilares básicos de la estrategia europea de física de partículas para los años venideros. En el año 2020, el *European Strategy for Particle Physics Group* elaboró un documento [107] recogiendo las conclusiones de este proceso, estableciendo las líneas estratégicas principales de la comunidad de física de partículas europea.

Este documento reconoce como máxima prioridad la construcción de un colisionador electrón-positrón que suponga una factoría de bosones de Higgs. En el largo plazo, se reconoce la ambición de construir un colisionador protón-protón con la máxima energía alcanzable posible. Para perseguir estos objetivos, la comunidad de física de partículas debe comenzar sus esfuerzos de investigación y desarrollo en tecnologías de aceleración avanzadas y particularmente en el desarrollo de imanes de superconductor de alto campo, incluyendo superconductores de alta temperatura. La comunidad debe investigar la via-

bilidad técnica y financiera de un futuro colisionador de hadrones en el CERN con una energía del centro de masas de al menos 100 TeV, que tenga a un acelerador electrón-positrón para estudiar las propiedades del bosón de Higgs como etapa previa. A la vez, la estrategia considera compatibles estos esfuerzos con la construcción del *International Linear Collider (ILC)* en Japón, en el que la comunidad europea desearía colaborar. En segundo lugar, la estrategia subraya la importancia de intensificar y financiar adecuadamente la investigación en nuevas tecnologías de aceleración, especialmente imanes de alto campo, superconductores de alta temperatura, aceleración con *plasma wakefield* y otras estructuras de aceleración de alto gradiente, entre otras.

En este contexto, se propone esta línea de investigación a largo plazo, que tendrá como primer objetivo el posicionamiento científico de cara a los nuevos desarrollos y aceleradores, en congruencia con los intereses de la comunidad de física de partículas española y en última instancia con las líneas generales de la estrategia europea. Este posicionamiento desembocará en el futuro en la participación en los próximos esfuerzos de la comunidad.

Bibliografía

- [1] S.L. Glashow, Nucl. Phys. 22 (1961) 579
- [2] A. Salam, J.C. Ward, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 168
- [3] S. Weinberg, Phys., Phys. Rev. D 19 (1967) 1264
- [4] S.L. Glashow, J. Iliopoulos y L. Maiani, Phys. Rev. D 2 (1970) 1285
- [5] P. Anderson, Phys. Rev, Phys. Rev. Lett. 130 (1963) 439
- [6] P.W. Higgs, Phys. Rev. Lett. 12 (1964) 132
- [7] P.W. Higgs, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508
- [8] P.W. Higgs, Phys. Rev. 145 (1966) 1156
- [9] F. Englert y R. Brout, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 321
- [10] G.S. Guralnik, C.R. Hagen y T.W.B. Kibble, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 585
- [11] T.W.B. Kibble, Phys. Rev. 155 (1967) 1554
- [12] UA1 Collaboration, Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at $s=540$ GeV, Phys. Lett. B 122 (1) 103-1161983
- [13] UA2 Collaboration, Observation of single isolated electrons of high transverse momentum in events with missing transverse energy at the CERN pp collider, Phys. Lett. B 122 (5) 476-4851983
- [14] UA1 Collaboration, Experimental Observation of Lepton Pairs of Invariant Mass Around 95-GeV/c**2 at the CERN SPS Collider, Phys. Lett. B 126 (398-403) 1983
- [15] UA2 Collaboration, Evidence for $Z \rightarrow e^+e^-$ at the CERN pp collider, Phys. Lett. B 129 (130-140) 1983
- [16] CDF Collaboration, Observation of top quark production in pp collisions with the Collider-Detector at Fermilab, Phys. Rev. Lett. 74 (14) 2626-2631
- [17] D0 Collaboration, Observation of the top quark, Phys. Rev. Lett. 74 (14) 2632-2637

