

# Curriculum Vitae y proyectos docente e investigador

Candidato	Pablo Martínez Ruiz del Árbol
Concurso	6/21
Departamento	Física Moderna
Área	Física Atómica, Molecular y Nuclear
Perfil docente	Asignaturas propias del área
Perfil investigador	Física Experimental de Altas Energías

# Esquema de la presentación

1) Curriculum Vitae

2) Proyecto Docente

3) Proyecto Investigador

# Curriculum Vitae

Información complementaria:

- [Historial Científico, Académico y CV \(HistorialCientificoAcademicoYCV.pdf\)](#)
- [Justificaciones de méritos \(justificacionMeritos.pdf\)](#)

# Formación Académica

## › Licenciado en Ciencias Físicas

- › Universidad: Universidad de Cantabria
  - › Fecha: 13 de Julio de 2005
  - › Nota media final: 9.3
  - › Premios: Premio extraordinario de fin de carrera
- 

## › Doctor en Física:

- › Universidad: Universidad de Cantabria
- › Fecha: 25 de Junio de 2010
- › Nota: Sobresaliente “Cum Laude”
- › Título de la tesis: “Desarrollo y aplicación de algoritmos de alineamiento para la optimización de la detección de muones en el experimento CMS del LHC”
- › Premio: Premio extraordinario de tesis doctoral

# Resumen ejecutivo

- Mi trayectoria se enmarca en el contexto de la **Física Experimental de Altas Energías**
- Concretamente en el seno de la colaboración **CMS**, cubriendo todos los aspectos del campo:
  - “Commissioning”, calibración y alineamiento de detectores de partículas
  - Computación en entornos GRID
  - Análisis de datos incluyendo el uso de técnicas modernas de análisis (IA)
  - Desarrollo de hardware e instrumentación para detectores de partículas
- Total de **60** artículos en revistas de alto impacto, **45** congresos y **16** proyectos de investigación
- Mi actividad investigadora se complementa con proyectos de **transferencia tecnológica**

---

- Docencia mayormente en el grado de Física y asignaturas relacionadas con las Altas Energías
  - Aproximadamente 7 cursos académicos en ETH Zürich y 5 en la Universidad de Cantabria
  - Un total de **900 horas** de clase presencial
  - Dirección de **1 tesis doctoral (+ 3 en curso)**, **5 TFGs** y **7 TFM**s
- La actividad docente se complementa también con **actividades de divulgación**

# Trayectoria Profesional



**Beca introducción a la investigación**  
(Septiembre 2005 – Diciembre 2005)

**Beca I3P para la realización de tesis doctorales con interés industrial**  
(Enero 2006 – Diciembre 2009)



**Contrato investigador predoctoral**  
(Enero 2010 – Septiembre 2010)

Unidad de trabajo:



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

**Investigador postdoctoral**  
(Octubre 2010 – Febrero 2017)

Unidad de trabajo:



**Contrato Ramón y Cajal**  
(Marzo 2017 – Febrero 2022)

Unidad de trabajo:

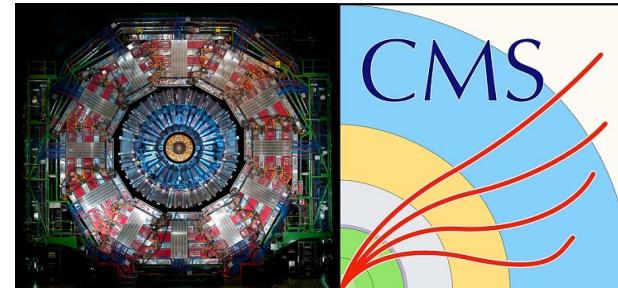


2005

2010

2017

2022



# Trayectoria Profesional



**Beca introducción a la investigación**  
(Septiembre 2005 – Diciembre 2005)

**Beca I3P para la realización de tesis doctorales con interés industrial**  
(Enero 2006 – Diciembre 2009)



**Contrato investigador predoctoral**  
(Enero 2010 – Septiembre 2010)

Unidad de trabajo:

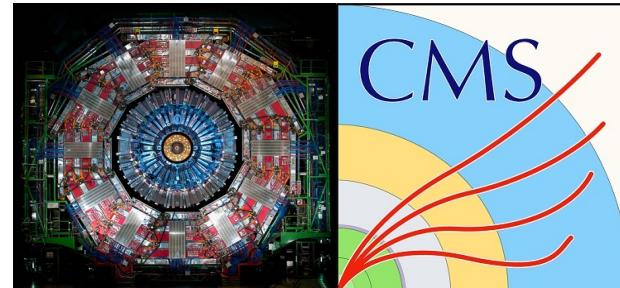


2005

2010

2017

2022



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

**Investigador postdoctoral**  
(Octubre 2010 – Febrero 2017)

Unidad de trabajo:



**Contrato Ramón y Cajal**  
(Marzo 2017 – Febrero 2022)

Unidad de trabajo:

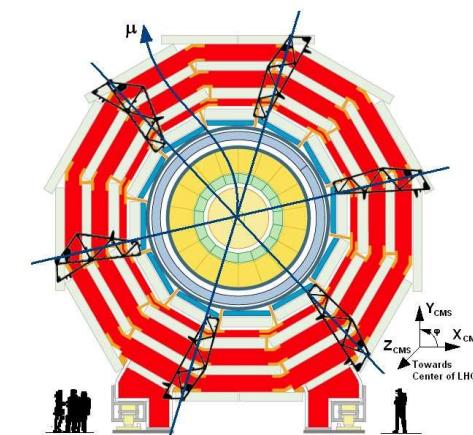
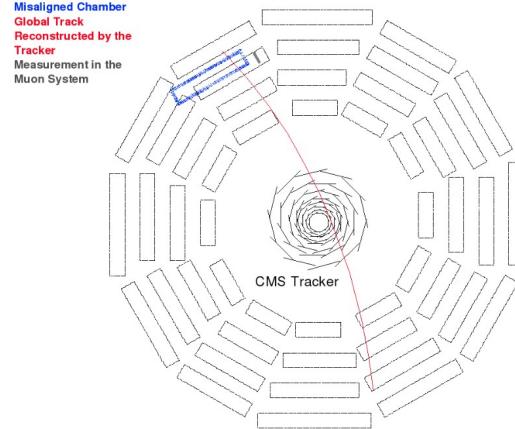
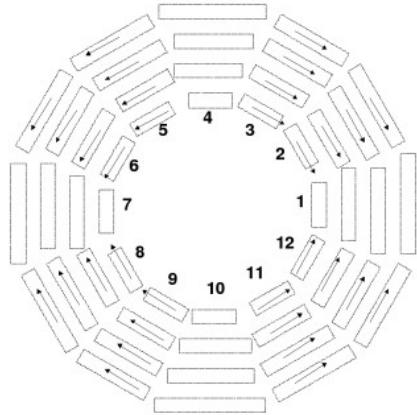


# Participación en proyectos de investigación

- “Participación en los experimentos CMS y CDF”
  - Referencia del proyecto: **MICINN FPA2005-08140**
  - Investigadora principal: **Teresa Rodrigo**
- “Física en colisionadores hadrónicos (Experimentos CMS y CDF)”
  - Referencia del proyecto: **MICINN FPA2008-06112-C02-11**
  - Investigadora principal: **Teresa Rodrigo**
- “Desarrollo de operaciones de un Tier2 federado para el experimento CMS”
  - Referencia del proyecto: **FPA2007-66530-C02-01**
  - Investigador principal: **Francisco Matorras**

# Alineamiento del sistema de muones y reconstrucción

- Desarrollo de **algoritmos de alineamiento** del sistema de muones usando **fotogrametría**
  - Primer alineamiento relativo de las cámaras de muones dentro de las “ruedas” de CMS
- Desarrollo de **algoritmos de alineamiento** del sistema de muones usando **técnicas de trazas**
  - Desarrollo de infraestructura de alineamiento dentro del software de CMS
  - **Alineamiento interno** de las cámaras de muones del barril de CMS
  - **Alineamiento** de las cámaras de muones de CMS **con respecto al Tracker**
- **Calibración** de las posiciones de los “MABs” del **sistema hardware de alineamiento**
  - Posicionamiento relativo de los instrumentos instalados en los MABs



# Alineamiento del sistema de muones y reconstrucción

- **Aplicación de algoritmos en las campañas de “commissioning” del experimento CMS**
  - Magnet Test Cosmic Challenge, Cosmic-RUn at Zero TEsla, Cosmic-Run at Four Tesla
  - Estancias en el CERN por un total de 23 meses durante esta época
- **Persona de contacto** entre el grupo de “Alignment&Calibration” y el grupo de alineamiento
- **Responsable** de las **geometrías de alineamiento de muones** en la base de datos global de CMS
- Testado y “commissioning” de la **infraestructura computacional de alineamiento en el T2**
  - Sistemas de acceso a bases de datos globales para constantes de alineamiento y calibración
  - Participación en campañas de computing (CSA06 and CSA08)
- **Desarrollo de los algoritmos de reconstrucción de muones de CMS**
  - Contribución directa a la implementación de los algoritmos
  - “Commissioning” y testado de los algoritmos
  - Firmante de la nota fundamental de reconstrucción en CMS

Available on CMS information server

CMS AN 2008/097



July 8, 2009

## Muon Reconstruction in the CMS Detector

G. Abbiendi<sup>(1)</sup>, N. Adam<sup>(10)</sup>, J. Alcaraz<sup>(2)</sup>, N. Amapane<sup>(4)</sup>, E. Antillon<sup>(4)</sup>, R. Bellan<sup>(9)</sup>, I. Belopolsky<sup>(9)</sup>, J. Bloch<sup>(7)</sup>, C. Campagnari<sup>(8)</sup>, T. Cox<sup>(9)</sup>, A. Evertz<sup>(1)</sup>, A. Grelli<sup>(4)</sup>, J. Goh<sup>(10)</sup>, V. Halyo<sup>(10)</sup>, A. Hunt<sup>(16)</sup>, E. James<sup>(7)</sup>, P. Kalavala<sup>(8)</sup>, S.C. Kan<sup>(11)</sup>, M. Konetski<sup>(12)</sup>, D. Kovalsky<sup>(8)</sup>, V. Krutelyov<sup>(8)</sup>, C. Liu<sup>(4)</sup>, P. Martinez<sup>(17)</sup>, D. Miller<sup>(4)</sup>, M. Mulders<sup>(5)</sup>, N. Neumeister<sup>(4)</sup>, D. Pagano<sup>(6)</sup>, J. Pivarski<sup>(1)</sup>, J. Rihm<sup>(9)</sup>, S. Stoynev<sup>(13)</sup>, P. Traczyk<sup>(5)</sup>, D. Trocino<sup>(4)</sup>, J.R. Vlimant<sup>(3)</sup>, R. Wilkinson<sup>(15)</sup>

### Abstract

The reconstruction of muons in CMS combining tracking and calorimeter information is described. The high-level muon physics objects are reconstructed in a multi-faceted way, with the final collection being comprised of three different muon types, Stand-alone, Global and Tracker muons. The reconstruction in the muon spectrometer starts with the reconstruction of hit positions in the DT, CSC and RPC subsystems. Hits within each DT and CSC chamber are then matched to form “segments” (track stubs). The segments are collected and matched to generate seeds that are used as a starting point for the actual track fit of DT, CSC and RPC hits. The result is a reconstructed track in the muon spectrometer, and is called “stand-alone muon”. Stand-alone muon tracks are then matched with tracker tracks to generate “global muon” tracks, featuring the full CMS resolution. “Tracker muons” are muon objects reconstructed with an algorithm that starts from a silicon tracker track and looks for compatible segments in the muon chambers. A unique collection of muon objects is assembled from the stand-alone, global, and tracker muon collections. Muon isolation quantities using calorimeter information and tracker tracks for muons defined at the three different levels are combined into the muon objects.

# Selección de artículos y conferencias más importantes

## Artículos:

The CMS Collaboration, “**Alignment of the CMS Muon System with Cosmic-Ray and Beam-Halo Muons**”, JINST, 5, T03020, 10.1088/1748-0221/5/03/T03020

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

The CMS Collaboration, “**Performance of CMS Muon Reconstruction in Cosmic-Ray Events**”, JINST, 5, T03022, 10.1088/1748-0221/5/03/T03022

## Conferencias:

P. Martínez Ruiz del Árbol, “**Commissioning and performance of the CMS detector**”, 22<sup>nd</sup> Rencontres de Blois on Particle Physics and Cosmology: first results from the LHC, 2010

P. Martínez Ruiz del Árbol, “**Muon Alignment in ATLAS and CMS**”, Detector Understanding with the First LHC Data, DESY, 2009

P. Martínez Ruiz del Árbol, “**The CMS Muon System Alignment**”, 17<sup>th</sup> International Conference on Computing in High Energy Physics, CHEP09

# Resumen de hitos de la etapa pre-doctoral

- Participación en las principales **campañas de commissioning** del detector CMS
- Desarrollo de algoritmos de **alineamiento** (interno y global) y de **reconstrucción** en CMS
  - Las primeras constantes de alineamiento del sistema de muones usadas en el LHC
  - Algoritmos de reconstrucción de muones usados desde entonces por la colaboración
- **Premio a contribución sobresaliente** otorgado por la colaboración CMS:
  - “CMS Achievement Award for the outstanding contribution to the muon alignment program”
- **Premio extraordinario de doctorado** otorgado por la Universidad de Cantabria
- **Estancias** en centros internacionales de prestigio **durante 23 meses (CERN)**
- Un total de **15 publicaciones en revistas del primer tercil** (primer cuartil en su mayoría)
- Un total de **5 conferencias nacionales e internacionales + 3 workshops internacionales**
- Miembro del **comité científico** del “CMS Muon Barrel Workshop” en el CERN
- Asistencia a cursos y escuelas: Taller de Altas Energías, CERN-Fermilab School
- Participación en actividades de divulgación: Participación en CMS International Masterclasses

# Trayectoria Profesional



Beca introducción a la investigación  
(Septiembre 2005 – Diciembre 2005)

Beca I3P para la realización de tesis  
doctorales con interés industrial  
(Enero 2006 – Diciembre 2009)



Contrato investigador predoctoral  
(Enero 2010 – Septiembre 2010)

Unidad de trabajo:

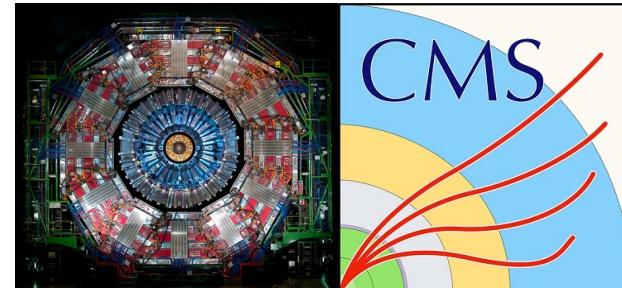


2005

2010

2017

2022



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Investigador postdoctoral  
(Octubre 2010 – Febrero 2017)

Unidad de trabajo:



Contrato Ramón y Cajal  
(Marzo 2017 – Febrero 2022)

Unidad de trabajo:

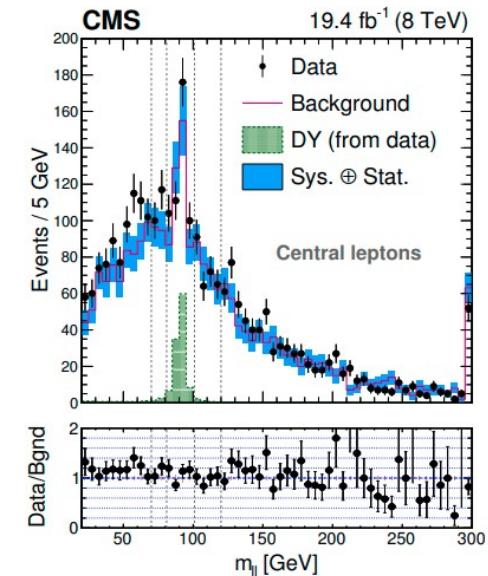


# Participación en proyectos de investigación

- “High pt physics with CMS and Upgrades of the CMS Barrel pixel detector”
  - Referencia del proyecto: **SNF Project Nr. 200021-134939**
  - Investigador principal: **Rainer Wallny**
- “Search for new physics and measurements of higgs boson properties with CMS”
  - Referencia del proyecto: **SNF Project Nr. 2013-146398**
  - Investigador principal: **Rainer Wallny**
- “Measurements of Higgs boson properties and Searches for Supersymmetry with CMS”
  - Referencia del proyecto: **SFN Project Nr. 2014-153664**
  - Investigador principal: **Rainer Wallny**
- “Characterization of the higgs boson and searches for supersymmetry with CMS”
  - Referencia del proyecto: **SFN Project Nr. 2016-166294**
  - Investigador principal: **Rainer Wallny**

# Supersimetría con leptones de carga opuesta y mismo sabor

- **Liderazgo** de este tipo de búsquedas de supersimetría **dentro del grupo de SUSY de CMS**
  - Consideradas como una de las búsquedas principales “**flagship analysis**” dentro de CMS
- **Coordinación** de un grupo de doctorandos y postdocs de diferentes universidades
  - Supervisión de dos estudiantes de doctorado en la ETHZ
- **Contribución integral:** diseño, ejecución, análisis estadístico, persona de contacto
- Compendio de **7 trabajos** con creciente riqueza y extensión analizando datos de 7, 8 y 13 TeV
  - **(2010-2012)** → Leptones compatibles con bosón Z y no compatibles con bosón Z
  - **(2012-2014)** → Extensión a búsqueda de señal de tipo “Edge”
  - **(2014-2017)** → Extensión a “ElectroWeak” y “sleptons”
- El dataset de 8 TeV mostró **un gran exceso de datos sobre fondo**
  - Considerado como el mayor indicio de nueva física en CMS
  - Reconocido como el análisis más escrutado hasta la fecha
  - Gran impacto dentro de la comunidad teórica



# Otras contribuciones a análisis de SUSY y spin-offs

- › Contribución a análisis de **SUSY hadrónicos** usando la variable MT2 realizados por la ETHZ
  - Cálculo de las eficiencias leptónicas para el “lost lepton” background
- › Contribución a los análisis de **SUSY con leptones del mismo signo** realizados por la ETHZ
  - Cálculo de las eficiencias leptónicas y del método de estimación de “fake leptons”
- › Participación en análisis de **combinación y re-interpretación** de resultados de SUSY
  - Combinación de los diferentes canales para la búsqueda de supersimetría “electroweak”
  - Reinterpretación de búsqueda de supersimetría en términos del pMSSM SUSY model
- › Desarrollo de un método “Data-driven” para estimar la **corrección energética de jets-b**
  - El método surge como un spin-off de la técnica JZB empleada en los análisis de SUSY
  - Primera estimación puramente “data-driven” de las correcciones en el contexto del LHC
  - Recogido como capítulo (del que fui editor) en el artículo resumen de calibraciones de jets

The CMS Collaboration, “**Jet energy scale and resolution in the CMS experiment in pp collisions at 8 TeV**”, JINST 12(2017) 02, P02014, doi: 10.1088/1748-0221/12/02/P02014

# Simulación y trigger para el grupo de SUSY de CMS

- Durante los años **2014-2016** fui nombrado **co-coordinador “L3”** del grupo:  
“SUSY Trigger, Monte Carlo and interpretations group”
- Responsable del **diseño e implementación de las estrategias de trigger y simulación**
  - Implementación de la mayor parte de los triggers utilizados por el grupo para 13 TeV
  - Cálculo y ejecución de las simulaciones de señal utilizados por el grupo para 13 TeV
  - Responsable de defender los intereses del grupo en los grupos de Trigger y Simulación
- Estos triggers/simulaciones fueron **la base** para los primeros análisis de SUSY a 13 TeV (>20)
- Invitado a dar el **prestigioso “LHC Seminar”** organizado por el CERN
  - Presentación de los primeros resultados de SUSY de CMS a 13 TeV
- Organización de 2 workshops de SUSY del experimento CMS (Lisboa 2014 y Chicago 2015)
- **Editor** del capítulo de supersimetría en el artículo resumen del trigger de CMS

The CMS Collaboration, “**The CMS trigger system**”, JINST 12, P01020, doi: 10.1088/1748-0221/12/01/P01020

# Selección de artículos y conferencias más importantes

## Artículos:

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  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$** ”, JHEP 03 (2018) 076, 10.1007/JHEP03(2018)076

The CMS Collaboration, “**Combined search for electroweak production of charginos and neutralinos in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$** ”, JHEP 03(2018)160, 10.1007/JHEP03(2018)160

The CMS Collaboration, "Search for Physics Beyond the Standard Model in Events with Two Leptons, Jets, and Missing Transverse Momentum in pp Collisions at  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ ", JHEP 1504 (2015) 124, DOI:10.1007/JHEP04(2015)124

## Conferencias:

P. Martínez Ruiz del Árbol, “**Searches for SUSY in events with two or more leptons at CMS**”, ICHEP 2012: 36<sup>th</sup> International Conference on High Energy Physics

P. Martínez Ruiz del Árbol, “**Search for Beyond the Standard Model Physics in multi-leptonic and photonic final states with the CMS detector**”, ICHEP 2014: 37<sup>th</sup> International Conference on High Energy Physics

P. Martínez Ruiz del Árbol, “**CMS SUSY Searches at 13 TeV**”, The LHC Seminar, 2016

# Experiencia docente

- › Durante los años 2010-2017 un **20% de mi tiempo estuvo dedicado a docencia en la ETHZ**
- › Impartí un total de **456 horas** de clase siempre en **asignaturas del grado de Física**
- › La totalidad de estas horas se impartieron en idioma **Inglés**

Asignatura	Cursos	Total de horas
Introduction to Nuclear and Particle Physics	2010-2011 2013-2014 2014-2015 2015-2016	128
Physics I	2011-2012	24
Physics II	2011-2012 2012-2013	48
Physics Lab I	2012-2013 2015-2016 2016-2017	192
Advanced Physics Laboratory	2014-2015	64

- › Además participé en la **supervisión de 2 estudiantes de doctorado y 1 estudiante de Máster**
- › Dirigí **1 Tesis de Máster** y a **1 estudiante del programa “Summer Student” del CERN**
- › Participé como **profesor en el CMS Data Analysis School** celebrado en Pisa en 2012

# Resumen de hitos de la etapa post-doctoral (I)

- **Liderazgo** de búsquedas de SUSY con leptones del mismo sabor y carga opuesta en CMS
- Co-convener (L3) del grupo “**Trigger, Montecarlo and Interpretations**” del grupo de SUSY
  - Preparación de todos los triggers y simulaciones del grupo para la toma de datos de 13 TeV
- **Estancias** en centros internacionales de prestigio (CERN) por un total de **6 años y 4 meses**
- Un total de **31 publicaciones** en revistas del primer tercil (primer cuartil en su mayoría)
- Un total de **4** conferencias nacionales e internacionales + **8** workshops internacionales
  - Incluyendo 2 contribuciones en ICHEP: ICHEP2012 y ICHEP2014
- Invitado a **2 seminarios** en instituciones de prestigio:
  - El **LHC CERN Seminar** presentando los primeros resultados de SUSY a 13 TeV
  - Seminario sobre búsquedas de SUSY con dos leptones en **Universidad de Zürich**
- Miembro del comité científico de los “**CMS SUSY Workshops**” en Lisboa y Chicago
- Referee de “The European Journal Physics C”

# Resumen de hitos de la etapa post-doctoral (II)

## ➤ Principales hitos de docencia:

- Un total de **456 horas de docencia** en el grado de Física en la ETHZ en idioma inglés
- Supervisión de **2** estudiantes de doctorado y **1** estudiante de Máster
- Dirección de **1 TFM** y **1 estudiante** del programa “**CERN Summer School**”
- Participación como profesor en el “**CMS Data Analysis School**” en Pisa

## ➤ Principales hitos de **transferencia tecnológica**:

- **Co-Fundación** en el año 2015 de la empresa tecnológica “**Muon Tomography Systems**”
  - Consultorías realizadas durante los años 2015/2016 y 2017
  - Construcción de detectores de muones
  - Diversas subvenciones del gobierno del País Vasco + Neotec (CDTI) + Inversión privada

## ➤ Principales hitos de divulgación:

- **Guía Oficial de CMS** durante los años 2010 a 2017 (más de 30 visitas a grupos)
- Participación en el reportaje “**Destino, el Universo**” de **Informe Semanal para RTVE**

# Trayectoria Profesional



Beca introducción a la investigación  
(Septiembre 2005 – Diciembre 2005)

Beca I3P para la realización de tesis  
doctorales con interés industrial  
(Enero 2006 – Diciembre 2009)