- [18] ATLAS Collaboration, Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, *Phys. Lett. B* 716 (29) 2012
- [19] CMS Collaboration, Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, *Phys. Lett. B* 716 (31) 2012
- [20] R. Barbieri and G. F. Giudice, Upper bounds on supersymmetric particle masses, *Nucl. Phys. B* 306 (1988) 63
- [21] E. Witten, Dynamical breaking of supersymmetry, *Nucl. Phys. B* 188 (1981) 513
- [22] D. J. E. Callaway (1988). Triviality Pursuit: Can Elementary Scalar Particles Exist?, *Phys. Rept.* 167 1988 5
- [23] Thomas Mannel, Theory and Phenomenology of CP Violation, *Nucl. Phys. B* 167 (2007) 170-174
- [24] G. Bertone, D. Hooper, and J. Silk, Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints, *Phys. Rept.* 405 (2005) 279
- [25] Peebles, P. J. E.; Ratra, Bharat, The cosmological constant and dark energy, *Reviews of Modern Physics.* 75 (2), 559–606
- [26] Super-Kamiokande Collaboration, Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos, *Phys. Rev. Lett.* 81 (8) 1562–1567
- [27] Stephen P. Martin, A Supersymmetry Primer, arXiv:hep-ph/9709356v5, 2008
- [28] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, G. Dvali, The Hierarchyproblem and new dimensions at a millimeter, *Phys. Lett. B* 429 (1998) 263–272
- [29] I. Antoniadis, N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, G. Dvali, Newdimensions at a millimeter to a Fermi and superstrings at a TeV, *Phys. Lett. B* 436 (1998) 257–263
- [30] L. Randall, R. Sundrum, A Large mass hierarchy from a smallextra dimension, *Phys. Rev. Lett.* 83 (1999) 3370–3373
- [31] Schomerus, V, A Primer on String Theory. Cambridge: Cambridge University Press, 2017, ISBN:9781316672631
- [32] Ross, G., Grand Unified Theories, Westview Press. ISBN 978-0-8053-6968-7
- [33] G. von Gersdorff, E. Ponton and R. Rosenfeld, The dynamical composite Higgs, *JHEP* 06 (2015) 119
- [34] Lyndon Evans and Philip Bryant (Editors), The LHC Machine, 2008 *JINST* 3 S08001
- [35] The ALICE Collaboration, The Alice experiment at the CERN LHC, 2008 *JINST* 3 S08002

- [36] The ATLAS Collaboration, The ATLAS experiment at the CERN LHC, 2008 JINST 3 S08003
- [37] The CMS Collaboration, The CMS experiment at the CERN LHC, 2008 JINST 3 S08004
- [38] The LHC-b Collaboration, The LHC-b experiment at the CERN LHC, 2008 JINST 3 S08005
- [39] The CMS Collaboration, A measurement of the Higgs boson mass in the diphoton decay channel, Physics Letters B Volume 805, 135425, 10.1016/j.physletb.2020.135425
- [40] The ATLAS Collaboration, Measurement of the Higgs boson mass in the $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ channels with $\text{sqrt}(s) = 13$ TeV pp collisions using the ATLAS detector, Phys. Lett. B 784 (2018) 345, 10.1016/j.physletb.2018.07.050
- [41] The CMS Collaboration, Combined measurements of Higgs boson couplings in proton-proton collisions at $\text{sqrt}(s) = 13$ TeV, Eur. Phys. J. C 79 (2019) 421, 10.1140/epjc/s10052-019-6909-y
- [42] The ATLAS Collaboration, Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 80 inv fb of proton–proton collision data at $\text{sqrt}(s) = 13$ TeV collected with the ATLAS experiment, Phys. Rev. D 101 (2020) 012002, 10.1103/PhysRevD.101.012002
- [43] The CMS Collaboration, Study of the mass and spin-parity of the Higgs boson candidate via its decays to Z boson pairs, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 081803, 10.1103/PhysRevLett.110.081803
- [44] The ATLAS Collaboration, Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data, Phys. Lett. B 726 (2013) 120, 10.1016/j.physletb.2013.08.026
- [45] The CMS Collaboration, Observation of the Higgs boson decay to a pair of tau leptons with the CMS detector, Phys. Lett. B 779 (2018) 283, 10.1016/j.physletb.2018.02.004
- [46] The ATLAS Collaboration, Cross-section measurements of the Higgs boson decaying into a pair of tau-leptons in proton-proton collisions at $\text{sqrt}(s) = 13$ TeV with the ATLAS detector, Phys. Rev. D 99 (2019) 072001, 10.1103/PhysRevD.99.072001
- [47] The CMS Collaboration, Evidence for Higgs boson decay to a pair of muons, JHEP 148 (2021), 10.1007/JHEP01(2021)148
- [48] The ATLAS Collaboration, A search for the dimuon decay of the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector, Physics Letters B, Volume 812, 135980, 10.1016/j.physletb.2020.135980
- [49] The CMS Collaboration, Observation of ttH Production, Phys. Rev. Lett. 120, 231801, 10.1103/PhysRevLett.120.231801
- [50] The CMS Collaboration, Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector, Phys. Lett. B 784 (2018) 173, 10.1016/j.physletb.2018.07.035