Contrato investigador predoctoral  
(Enero 2010 – Septiembre 2010)

Unidad de trabajo:

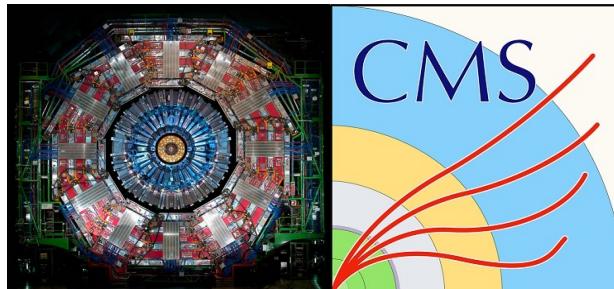


2005

2010

2017

2022



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Investigador postdoctoral  
(Octubre 2010 – Febrero 2017)

Unidad de trabajo:



Contrato Ramón y Cajal  
(Marzo 2017 – Febrero 2022)

Unidad de trabajo:



# Participación en proyectos de investigación (I)

- “Centro de procesado de datos para el LHC: Tier-2 para el experimento CMS en el IFCA”
  - Referencia del proyecto: **FPA2016-78727-R**
  - Investigador principal: **Francisco Matorras**
- “XDC: Extreme DataCloud”
  - Referencia del proyecto: **H2020-EINFRA-2017-777367**
  - Investigador principal: **Jesús Marco**
- “Participation in the CMS Experiment of LHC: Run2”
  - Referencia del proyecto: **FPA2017-85155-C4-4-R**
  - Investigador principal: **Celso Martínez, Luca Scodellaro**
- “Centro de procesado de datos de CMS Tier2 en el IFCA”
  - Referencia del proyecto: **PID2019-104974RB-100**
  - Investigador principal: **Francisco Matorras**

# Participación en proyectos de investigación (II)

- “Actividades del IFCA para los "upgrades" de alta luminosidad del LHC: IT y ETL”
  - Referencia del proyecto: **PID2020-113705RB-C31** (proyecto activo)
  - Investigador principal: **Iván Vila, Gervasio Gómez**
- “Un nuevo método tomográfico de muones en 4D para la obtención de imágenes de la salud estructural de grandes infraestructuras”
  - Referencia del proyecto: **FPA2017-85155-C4-1-R** (proyecto activo)
  - Investigador principal: **Iván Vila, Gervasio Gómez**
- “Algoritmia de simulación ultra-rápida para aplicaciones industriales de tomografía muónica usando redes neuronales generativas adversarias”
  - Referencia del proyecto: **SUBVTC-2021-0026** (proyecto activo)
  - Investigador principal: **Pablo Martínez Ruiz del Árbol**

# Búsquedas de Supersimetría en CMS

- › **Liderazgo** en búsquedas en sucesos con 2 leptones del **mismo sabor y carga opuesta**
  - “**Legacy paper**” incluyendo los datos de 2016, 2017 y 2018
  - Aplicación de técnicas de fat jet para modelos EWK boosted
  - Búsquedas de sleptons con veto dinámico de los jets
- › En el año 2016 fui nombrado durante 2 años **co-coordinador (L3) del grupo de SUSY:**

“Third Generation Searches group (TBT)”
- › Responsable de las búsquedas de **partículas supersimétricas de tercera generación**:
  - Estrategia general del grupo, escrutino de los análisis, combinación de resultados, etc
  - Durante este periodo CMS publicó sus primeros resultados del “stop” a 13 TeV
- › **Contribuciones directas** en análisis de **búsquedas del stop** en el canal dileptónico:
  - Búsqueda de stops en la zona del corredor con W offshell y charginos
  - Búsqueda de stops con una masa próxima a la del quark top

# Otras búsquedas de Nueva Física en CMS

- › **Búsqueda de Materia Oscura en asociación con quarks top-antitop** en el IFCA
  - Desde el año 2017 lidero este análisis en el canal dileptónico
  - Desarrollo de un método para estimar el momento transverso del mediador de materia oscura
  - **Co-dirección de una tesis doctoral** en este temática
- › **Búsqueda de Materia Oscura en asociación con single quark top o pares top anti-top**
  - Este análisis constituye el “legacy analysis” con datos de 2016, 2017 y 2018
  - Pero además implementa nuevas zonas de señal ser sensibles a la producción con single top
  - Actualmente **co-dirigiendo una tesis doctoral** en este tema
- › **Búsquedas de Nueva Física con partículas de larga vida media** (leptones desplazados)
  - Producción de pares de bosones de alta vida media decayendo a leptones desplazados
  - Este análisis está a punto de entrar el proceso interno de escrutinio de CMS
  - Actualmente **co-dirijo una tesis doctoral** en esta temática

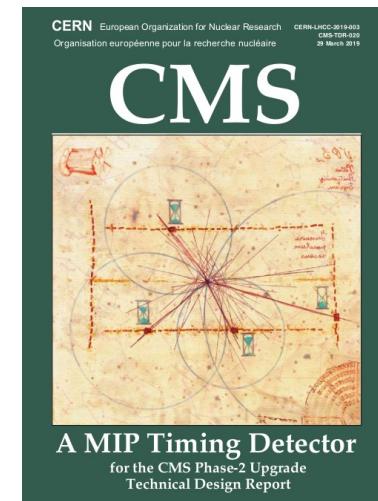
# CMS Upgrade: MIPs Timing Detector (MTD) (I)

## ➤ **Coordinador (L3) del grupo de Física del “Data Performance Group” del MTD**

- Comencé a trabajar en el MTD en el año 2017 con una búsqueda de leptones desplazados
- En el año 2018 fui seleccionado **coordinador del grupo** y **responsable del “Physics Case”** para el **Technical Design Report (TDR)** del detector
- En ese contexto lideré **4** búsquedas de Nueva Física: leptones, fotones y jets desplazados y una búsqueda de Heavy Stable Charged Particles
- También lideré y coordiné una búsqueda del proceso de producción de pares de Higgs
- Fui **editor de las notas internas** y responsable de defender los análisis ante la colaboración
- **Estudios** para determinar si el **MTD debe entrar a nivel L1 trigger**

## ➤ **Editor del Technical Design Report del MTD**

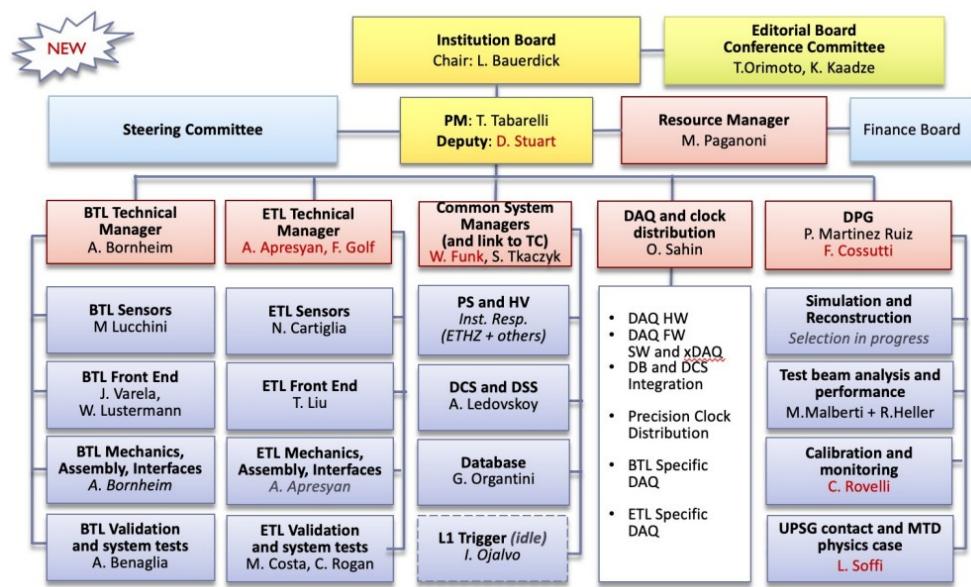
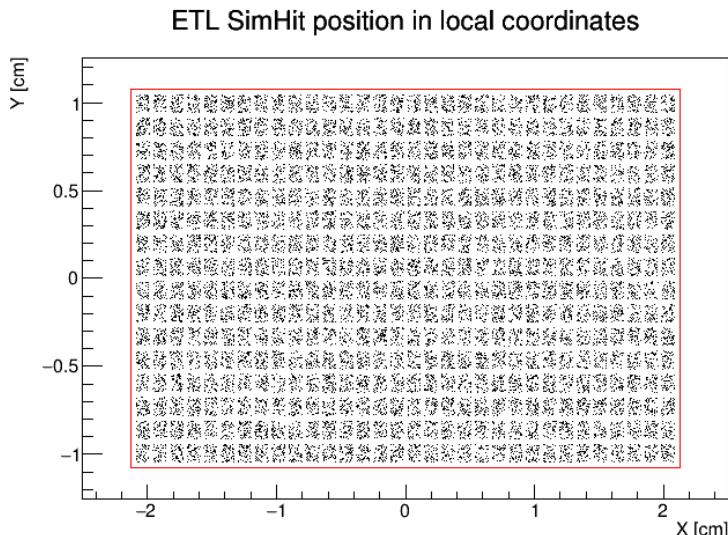
- Con especial énfasis en el capítulo “Physics Performance and Physics Cases”



The CMS Collaboration, “**A MIP Timing Detector for the CMS Phase-2 Upgrade Technical Design Report**”, ISBN: 978-92-9083-523-3

# CMS Upgrade: MIPs Timing Detector (MTD) (II)

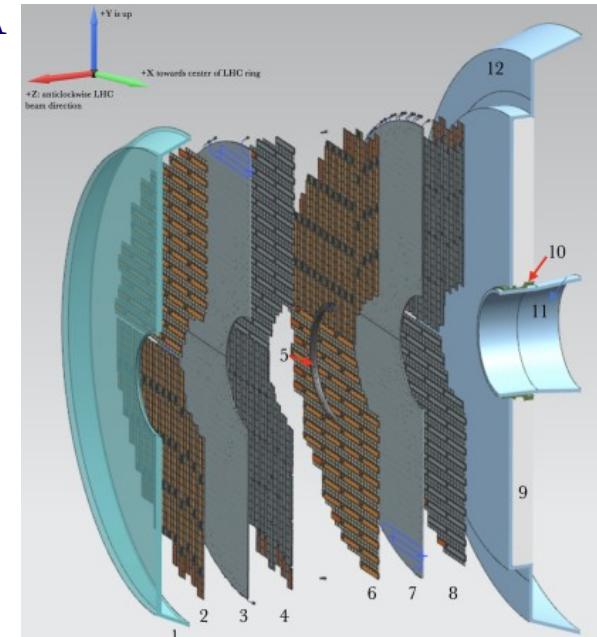
- **Coordinador (L2)** del grupo “**Data Performance Group**” del MTD (2019-2021 + 2021-2023)
- **Responsable de todo el software, simulación, simulación, reconstrucción, calibración y física del MTD**
  - Preparación de geometrías, digitización, simulación, estructuras básicas del software
  - Puesta a punto de software provisional para que los grupos de CMS puedan usar el MTD
  - Primeros pasos en la integración del MTD en el tracking de CMS, 4D vertexing, etc
  - Defensa del detector en los Annual Review y P2UG reviews
  - Presentación plenaria en la CMS week