- [51] The CMS Collaboration, Measurement of normalized differential $t\bar{t}$ cross sections in the dilepton channel from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV., JHEP 04 (2018) 60, 10.1007/JHEP04(2018)060
- [52] The ATLAS Collaboration, Measurements of top-quark pair differential cross-sections in the emu channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 292, 10.1140/epjc/s10052-017-4821-x
- [53] The CMS Collaboration, Measurement of differential cross sections for top quark pair production using the lepton+jets final state in proton-proton collisions at 13 TeV, Phys. Rev. D 95 (2017) 092001, 10.1103/PhysRevD.95.092001
- [54] The ATLAS Collaboration, Measurements of top-quark pair differential and double-differential cross-sections in the l+jets channel with pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, Eur. Phys. J. C 79 (2019) 1028, 10.1140/epjc/s10052-019-7525-6
- [55] The CMS Collaboration, Measurement of the single top quark and antiquark production cross sections in the t channel and their ratio in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, Physics Letters B Volume 800, 135042, 10.1016/j.physletb.2019.135042
- [56] The ATLAS Collaboration, Measurement of single top-quark production in association with a W boson in the single-lepton channel at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector, Eur. Phys. J. C 81 (2021) 720, 10.1140/epjc/s10052-021-09371-7
- [57] The CMS Collaboration, Measurement of $t\bar{t}$ normalised multi-differential cross sections in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, and simultaneous determination of the strong coupling strength, top quark pole mass, and parton distribution functions, The European Physical Journal C volume 80, 658 (2020), 10.1140/epjc/10052-020-7917-7
- [58] The ATLAS Collaboration, Measurement of the top-quark mass in $t\bar{t}+1$ -jet events collected with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV, JHEP 11 (2019) 150, 10.1007/JHEP11(2019)150
- [59] The CMS Collaboration, Measurement of the B^0_s to $\mu\mu$ branching fraction and search for B^0 to $\mu\mu$ with the CMS experiment, Phys. Rev. Lett. 111, 101804, 10.1103/PhysRevLett.111.101804
- [60] The LHC-b Collaboration, Measurement of the B^0_s to $\mu\mu$ Branching Fraction and Effective Lifetime and Search for B^0 to $\mu\mu$ decays, Phys. Rev. Lett. 118, 191801, 10.1103/PhysRevLett.118.191801
- [61] CERN, High-Luminosity Large Hadron Collider: Technical Design Report, CERN Yellow Report series, ISBN: 9789290835868 (print version, paperback), ISBN: 9789290835875 (electronic version), 10.23731/CYRM-2020-0010
- [62] The CMS Collaboration, The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker: Technical Design Report, CERN-LHCC-2017-009 ; CMS-TDR-014. - 2017
- [63] The CMS Collaboration, The Phase-2 Upgrade of the CMS Level-1 Trigger: Technical Design Report, ISBN: 9789290835677 (printed version, paperback), ISBN: 9789290834663 (electronic version)