# CMS Upgrade: MIPs Timing Detector (MTD) (III)

## › Responsable del **ensamblado de módulos del ETL** en el IFCA

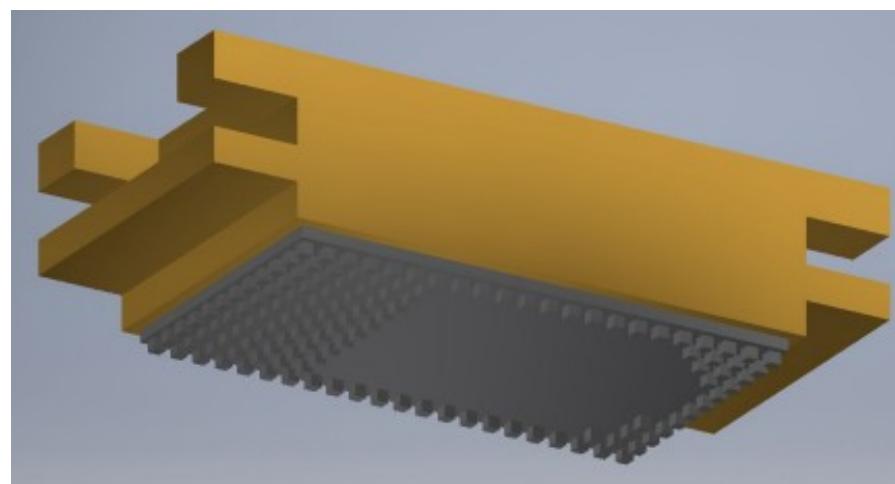
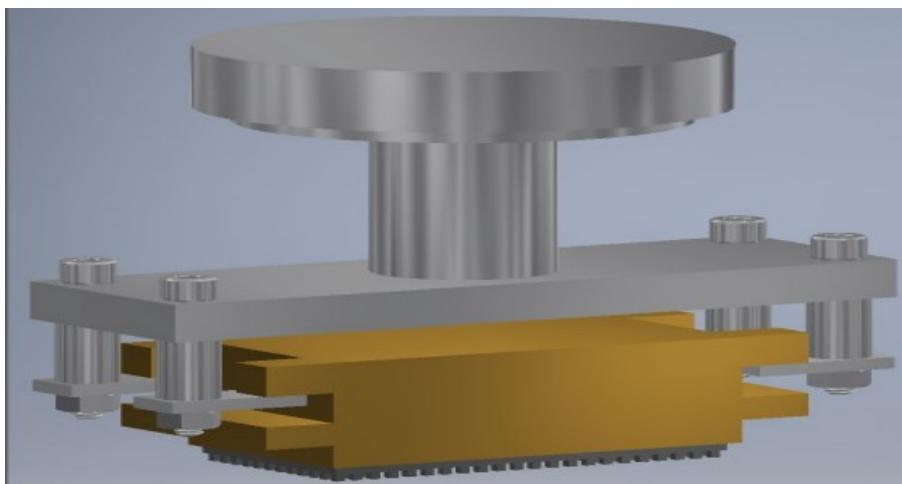
- Un total de 900 módulos con sensores LGAD
- En colaboración con Fermilab + Nebraska + Torino



## › **Puesta a punto de robot** automático de ensamblado

- Programación en V+ de scripts básicos de control
- 1 TFM + 1 TFG dirigidos en esta temática

## › Colaboración en el **diseño del procedimiento de ensamblado**

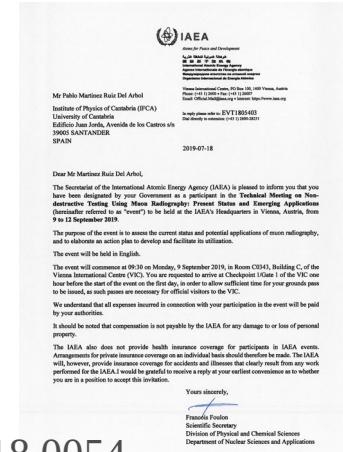


# Transferencia tecnológica: Tomografía muónica

## ➤ Liderazgo internacional en la aplicación de la tomografía muónica a sistemas industriales

- Invitado al “Cosmic-Ray Muography” meeting de la **Royal Society**
- Uno de los dos representantes españoles en el meeting de la **IAEA**
- **Editor del capítulo de aplicaciones industriales (IAEA)**
- **Contribuciones a varias conferencias internacionales y seminarios**

P. Martínez et al. , “**Non-destructive testing of industrial equipment using muon radiography**”, Philosophical Transactions of the Royal Society A, doi:10.1098/rsta.2018.0054



## ➤ Convenios de investigación con la empresa Muon Tomography Systems S.L

- “Desarrollo de un sistema de adquisición de datos inteligente (DAQ) para la caracterización, corrección y obtención de trazas en detectores de muones”, **IP: Pablo Martínez**
- **Co-dirección de tesis doctoral industrial** en curso (financiada por el Ministerio de Ciencia)
- Co-dirección de Trabajo de Fin de Máster en esta temática en convenio con la empresa

## ➤ Miembro de la colaboración MODE (Machine-Learning Optimized Design of Experiments)

- Aplicación de técnicas de ML al diseño de experimentos y a la muografía en particular

# Otras actividades de transferencia tecnología

## ➤ Actividades relacionadas con la **pandemia Covid-19**:

- Autor del documento técnico: “Una visión global de la pandemia Covid-19: qué sabemos y qué estamos investigando desde el CSIC” , <http://dx.doi.org/10.20350/digitalCSIC/12596>
- P. Martinez, L. Lloret, “Comparison of epidemic control strategies using agent-based simulations”, <https://doi.org/10.1101/2020.05.24.20111625>
- Colaboración para el uso de recursos del Tier-2 del IFCA para correr Folding@Home

## ➤ Actividades relacionadas con **modelización de despoblamiento** en Cantabria:

- Proyecto concedido por el gobierno de Cantabria: “Evolución poblacional de municipios en riesgo de despoblamiento mediante gemelos digitales”

## ➤ Actividades relacionadas con el uso de **técnicas de Machine-Learning** en metalurgia

- Ruiz, Estela et al. “Machine Learning Methods for the Prediction of the Inclusion Content of Clean Steel Fabricated by Electric Arc Furnace and Rolling”, Metals 11(6)-194, <https://doi.org/10.3390/met11060914>

# Selección de artículos y conferencias más importantes

## Artículos:

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  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$** ”, JHEP04(2021)123, DOI:10.1007/JHEP04(2021)123

The CMS Collaboration, “**Search for Dark Matter Particles Produced in Association with a Top Quark Pair  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$** ”, Physical Review Letters 122 -011803, DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.011803

The CMS Collaboration, “**Search for supersymmetric partners of electrons and muons in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13\text{TeV}$** ”, Physics Letters B 140-166, 10.1016/j.physletb.2019.01.005

## Conferencias:

P. Martínez Ruiz del Árbol, “**Timing for the CMS Upgrade 2**”, LHCP2020: The Eighth annual conference on large hadron collider physics, POS(LHCP2020)081

P. Martínez Ruiz del Árbol, “**Precision Timing with the CMS MIP Timing Detector**”, LP2019: 29<sup>th</sup> International Symposium on Lepton Photon Interaction at High Energy Physics, POS(LeptonPhoton19)100

P. Martínez Ruiz del Árbol, “**Dark Matter at the LHC**”, Split2018: LHC days in Split, University of Split

# Experiencia docente (I)

- Durante los años 2017-presente **he ejercido docencia en la Universidad de Cantabria**
- Impartí un total de **443.80 horas** tanto en **Grado de Física** como en asignaturas de **Máster**
- Algunas de estas horas se impartieron en **Español** y otras en idioma **Inglés**

Asignatura	Cursos	Total de horas
Advanced Experimental Techniques Grado de Física/Doble Grado	2017-2018 2018-2019	66.8
Física de Partículas Elementales Grado de Física/Doble Grado <b>Profesor responsable</b>	2017-2018 2018-2019 2019-2020 2020-2021 2021-2022	174
Mecánica Cuántica Grado de Física/Doble Grado	2020-2021 2021-2022	50
Modelo Estándar de Física de Partículas Máster de Física de Partículas y del Cosmos	2019-2020	20
Estadística para la Ciencia de Datos Máster de Data Science	2017-2018 2018-2019 2019-2020 2020-2021 2021-2022	89

# Experiencia docente (II)

- La **valoración** de los estudiantes sobre la docencia es **de 4.7 sobre 5**
- Durante este periodo he participado en la dirección y co-dirección de **trabajos de fin de grado**
  - Total de trabajos dirigidos: **4** (actualmente me encuentro dirigiendo otros 3)
  - Total de trabajos co-dirigidos: **1** (actualmente me encuentro co-dirigiendo otro)
- También he participado en la dirección y co-dirección de **trabajos de fin de Máster**
  - Total de trabajos dirigidos: 4 (actualmente me encuentro dirigiendo otros 2)
  - Total de trabajos co-dirigidos: 3
- Diploma para ejercer **docencia en inglés** de la UC
  - Nivel de inglés C1 (certificado oficial)
- Participación en  **cursos de formación docente:**
  - “Comunicación efectiva en el aula online y presencial:  
dinamiza las clases y conecta con el alumnado”
  - “Implementación práctica de estrategias de innovación  
docente”



D. ERNESTO ANABITARTE CANO,  
VICERRECTOR DE ORDENACIÓN ACADÉMICA Y PROFESORADO  
DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

CERTIFICA QUE:

► D. PABLO MARTÍNEZ RUIZ DEL ARBOL con NIF 72058705G, conforme a la encuesta de opinión  
de los estudiantes sobre la actividad docente del profesorado, ha obtenido la siguiente valoración  
global media:

4,7 MUY FAVORABLE

Periodo evaluado: 2017-2021  
Promedio anual de créditos evaluados: 7,12

Valoración global media obtenida de acuerdo a la siguiente escala:	
ESCALA DE VALORACIÓN: De 0 a 5.	
0 a 2,5	Desfavorable
2,6 a 3,5	Favorable
3,6 a 5	Muy Favorable

Y para que así conste, a los efectos oportunos, y a petición del interesado, lo firmo en Santander a fecha  
01 de octubre de 2021.

# Actividades de divulgación

- Conferencia en Café Científico: “**La física en lucha contra el covid-19**”, Santander, 2020
- Conferencia en Tardes con Ciencia: “**Un Universo Supersimétrico: explorando las fronteras de la Física de Partículas**”, Santander, 2020
- Conferencia en Café con Ciencia: “**Tomografía Muónica: unha ollada ao interior da materia**”, Ferrol, 2020
- Expandiendo la Ciencia: **Siete charlas en institutos y colegios de Cantabria**, 2018-2020
- Participación en Noche de los investigadores: Santander, años 2017, 2018 y 2019
- Conferencia Ateneo de Santander: “**Un Universo Supersimétrico: explorando las fronteras de la Física de Partículas**”, Santander, 2019
- Conferencia en Aquae Talent Hub, “**Las nubes de la Física**”, Orense, 2019
- Conferencia en Pint of Science: “**Un Universo extraño**”, Santander, 2018
- Conferencia en Aquae Campus, “**La gravedad de lo invisible**”, Cartagena, 2019

# Resumen de hitos de la etapa RyC (I)

- Actividades de coordinación y liderazgo científico dentro de la colaboración CMS:
  - Convener (L3): “**DQM, validation and certification**” del Muon POG (2018)
  - Convener (L3): “**Third Generation Searches**” del grupo de SUSY (2016-2018)
  - Convener (L3): “**Physics Analysis case**” del MTD (2017-2019)
  - Convener (L2): “**Data Performance Group**” del MTD (2019-2021) + (2021-2023)
- Representante español en el **Institutional Board** y el **Financial Board** del MTD
- Un total de **14** publicaciones en revistas del primer tercil (primer cuartil en su mayoría)
- Un total de **8** conferencias nacionales e internacionales + **12** workshops internacionales
  - Incluyendo Lepton-Photon, LHCP, The Royal Society, IAEA
- Invitado a 3 **seminarios** en instituciones de prestigio: Universidad de Zürich, CIEMAT, CSIC
- Comité científico: “**CMS SUSY Workshops**” (Gante y Viena), **organizador en Santander**
- Evaluador de Proyectos de la Agencia Española de Evaluación
- Autor del Libro del CSIC: “**White book on artificial intelligence, robotics and data science**”
- Coordinador del Machine Learning Journal Club del IFCA y miembro de COMCHA

# Resumen de hitos de la etapa RyC (II)

## ➤ Principales hitos de docencia:

- Un total de **443.8 horas de docencia en grado y postgrado en la Universidad de Cantabria**
- **Co-dirección de 1 tesis doctoral** y co-dirigiendo actualmente otras 3 tesis doctorales
- **Dirección/Co-dirección de 7 Trabajos de Fin de Máster** y otros 2 en curso
- **Dirección/Co-dirección de 5 Trabajos de Fin de Grado** y otros 3 en curso
- **Valoración de los estudiantes 4.7 / 5.0** → Muy favorable

## ➤ Principales hitos de transferencia tecnológica:

- **Un proyecto/convenio con empresa privada** como Investigador Principal
- **Un proyecto de transferencia en concurrencia competitiva** como Investigador Principal
- Representante español en la IAEA para el “technical meeting” de tomografía muónica
- Editor del capítulo de aplicaciones industriales en el documento de la IAEA
- Integrante de la colaboración MODE

## ➤ Principales hitos de divulgación:

- Más de 9 contribuciones en conferencias y actos de divulgación de gran impacto

## Proyecto docente

Información complementaria:

- Proyecto docente e investigador (proyectoDocenteInvestigador.pdf)
- Desarrollo de temas (DesarrolloDeTemas/)

# Marco Académico e Institucional

- El sistema universitario español se rige por la **Ley Orgánica 6/2001** (la “LOU”)
  - Modificada por la **Ley Orgánica 4/2007** en la que se apuesta definitivamente por el **EEES**

*“La Universidad realiza el servicio público de la educación superior mediante la investigación, la docencia y el estudio.”*

- El alcance del concepto de **Educación Superior** queda establecido como:

*“La enseñanza superior se distingue de la primaria y secundaria no sólo 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.”*

Bindé et al. UNESCO

# Espacio Europeo de Educación Superior (EEES)

- Marco de educación europeo para disponer de un **sistema de educación superior comparable**
  - Promoción de la **movilidad** y de la **cooperación** para garantizar la calidad educativa
  - Modelo de educación centrado en el **aprendizaje** y la **adquisición de competencias**
- Reconoce la existencia de 2 niveles de formación: **Grado y Postgrado**
  - A su vez, existen 3 ciclos diferentes: **Grado, Máster y Doctorado**
- Establecimiento del ECTS: *European Credit Transfer and Accumulation System*
  - Reconocimiento en todo el espacio de Educación Superior Europeo
  - Entre 25-30 horas de trabajo de aprendizaje del alumno (presencial y no presencial)
- En los últimos años la Comisión Europea ha propuesto las “**Universidades Europeas**”
  - Alianzas transnacionales con vocación de convertirse en las **universidades del futuro**
  - Fomento de los valores y la identidad europeos
  - Revolución de la calidad y la competitividad de la educación superior en europa
  - **Universidad de Cantabria** incluida en la alianza **EUNICE** (segunda convocatoria)

# Entorno académico: Facultad de Ciencias de la UC

Titulaciones de Grado	Titulaciones de Máster
<b>Grado en Física</b>	<b>Máster en Data Science</b>
Grado en Matemáticas	Máster en Ciencia e Ingeniería de la Luz
Grado en Ingeniería Informática	<b>Máster en Física de Partículas y del Cosmos</b>
<b>Doble Grado Física y Matemáticas</b>	Máster en Ingeniería Informática
International Diploma in Physics	Máster en matemáticas y computación
	Máster en Nuevos Materiales
	Máster en Química Teórica y Modelización Computacional
<b>Programas de doctorado</b>	
<b>Doctorado en Ciencia y Tecnología</b>	

# Entorno académico: Grado de Física

Distribución de créditos de la titulación	
Formación Básica	60
Obligatorios	126
Optativas	36
Trabajo fin de carrera	18
Total	240

- El grado de física se estructura en los siguientes módulos:

<b>Módulo Básico</b>	<b>Capacitación lingüística y formación en valores, competencias y destrezas personales</b>
<b>Módulo Central</b>	<b>Módulo de Orientación</b>
<b>Mención en Física Fundamental</b>	<b>Mención en Física Aplicada</b>
<b>Módulo transversal Fundamental/Aplicada</b>	<b>Módulo de Trabajo de Fin de Grado</b>

- Las menciones suponen itinerarios curriculares alcanzados al cursar 30 créditos del bloque
  - Es obligatorio para los alumnos alcanzar al menos una de las menciones
- En el **Doble Grado de Física y Matemáticas** los alumnos acumulan conocimientos, competencias y habilidades tanto del grado de Física como del grado de Matemáticas

# Asignatura: Física de Partículas Elementales

- Primera toma de contacto con el **formalismo del Modelo Estándar de las Partículas**
- Conceptos básicos acerca de las leyes que rigen la **dinámica de los fermiones**
- Presentación de las **interacciones** como un proceso de **intercambio de partículas bosónicas**
- Aplicación a **electrodinámica cuántica**, las **interacciones débil y fuerte** y el **bosón de Higgs**
- Contrapartida experimental: **interacción de las partículas con la materia y detectores**

## Datos de la asignatura

Nombre	<b>Física de Partículas Elementales</b>
Centro	<b>Facultad de Ciencias</b>
Créditos ECTS	<b>6</b>
Módulo/Materia	<b>Mención en Física Fundamental</b>
Titulación	<b>Grado en Física (4º curso)</b> <b>Doble Grado en Física y Matemáticas (5º curso)</b>
Tipología	<b>Optativa</b>

# Práctica docente de la asignatura

- La asignatura se desarrolla fundamentalmente a través de **clases magistrales** con transparencias

## The Klein-Gordon Equation

• Applying  $\vec{p} \rightarrow -i\vec{\nabla}$ ,  $E \rightarrow i\partial/\partial t$  to the relativistic equation for energy:

$$E^2 = |\vec{p}|^2 + m^2 \quad (\text{KG1})$$

gives the Klein-Gordon equation:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \vec{\nabla}^2 \psi - m^2 \psi \quad (\text{KG2})$$

• Using  $\partial_\mu \equiv \frac{\partial}{\partial x^\mu} = \left( \frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$   $\rightarrow \partial^\mu \partial_\mu \equiv \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

KG can be expressed compactly as  $(\partial^\mu \partial_\mu + m^2) \psi = 0$  (KG3)

• For plane wave solutions,  $\psi = Ne^{i(\vec{p} \cdot \vec{r} - Et)}$  the KG equation gives:

$$-E^2 \psi = -|\vec{p}|^2 \psi - m^2 \psi$$

$$\rightarrow E = \pm \sqrt{|\vec{p}|^2 + m^2}$$

\* Not surprisingly, the KG equation has negative energy solutions – this is just what we started with in eq. KG1

\* Historically the -ve energy solutions were viewed as problematic. But for the KG there is also a problem with the probability density...

## Parity Conservation in QED and QCD

• Consider the QED process  $e^- q \rightarrow e^- q$

• The Feynman rules for QED give:

$$-iM = [i\bar{e}_e(p_3)i\epsilon^\mu \gamma^\nu u_e(p_1)] \frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2} [\bar{u}_q(p_4)i\epsilon^\mu \gamma^\nu u_q(p_2)]$$

• Which can be expressed in terms of the electron and quark 4-vector currents:

$$M = -\frac{e^2}{q^2} g_{\mu\nu} j_e^\mu j_q^\nu = -\frac{e^2}{q^2} j_e \cdot j_q$$

with  $j_e = \bar{u}_e(p_3)\gamma^\mu u_e(p_1)$  and  $j_q = \bar{u}_q(p_4)\gamma^\mu u_q(p_2)$

• Consider the what happen to the matrix element under the parity transformation

• Spinors transform as  $u \xrightarrow{\hat{P}} \hat{P} u = \hat{u}^\dagger u$

• Adjoint spinors transform as

$$\bar{u} = \bar{u}^\dagger \gamma^0 \xrightarrow{\hat{P}} (\hat{P} u)^\dagger \gamma^0 = u^\dagger \gamma^0 \gamma^0 = u^\dagger \gamma^0 \gamma^0 = \bar{u} \gamma^0$$

$$\bar{u} \xrightarrow{\hat{P}} \bar{u} \gamma^0$$

• Hence  $j_e = \bar{u}_e(p_3)\gamma^\mu u_e(p_1) \xrightarrow{\hat{P}} \bar{u}_e(p_3)\gamma^0 \gamma^0 u_e(p_1)$

## Colour Confinement

\* It is believed (although not yet proven) that all observed free particles are "colourless"

- i.e. never observe a free quark (which would carry colour charge)
- consequently quarks are always found in bound states colourless hadrons

### Colour Confinement Hypothesis:

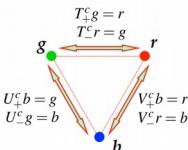
only colour singlet states can exist as free particles

\* All hadrons must be "colourless" i.e. colour singlets

\* To construct colour wave-functions for hadrons can apply results for **SU(3) flavour** symmetry to **SU(3) colour** with replacement

$$\begin{array}{l} u \rightarrow r \\ d \rightarrow g \\ s \rightarrow b \end{array}$$

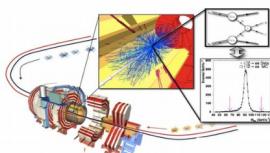
\* just as for uds flavour symmetry can define colour ladder operators



- Clases de problemas (prácticas en el Aula) y ejercicios propuestos para evaluación continua
- Una práctica de laboratorio (detección de partículas) + una práctica de ordenador (bosón Z)
- Aplicación del concepto de “**Flipped**” classroom y actividad en grupo “**Space Race**”
- Todos los contenidos, actividades, seguimiento, etc. integrados en el aula virtual Moodle

## Experimental Z mass measurement with the CMS detector

G71 – Particle Physics 2021-2022



G71. Elementary Particle Physics Lab Session  
Introduction to semiconductors radiation detectors:  
Transient Current Technique characterization of a PIN semiconductor  
diode using a 670 nm laser.

### Summary

A detailed study of the current generated by a CVD processed,  $3 \times 400$  nm layer diode in a  $n-p-n-p$  diode is performed. This layer is used to emulate the diode response when a particle with a low penetration range fall upon the surface of the silicon diode. The current is measured with a lock-in amplifier by illuminating the laser beam either on the bottom or on the top of the diode.

### 1. Experiment description and setup

The physical and electrical properties of a semiconductor detector can be studied with the so called Transient Current Techniques (TCT). A detector is illuminated by a laser, used as lock-in charge carrier generator, and its measured transient current is a sum of several components. These components are characterized when associated with the Shockley-Read theory, several properties, such as the depletion width, the diffusion length and the carrier lifetime, can be determined.

In this experiment, we study a  $n-p-n-p$  diode (Fig. 1) using a  $\lambda = 670$  nm laser. A red laser beam is focused on the top of the diode. The laser beam illuminates the diode surface holes only near the surface is illuminating. That behaviour mimics the energy deposition of a low penetration particle, such as alpha particles for instance, and it is equivalent to illuminate the holes, depending the illuminated surface. The experimental setup is shown in Fig. 2.

### 2. Theoretical basis

**Ionization detectors** Basic elements of a gaseous ionization chamber detectors: ionization medium, drift field, collecting electrodes. Specific references: LEO1994, sections 6.1, 6.2 and 6.3; INCO2000, sections 5.3 and 5.4

**Semiconductors as ionizing medium** Energy band in semiconductors, intrinsic semiconductors, doped semiconductors. Charge carriers (minority, drift, majority, diffusion

PÁGINA 44

El experimento de Madame Wu

1. ¿Por qué fue tan relevante el experimento de Madame Wu?

- El experimento de Madame Wu mostró que la interacción ibaña violó la simetría de paridad.
- El experimento de Madame Wu mostró que el neutrino tiene su propia antimateria en un experimento de tipo doble-beta decay.
- El experimento de Madame Wu mostró que la cross sección efectiva de los procesos debiles es invariantia Lorentz.
- El experimento de Madame Wu mostró que la interacción fuere a invariant bajo rotaciones.

2. ¿Dónde es la reacción de destrucción del Cobalto que consideró Madame Wu?

- El cobalto decae a n nítricos de rápidos exhalados, a un electrón y a un anti-neutrino electrónico.
- El cobalto decae a n nítricos decaídos potencialmente a dos fotones.
- El cobalto decae a un nítrico de rápidos, a un electrón y a un anti-neutrino electrónico.
- El cobalto decae a un nítrico de rápidos exhalado, a un electrón y a un anti-neutrino electrónico.
- El cobalto decae a un pión que posteriormente decae a un electrón y un anti-neutrino.

# Relación de la asignatura con otras asignaturas

1er Curso

## Base teórica

Física Básica Experimental III:  
La materia y sus propiedades

## Base práctica

Herramientas computacionales  
en el laboratorio

## Base práctica

Programación

2º Curso

## Base teórica

Fundamentos de Física  
Cuántica

## Base teórica

Mecánica Clásica y  
Relatividad

## Base práctica

Laboratorio de  
Física I

## Base práctica

Laboratorio de  
Física II

3er Curso

## Base teórica (complementaria)

Física Cuántica y Estructura de  
la Materia II:  
Átomos, Moleculas y Sólidos

## Base teórica

Física Cuántica y Estructura de  
la Materia IV:  
Núcleos y Partículas

4º Curso

## Física de Partículas Elementales

## Base teórica

Mecánica Cuántica

## Prácticas relacionadas

Técnicas Experimentales  
Avanzadas

# Competencias desarrolladas en la asignatura

Competencias genéricas		Competencias específicas	
Nombre	Descripción	Nombre	Descripción
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.	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.
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.	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.
Comunicación	Que los estudiantes puedan transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado.	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.