- [64] The CMS Collaboration, The Phase-2 Upgrade of the CMS Endcap Calorimeter: Technical Design Report, CERN-LHCC-2017-023 ; CMS-TDR-019
- [65] The CMS Collaboration, The Phase-2 Upgrade of the CMS Barrel Calorimeter: Technical Design Report, CERN-LHCC-2017-011 ; CMS-TDR-015
- [66] The CMS Collaboration, The Phase-2 Upgrade of the CMS Muon Detectors: Technical Design Report, CERN-LHCC-2017-012 ; CMS-TDR-016
- [67] The CMS Collaboration, A MIP Timing Detector for the CMS Phase-2 Upgrade Technical Design Report, CERN-LHCC-2019-003, ISBN: 978-92-9083-523-3
- [68] G. Pellegrini et al., Technology developments and first measurements of Low Gain Avalanche Detectors (LGAD) for high energy physics applications, Nucl. Instrum. Meth. A 765 (2014) 12, doi:10.1016/j.nima.2014.06.008
- [69] N. Cartiglia et al., Design optimization of ultra-fast silicon detectors, Nucl. Instrum. Meth. A 796 (2015) 141, doi:10.1016/j.nima.2015.04.025
- [70] The CMS Collaboration, Search for Physics Beyond the Standard Model in Opposite-Sign Dilepton Events at $\sqrt{s} = 7$ TeV, JHEP 06-26, 10.1007/JHEP06(2011)026
- [71] The CMS Collaboration, Search for physics beyond the standard model in events with a Z boson, jets, and missing transverse energy in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, Phys. Lett. B 716 (260-284) 10.1016/j.physletb.2012.08.026
- [72] The CMS Collaboration, Search for new physics in events with opposite-sign leptons, jets, and missing transverse energy in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, Phys. Lett. B 718 (815-840) 10.1016/j.physletb.2012.11.036
- [73] The CMS Collaboration, Search for Physics Beyond the Standard Model in Events with Two Leptons, Jets, and Missing Transverse Momentum in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV, JHEP 04-124, 10.1007/JHEP04(2015)12
- [74] The CMS Collaboration, Search for new physics in final states with two opposite-sign, same-flavor leptons, jets, and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, JHEP 13(2016), 10.1007/JHEP13(2016)013
- [75] The CMS Collaboration, Search for new phenomena in final states with two opposite-charge, same-flavor leptons, jets, and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, JHEP 03 (2018) 076, 10.1007/JHEP03(2018)076
- [76] The CMS Collaboration, Search for supersymmetric partners of electrons and muons in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, Phys. Lett. B 790 (140-166) 10.1016/j.physletb.2019.01.005
- [77] The CMS Collaboration, Search for supersymmetry in final states with two oppositely charged same-flavor leptons and missing transverse momentum in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, JHEP 04-123, 10.1007/JHEP04(2021)123

- [78] The CMS Collaboration, Search for new physics with same-sign isolated dilepton events with jets and missing transverse energy at the LHC, JHEP 06-77, 10.1007/JHEP06(2011)077
- [79] The CMS Collaboration, Search for new physics with same-sign isolated dilepton events with jets and missing transverse energy, Phys. Rev. Lett. 109 (071803) 10.1103/PhysRevLett.109.071803
- [80] The CMS Collaboration, Search for new physics in events with same-sign dileptons and jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV, JHEP 1401 163-173, 10.1007/JHEP01(2014)163
- [81] The CMS Collaboration, Search for new physics in same-sign dilepton events in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, Phys. Lett. 76 (2016) 10.1140/epjc/s10052-016-4261-z
- [82] The CMS Collaboration, Search for supersymmetry in hadronic final states using MT2 in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, JHEP 1210-018, 10.1007/JHEP10(2012)018
- [83] The CMS Collaboration, Searches for Supersymmetry using the MT2 Variable in Hadronic Events Produced in pp Collisions at 8 TeV, JHEP 5 078-088, 10.1007/JHEP05(2015)078
- [84] The CMS Collaboration, Search for new physics with the MT2 variable in all-jets final states produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, JHEP 6 (2016), 10.1007/JHEP10(2016)006
- [85] The CMS Collaboration, Search for new phenomena with the MT2 variable in the all-hadronic final state produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, Phys. Lett. 77 (170) 10.1140/epjc/s10052-017-5267-x
- [86] The CMS Collaboration, The CMS Trigger System, JINST 12-P01020, 10.1088/1748-0221/12/01/P01020
- [87] The CMS Collaboration, Searches for pair production of charginos and top squarks in final states with two oppositely charged leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, JHEP 79 (2018) 11, 10.1007/JHEP11(2018)079
- [88] The CMS Collaboration, Search for the pair production of light top squarks in the emu final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, JHEP 3 (2008) 101, 10.1007/JHEP03(2019)101
- [89] The CMS Collaboration, Search for Dark Matter Particles Produced in Association with a Top Quark Pair at $\sqrt{s} = 13$ TeV, Phys. Rev. Lett. 122 (011803) 10.1103/PhysRevLett.122.011803
- [90] R. Frühwirth et al, Estimation of detector alignment parameters using the Kalman filter with annealing", 2003 J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 29 561-574
- [91] J. Allison, Geant4 - A Simulation Toolkit, Nuclear Physics News, Volume 17 Issue 2, April 2007, doi:10.1080/10506890701404297

- [92] The CMS Collaboration, Alignment of the CMS Muon System with Cosmic-Ray and Beam-Halo, JINST. 5 - T03020, 10.1088/1748-0221/5/03/T03020
- [93] Alicia Calderon Tazon; Gervasio Gomez; Francisco Javier Gonzalez Sanchez; Celso Martinez Rivero; Francisco Matorras Weinig; Teresa Rodrigo; Pablo Martinez Ruiz del Arbol; Luca Scodellaro; Mar Sobron Sanudo; Ivan Vila, Motions of CMS detector structures due to the magnetic field forces as observed by the Link Alignment System during the test of the 4 Tesla Magnet Solenoid, Nuclear Instruments and Methods A. 606, pp. 344 - 361, 10.1016/j.nima.2009.03.252
- [94] The CMS Collaboration, Aligning the CMS Muon Chambers with the Muon Alignment System during an Extended Cosmic Ray Run, JINST. 5 - T03019, 10.1088/1748-0221/5/03/T03019
- [95] The CMS Collaboration, Calibration of the barrel muon drift tubes of CMS, Nuc. Ins. and Met. A, doi:10.1016/j.physletb.2003.10.071
- [96] The CMS Collaboration, Calibration of the CMS Drift Tube Chambers and Measurement of the Drift Velocity with Cosmic Rays, JINST. 5 - T03016, 10.1088/1748-0221/5/03/T03016
- [97] The CMS Collaboration, Performance of the CMS Drift Tube Chambers with Cosmic Rays, JINST. 5 - T03015, 10.1088/1748-0221/5/03/T03015
- [98] The CMS Collaboration, CMS Data Processing Workflows during an Extended Cosmic Ray Run, JINST. 5 - T03006, 19/03/2010, 10.1088/1748-0221/5/03/T03006
- [99] The CMS Collaboration, Commissioning of the CMS Experiment and the Cosmic Run at Four Tesla, JINST. 5 - T03001, 10.1088/1748-0221/5/03/T03001
- [100] The CMS Collaboration, Precise Mapping of the Magnetic Field in the CMS Barrel Yoke using Cosmic Rays, JINST. 5 - T03021, 10.1088/1748-0221/5/03/T03021
- [101] The CMS Collaboration, Performance of CMS Muon Reconstruction in Cosmic-Ray Events, JINST. 5 - T03022, 10.1088/1748-0221/5/03/T03022
- [102] Pablo Martinez Ruiz del Arbol; Pablo Gomez Garcia; Carlos Diez Gonzalez; Aitor Orio Alonso, Non-destructive testing of industrial equipment using muon radiography, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 10.1098/rsta.2018.0054
- [103] Riggi S, Antonuccio-Delogu V, Bandieramonte M, Becciani U, Costa A, La Rocca P, Vitello F., Muon tomography imaging algorithms for nuclear threat detection inside large volume containers with the Muon Portal detector, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip. 728, 59–68., 10.1016/j.nima.2013.06.040
- [104] Schultz LJ, Blanpied GS, Borozdin KN, Fraser AM, Hengartner NW, Klimenko AV, Sossong MJ, Statistical reconstruction for cosmic ray muon tomography, IEEE Trans. Image Process. 16, 1985–1993, 10.1109/TIP.2007.901239

- [105] Wang, Fei; Decker, James; Wu, Xilun; Essertel, Gregory; Rompf, Tiark, Bengio, S.; Wallach, H.; Larochelle, H.; Grauman, K., Backpropagation with Callbacks: Foundations for Efficient and Expressive Differentiable Programming, *Advances in Neural Information Processing Systems 31*, Curran Associates, Inc., pp. 10201–10212
- [106] Goodfellow, Ian; Pouget-Abadie, Jean; Mirza, Mehdi; Xu, Bing; Warde-Farley, David; Ozair, Sherjil; Courville, Aaron; Bengio, Yoshua (2014), Generative Adversarial Nets, *proceedings of the International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2014)*. pp. 2672–2680
- [107] Europea Strategy Group, 2020 Update of the European Strategy for Particle Physics (Brochure), CERN-ESU-015