# Objetivos y resultados del aprendizaje

➤ **Los objetivos fundamentales de la asignatura pueden resumirse en:**

- Conocer el Modelo Estándar de las Partículas Fundamentales
- Conocer las herramientas de cálculo de procesos de interacción entre partículas
- Entender los fundamentos físicos de detección, las tecnologías y su aplicación en experimentos actuales
- Conocer las líneas de investigación actuales en el campo

➤ **Los resultados del aprendizaje de la asignatura incluyen los siguientes elementos:**

- 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

# Desglose horario y métodos docentes

Actividades	Horas de la asignatura
<b>Actividades presenciales</b>	
<b>Horas de clase</b>	
Teoría	33
Prácticas de Aula	7
Prácticas Laboratorio Experimental	10
Prácticas de Laboratorio en Ordenador	10
<b>Subtotal horas de clase</b>	<b>60</b>
<b>Actividades de seguimiento</b>	
Tutorías	10
Evaluación	10
Subtotal seguimiento	20
<b>Subtotal Actividades presenciales</b>	<b>80</b>
<b>Actividades no presenciales</b>	
Trabajo en grupo	20
Trabajo autónomo	50
<b>Subtotal no presencial</b>	<b>70</b>
<b>Horas totales</b>	<b>150</b>

# Organización docente

Contenidos	TE	PA	PLE	PLO	TU	EV	TG	TA
<b>Introducción.</b> El Modelo Estándar. Sistema Natural de Unidades. Repaso de Mecánica Cuántica. Notación relativista. Teorema de Noethe. Teorías Gauge.	3	1	0	0	1	1	0	1
<b>Detección de Partículas.</b> Interacción de partículas neutras y cargadas con la materia. Tecnologías de detección. Detectores de partículas actuales.	3	1	10	0	1	2	10	13
<b>La ecuación de Dirac.</b> Densidades y corrientes de probabilidad. La ecuación de Klein-Gordon. La ecuación de Dirac. Antimateria. Helicidad. Paridad y conjugación de carga.	6	1	0	0	2	1	0	6
<b>Interacción por intercambio de partículas.</b> Regla de oro de Fermi. Densidad de estados. Secciones eficaces. Elementos de matriz. Diagramas de Feynman. Electrodinámica cuántica.	6	1	0	0	2	1	0	6
<b>Aniquilación electrón-positrón.</b> Fermiones polarizados. Secciones eficaces en función de la helicidad. Quiralidad.	5	1	0	0	1	1	0	5
<b>La interacción débil.</b> Violación de paridad. El experimento de Madame Wu. Decaimiento del pion. Helicidad y quiralidad. Constante de Fermi. Hypercarga/isospin débil. Interacción débil como teoría Gauge. Unificación electro-débil.	5	1	0	10	1	2	10	14
<b>La interacción fuerte.</b> El color. Modelos de quarks. Confinamiento. Hypercarga/isospin fuerte. Funciones de onda de color. Hadronización y jets.	3	1	0	0	1	1	0	3
<b>El bosón de Higgs.</b>	2	0	0	0	1	1	0	2
<b>Total</b>	<b>33</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>

TE:Teoría, PA:Prácticas Aula, PLE:Prácticas Laboratorio, PLO:Prácticas ordenador, TU:Tutoría, EV:Evaluación, TG:Trabajo Grupo, TA:Trabajo Autónomo

# Tema 1: Introducción

## Objetivos principales

Introducir y contextualizar la Física de Partículas definiendo su ámbito de estudio, relacionándola con la Mecánica Cuántica y la Teoría de la Relatividad Especial y estableciendo los sistemas de unidades y notaciones utilizados habitualmente.

## Resultados de aprendizaje

Entender de forma descriptiva el contenido material y de fuerzas del Universo segúnel Modelo Estándar de las Partículas.	Conocer y manejar el Sistema Natural de Unidades.
Conocer el concepto de función de onda cuántica como representación matemáticasde 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 contra-variantes 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.	

## Actividades

Ejercicios de clase	Trabajos de evaluación continua
Uso del sistema natural de unidades	Derivación del Tensor Electromagnético $F^{\mu\nu}$ a partir de su definición y la definición del cuadripotencial vector $A^\mu = (\varphi, \mathbf{A})$
Problemas sencillos de cinemática de colisiones de partículas	Derivación de las ecuaciones de Maxwell aplicando las ecuaciones de Euler-Lagrange al Lagrangiana del electromagnetismo.

# Tema 2: Detección de Partículas

## Objetivos principales

Este capítulo tiene como finalidad mostrar los principios básicos de los detectores de partículas. El capítulo desarrolla las principales interacciones de las partículas con la materia que atraviesan y un breve repaso a los detectores de partículas más típicos para acabar con una breve introducción a los grandes detectores de partículas construidos hoy en día.

## Resultados de 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.

## Actividades

Ejercicios de clase	Trabajos de evaluación continua
Ejercicios sencillos de aplicación de las fórmulas que rigen los procesos de interacción entre partículas y la materia.	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

➤ Título: “**Transient Current Technique characterization of a PIN semiconductor diode using a 670 nm laser**”

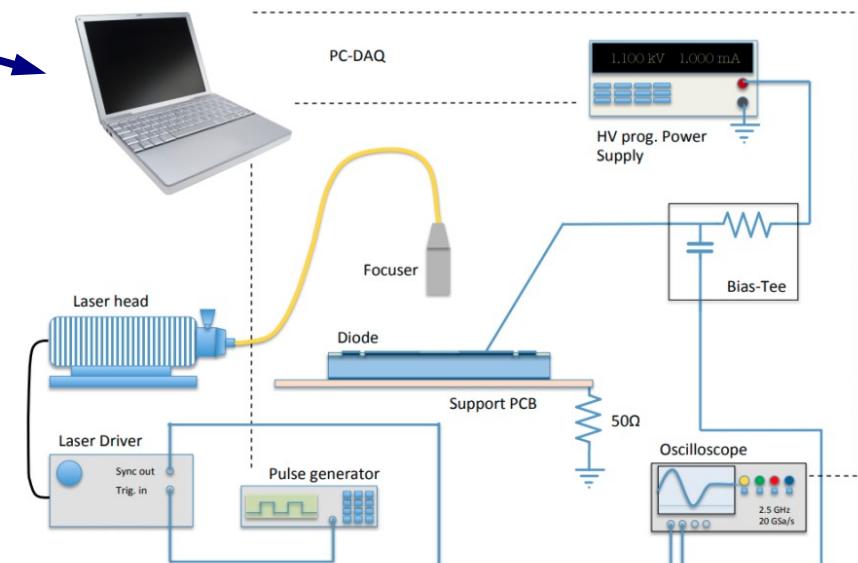
➤ **Objetivos** de la práctica:

- Profundizar en los conceptos de detección de partículas con semiconductores
- Observar y media la corriente generada de un diodo p-in-n cuando es iluminado con luz

➤ **Montaje experimental**

➤ **Desarrollo de la práctica:**

- Medida “Voltaje de Bias vs. Intensidad”
- Medida “Voltaje de Bias vs. Carga ”
- A partir de dichas curvas estimación de:
  - Campo eléctrico en el interior del diodo
  - “Depletion depth”
  - Nivel de dopado de los semiconductores



# Tema 3: La ecuación de Dirac

## Objetivos principales

Proporcionar una visión histórica de las razones que motivaron el desarrollo de la ecuación de Dirac. Mostrar la derivación de la ecuación de Dirac y sus implicaciones desde el punto de vista de la antimateria y el spin.

## Resultados de 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 y evitar el problema de la energía negativa y sus expresiones de densidad y corriente de probabilidad.
Entender el concepto de “espinor” y cómo se transforma ante transformaciones de paridad y conjugación de carga.	Manejar con destreza la ecuación de Dirac prestando atención al álgebra de conmutación 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 en la ecuación de Dirac.	Entender el concepto de helicidad y buscar soluciones de onda plana que sean autoestados suyos y del Hamiltoniano.

## Actividades

Ejercicios de clase	Trabajos de evaluación continua
Problemas sencillos relacionados con las propiedades de las matrices $\gamma^\mu$ .	Demostración de mínima dimensión para las matrices $\alpha$ y $\beta$ .
Resolución de problemas sencillos utilizando la ecuación de Dirac.	Demostración de la invarianza Lorentz de la ecuación de Dirac.
Cálculo de densidades y corrientes de probabilidad para casos concretos	Discusión en clase del artículo del descubrimiento del positrón.
	Resolver el átomo de hidrógeno utilizando la ecuación de Dirac.

# Tema 4: Interacción por intercambio de partículas

## Objetivos principales

Proporcionar los fundamentos del tratamiento de las interacciones en experimentos de colisión. Mostrar cómo usar la regla de oro de Fermi para obtener tasas de transición y secciones eficaces en función de la densidad de estados y los elementos de matriz. Mostar cómo calcular elementos de matriz para diagramas de Feynman en el contexto de la electrodinámica cuántica.

## Resultados de aprendizaje

Entender el concepto de tasa de transición y 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 y su naturaleza perturbativa.	Entender los parámetros de un experimento de colisión de partículas y derivar através 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.	Entender cómo 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.

## Actividades

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

# Tema 5: Aniquilación electrón-positrón

## Objetivos principales

Mostrar cómo realizar los cálculos detallados de la sección eficaz y la sección eficaz diferencial del proceso de aniquilación electrón-positrón teniendo en cuenta todas las posibilidades de helicidad. Introducir el concepto de quiralidad.

## Resultados de aprendizaje

Entender las diferencias entre un haz polarizado de fermiones (helicidad única biendeterminada) 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 espines 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.	

## Actividades

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

# Tema 6: La interacción débil

## Objetivos principales

**Mostrar los primeros experimentos que dieron lugar a fenómenos de violación de la paridad y mostrar cómo derivar elementos de matriz que tengan capacidad para producir dichas violaciones. Mostrar cómo construir la teoría electro-débil a partir de un principio de invarianza Gauge y mostrar la unificación electro-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.	Entender la interacción débil a través de un principio de invarianza Gauge.
Comprender la unificación de las fuerzas electromagnética y débil.	Entender el significado del ángulo de ``mixing'' $\theta$ .
Entender los conceptos de hypercarga débil e isospin débil.	Ser capaces de aplicar las reglas de Feynman para la teoría electrodébil.

## Actividades

Ejercicios de clase	Trabajos de evaluación continua
Ejercicio relacionado con el experimento de Madame Wu.	Obtener los estados de polarización de bosones masivos.
Ejercicio relacionado con la quiralidad en estados de helicidad puros.	
Actividades de grupo	Práctica de Ordenador
El experimento de Madame Wu. Flipped Classroom + concurso Socrative.	Medida de la anchura del bosón Z con datos de CMS.

# Actividad en grupo

- Título: ``El experimento de Madame Wu''
- Concepto: Implementación de la técnica “**Flipped classroom**” en el aula
  - La clase magistral sobre el experimento de Madame Wu se sustituye por:
    - Recursos externos (artículo de Madame Wu + otros materiales) para estudio autónomo
    - Una actividad en grupo para producir refuerzo y discusión sobre los contenidos
- La actividad en grupo es un test a través de la **plataforma Socrative (Space Race)**

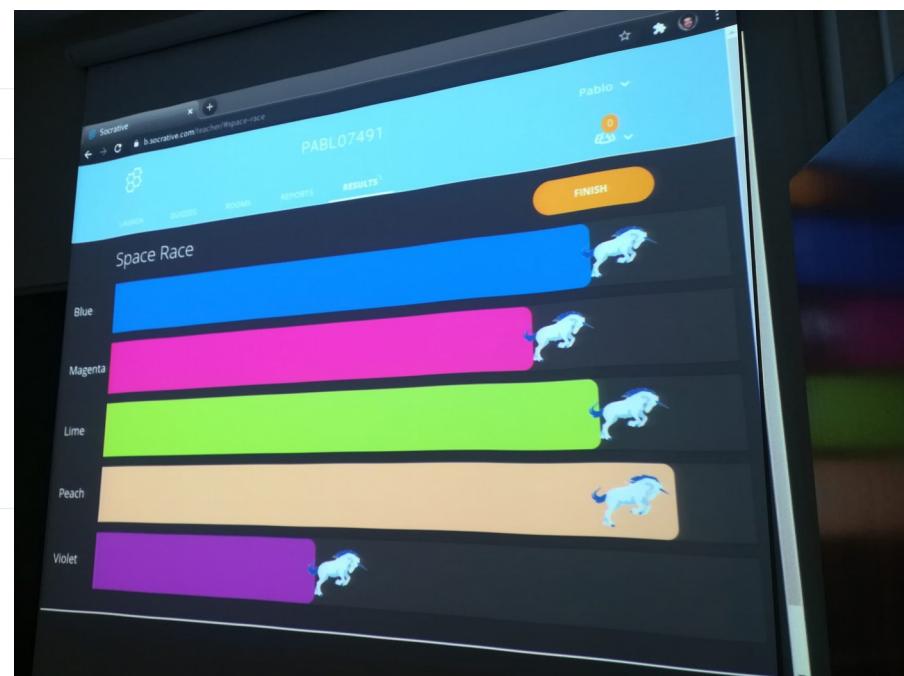
## El experimento de Madame Wu

Align Quiz to Standard

1. ¿Por qué fue tan relevante el experimento de Madame Wu?
  - A El experimento de Madame Wu mostró que la interacción débil viola la simetría de paridad.
  - B El experimento de Madame Wu mostró que el neutrino es su propia antipartícula en un experimento de tipo: double-beta decay
  - C El experimento de Madame Wu mostró que la cross section diferencial de los procesos débiles es invariante Lorentz.
  - D El experimento de Madame Wu mostró que la interacción fuerte es invariante bajo rotaciones.

2. ¿Cómo es la reacción de desintegración del Cobalto que consideró Madame Wu?

- A El cobalto decae a un núcleo de níquel excitado, a un electrón y a un anti-neutrino electrónico. El núcleo de níquel excitado decae posteriormente a dos fotones.



# Práctica de ordenador

› Título: ``Medida de la anchura del bosón Z con datos de CMS''

› **Objetivos** de la práctica:

- Familiarizar al alumno con herramientas y técnicas típicas de las altas energías
- Repasar los conceptos de los grandes detectores partículas (CMS en concreto)
- Profundizar en el concepto de resonancia y particularmente en la del bosón Z

› **Entorno computacional para realizar la práctica:**

- Jupyter notebook con python y ROOT
- Datos públicos del experimento CMS

› **Desarrollo de la práctica**

- Seleccionar sucesos con 2 muones
- Añadir cortes de calidad a los muones
- Obtener el espectro de masa invariante
- Realizar un ajuste a la resonancia del bosón Z

The screenshot shows a Jupyter notebook interface with the title "Part1 Last Checkpoint: 08/10/2021 (autosaved)". The notebook contains the following content:

**Start an Analysis in Experimental Particle Physics (1)**

**Part 1: Muon identification and isolation variables in CMS.**

In this example you will learn:

- How to use the ROOT tree structure of the information of particles in events measured in the CMS detector
- How to define and apply a selection criteria on the events collected using the information of the particles detected
- How to fill a histogram with the information selected and analyze the distribution of an observable

Let's start!

There is already a simplified NTuple version of the original data created to perform the following exercise and named `mystree.root`. It contains the minimum information to work with. If you need to include more information you can create your own NTuple from the CMS Open Data.

We have prepared a basic script that shows you how to make a loop to read the information of all the particles on these events and then perform a simple analysis: [Analyzer All](#).

You can have a look at the code and understand what is done:

- The class `Analyzer` is inherited from the class `Analyzer`.
- For each event (collision) we read the information for all the muons reconstructed (if any) and stored in a `TTree` called `muons`.
- We store in a local variable all the information available for each muon: the momentum (`pt, px, ...`), geometrical coordinates (`eta, phi`) and all the variables needed for the identification and isolation.
- We can then print `histograms` in ROOT format `HIST` for all the variables associated to each muon and that can be shown as a plot.
- We can also compute new observables, like the invariant mass of two muons, and also plot it.

The aim of this exercise is that you explore the muons detected in the events and also have a first look to see if some of these muons could come from the decay of a Z boson.

**NOTE:**

For each exercise, you will need to import the `ROOT` package to run the code and you have to use your user area for analysis.

For running the code under Jupyter you will need to Run each section marked with a number, or you can go to the upper menu and under Cell select `Run All`.

```
In [1]: cd ~/work/CmsOpenData/AnalysisDesigner
```

```
• Run the Analysis for All muons
```

Now we will perform the analysis for all muons, running the module `Analyzer_All`, and producing the histograms that are saved in a file `histos.root` that will be stored in the `datafiles` folder.

Each histogram `HIST` is saved with a name started by `h_`, followed by the name of the kinematic variable.

Following the steps described before:

```
In [1]: # ROOT is a analysis package used to handle
# the tree files, but also histograms, etc.
import ROOT
import sys
```

```
# Import the main module which run the analysis for ALL particles
from AnalyzerAll import AnalyzerAll
```

```
# Instance of AnalyzerAll
analysis = AnalyzerAll()
```

```
In [3]: #Loop over events
```

# Tema 7: La interacción fuerte

## Objetivos principales

Proporcionar una visión general y breve acerca de la interacción fuerte. Mostrar los conceptos fundamentales del modelo de quarks, el concepto de carga de color y el de confinamiento. Ver los fundamentos de la teoría fuerte a partir de una teoría Gauge y dar las reglas de Feynman para procesos de interacción fuertes sencillos.

## Resultados de 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 hypercarga 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.	

## Actividades

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

# Tema 8: El bosón de Higgs

## Objetivos principales

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.	

## Actividades

Ejercicios de clase	Trabajos de evaluación continua
	Resumen y breve presentación del descubrimiento del bosón de Higgs por parte de las colaboraciones CMS y ATLAS en el año 2012.

# Métodos de evaluación

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, DEPARTAMENTO DE FÍSICA MODERNA

## Física de Partículas Elementales (G71)

4 Curso - Grado de Física - Doble Grado Física Matemáticas - Segundo Bloque - Final

### ➤ Pruebas escritas (exámenes)

- Primer parcial (temas 1-4) → 25% del total de la nota
- Segundo parcial (temas 4-8) → 25% del total de la nota
- Nota mínima en este bloque para evaluación 3 sobre 10
- Ambos parciales pueden recuperarse en un examen final
  - La nota considerada será la más alta entre el final y el parcial

### ➤ Prácticas de laboratorio y ordenador

- Práctica de laboratorio sobre detección de partículas → 25% del total de la nota
- Práctica de laboratorio sobre la medida de la anchura del bosón → 25% del total de la nota
- La nota incluye el trabajo del estudiante en el laboratorio + el informe final presentado
- Para que la práctica sea evaluada es obligatorio presentar el informe
- Para ser evaluado de la asignatura hay que entregar al menos un informe de prácticas

### ➤ Evaluación continua → Hasta un punto adicional sobre la nota del examen

- Resolución de trabajos propuestos + Actividad en grupo con Socrative

**Cuestión 1.** Un haz de electrones y otro de positrones ambos no polarizados colisionan en el sistema centro de masas con una energía  $\sqrt{s} = 9 \text{ GeV}$  dando lugar a pares de muon-antimuon. ¿Cuál sería el momento de los muones resultantes? **(0.25 puntos)** Con la información dada, ¿sería posible establecer la proyección del momento del muón en la dirección inicial del de los electrones? **(0.25 puntos)** Si las condiciones dadas, ¿cuál sería el cociente entre el número de muones detectados en la dirección inicial de los electrones ( $\theta = 0$ ) y en la dirección  $\theta = \pi$ ? **(0.5 puntos)** Supongamos ahora que los electrones incidentes han pasado por un polarizador que sólo deja pasar electrones Left-Handed y que los muones resultantes se hacen pasar por un polarizador que sólo deja pasar muones Right-Handed. ¿Cuál sería en este caso el cociente entre el número de muones detectados en  $\theta = 0$  y  $\theta = \pi$ ? **(0.5 puntos)** ¿Cambiaría este último cociente si el experimento se realizase a  $\sqrt{s} = 90 \text{ GeV}$ ? Razona tu respuesta. **(0.5 puntos)**,  $m_{\mu} = 106 \text{ MeV}$ .

**Cuestión 2.** Describe el concepto de quiralidad. **(0.5 Puntos)**. Explica razonadamente la relación que existe entre el concepto de quiralidad y la violación de Paridad que aparece en la fuerza débil. **(0.5 Puntos)**. Demuestra, usando únicamente la relación  $y^{\mu}y^{\nu} = 2g^{\mu\nu}$ , que  $y^{\mu}y^{\nu} = 0$ . **(0.5 Puntos)**. Deriva la forma de un spinor de partícula, autoestado del operador quiralidad con quiralidad Left-Handed. Razona tu respuesta. **(0.5 puntos)**.

**Cuestión 3.** Madame Wu diseñó un experimento en el que un núcleo de cobalto decayó en un núcleo de níquel, un electrón y un antineutrino:  $Cu \rightarrow Ni + e^- + \bar{\nu}_e$  en presencia de un campo magnético. El diagrama 0.2 muestra un esquema de este proceso para dos situaciones en las que el campo magnético está alineado (derecha) o antialineado (izquierda) con el eje Z. En ambos casos el spin del cobalto y del níquel se alinea siguiendo el campo magnético. Puesto que el níquel tiene una unidad menos de spin que el cobalto, el electrón y el anti-neutrino tendrán que compensar la pérdida de spin tal y como se indica en el diagrama. Asigna y calcula los espines de Dirac autoestados de la helicidad 0.1 a cada uno de los electrones y antineutrinos en el diagrama, en función del momento  $p$  y las masas (asume  $\phi = 0$ ). **(0.5 Puntos)**. Asumiendo que la masa del neutrino es exactamente 0, uno de los diagramas tiene una probabilidad de ocurrir igual a 0. Indica cuál y explica por qué en relación al elemento de matriz asociado a la fuerza débil mediada por un bosón W. **(0.5 Puntos)**. Usando los espines de Dirac y los operadores de proyección quiral demuestra lo mismo matemáticamente. **(1 Punto)**.

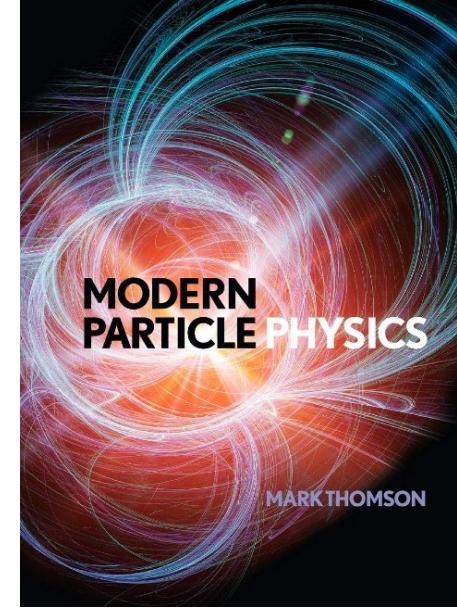
**Cuestión 4.** ¿Qué es el isospin débil? **(0.5 puntos)**. ¿Cómo se relaciona el isospin débil con el hecho de que la fuerza débil tenga 3 bosones propagadores de fuerza? **(0.5 puntos)**. La fuerza débil viola la paridad porque sus cuádrupoles son proporcionales a  $g_V y^{\mu}y^{\nu} + g_A y^{\mu}y^{\nu}$  con  $g_V$  y  $g_A$  constantes. ¿Por qué decimos que la violación de paridad obtenida cuando  $g_V = 1$  y  $g_A = -1$  es máxima? Pista: La cantidad de violación de paridad viene dada por  $\frac{g_V}{(g_V^2 + g_A^2)}$ . **(0.5 Puntos)**. ¿Qué diferencia hay entre el bosón gauge  $W'$  y el bosón  $Z$ ? **(0.5 puntos)**.

**Cuestión 5.** ¿Qué entendemos por el proceso de hadronización de un quark? **(0.5 puntos)**. ¿Cómo expli-

# Bibliografía

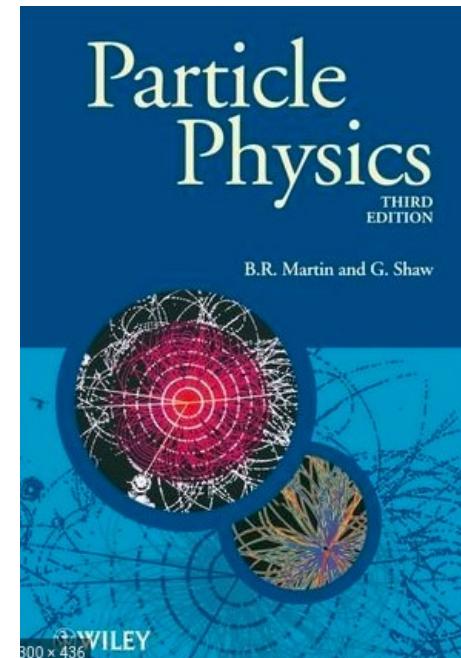
## ➤ Básica

- ***Modern Particle Physics***, Mark Thomson, Cambridge University Press.
- ***Particle Physics***, BR Martin and G. Shaw, Ed Wiley.



## ➤ Complementaria

- ***An Introduction to the standard model of particle physics***, W.N. Cottingam and D.A.Greenwood, Cambridge University Press.
- ***Particle Physics at the new millennium***, B. Roe, Springer.
- ***Introduction to Quantum Field Theory***, Michel E. Peskin and D.V. Schroeder, CRC Press.
- ***Techniques for Nuclear and Particle Physics experiments***, WT Leo, Springer Verlag
- ***Detector for Particle Radiation***, K. Kleinknech, Cambridge University Press.



# Proyecto investigador

Información complementaria:

- Proyecto docente e investigador ([proyectoDocenteInvestigador.pdf](#))

# Introducción al proyecto investigador

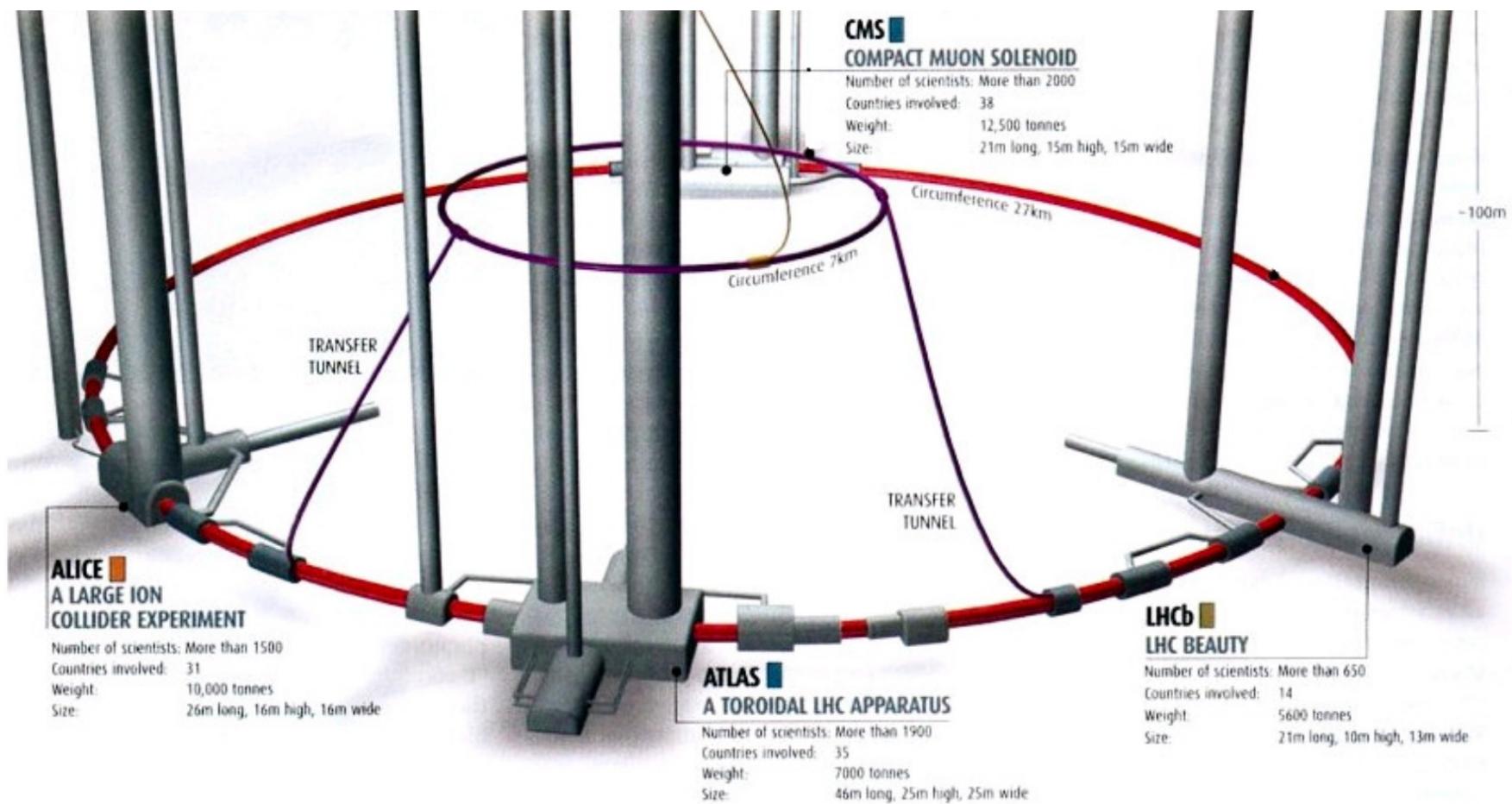
- Este proyecto se enmarca en el contexto de la **Física Experimental de Altas Energías**
- Más concretamente dentro de la **Física en Colisionadores**, el **LHC** y el detector **CMS**
- En el proyecto se abarcan **varios aspectos** de la Física Experimental en colisionadores:
  - Análisis de datos de colisionadores
  - Desarrollo de software de reconstrucción para grandes detectores
  - Instrumentación de detectores
  - Computación y técnicas estadísticas avanzadas (Aprendizaje Automático, IA, etc.)
- Líneas de trabajo en **investigación básica y transferencia de tecnología**

# El Modelo Estándar de las Partículas Elementales

- El Modelo Estándar ha sido **muy exitoso describiendo los experimentos** hasta la fecha
- Pero existen argumentos que sugieren que se trata de una **teoría efectiva a baja energía**
- **Argumentos teóricos:**
  - Alto número de parámetros (19 parámetros libres)
  - El **problema de la jerarquía** (estabilidad de la masa del bosón de Higgs)
  - Ausencia de violación CP en el sector de la fuerza fuerte
- **Argumentos experimentales:**
  - Incapacidad para proveer una descripción de la gravedad
  - Ausencia de **candidatos válidos para la Materia Oscura** (y/o Energía Oscura)
  - El descubrimiento de la masa de los neutrinos (y su origen en el marco del modelo)
  - Asimetría entre la materia y la antimateria
- Varias **extensiones al Modelo Estándar** intentan resolver alguno o varios de sus problemas
  - Supersimetría, extra-dimensions, teoría de cuerdas, Higgs compuestos,...

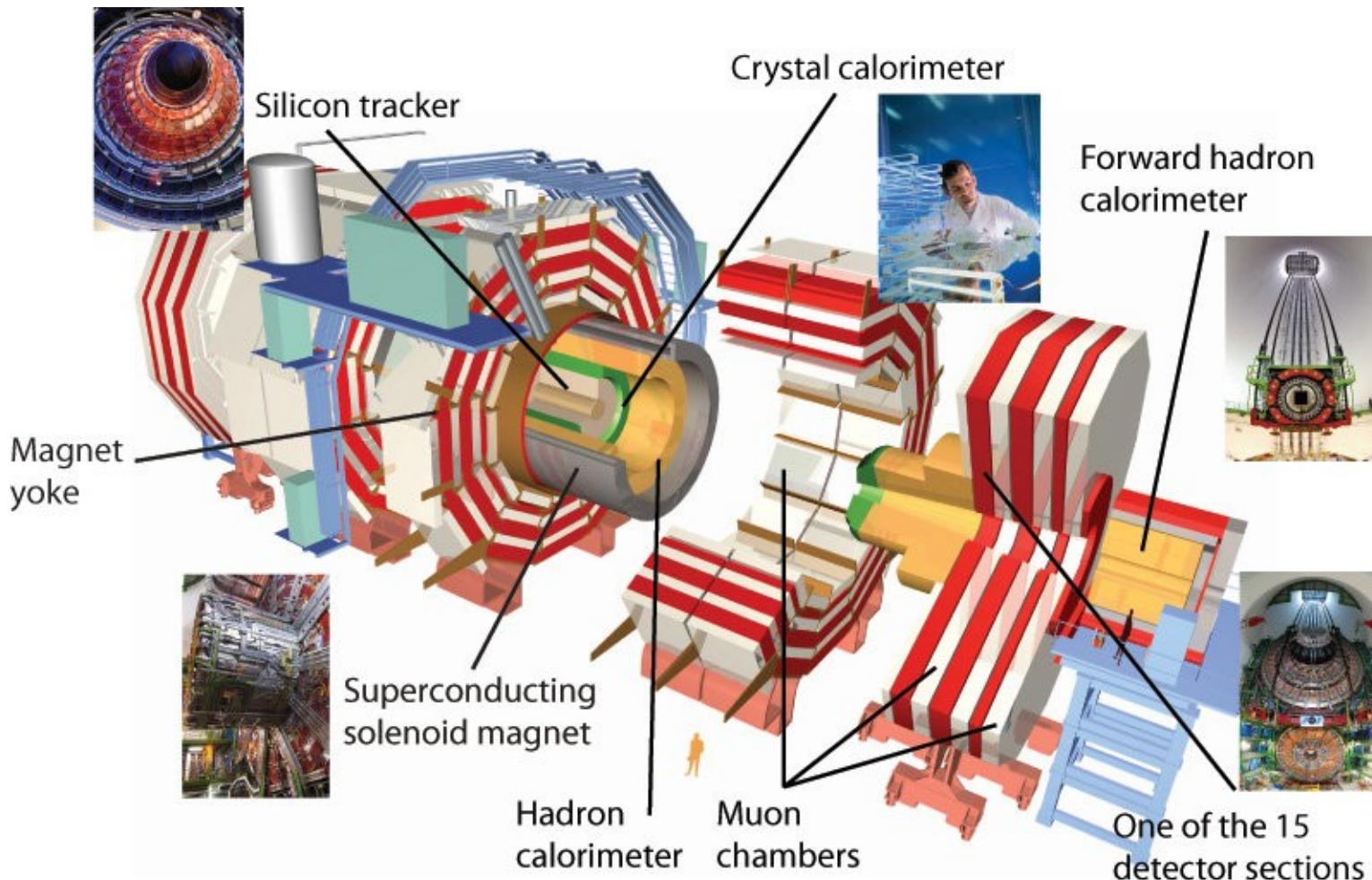
# El Gran Colisionador de Hadrones (LHC)

- › El LHC es un colisionador de protones instalado en la frontera Franco-Suiza cerca de Ginebra
- › Diseñado para alcanzar una energía del centro de masas de hasta 14 TeV
- › Ha operado durante los llamados Run 1 y Run2 a energías de 7, 8 y 13 TeV



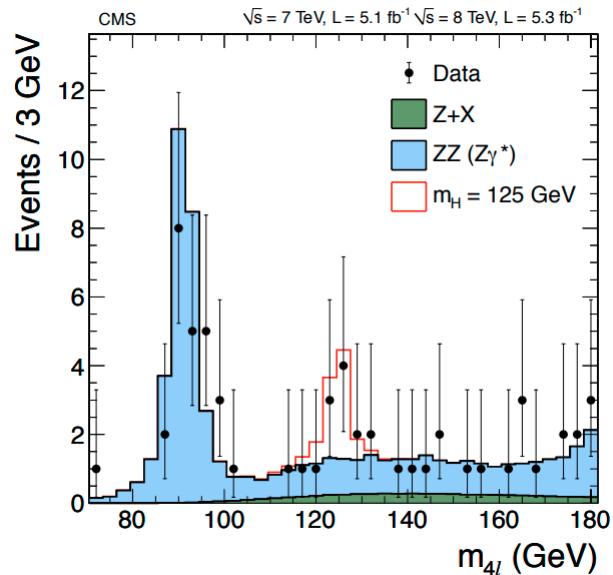
# El Solenoide Compacto de Muones (CMS)

- Uno de los cuatro detectores instalados en el LHC junto con ATLAS, ALICE y LHC-b
- Junto con ATLAS es uno de los dos detectores de propósito general

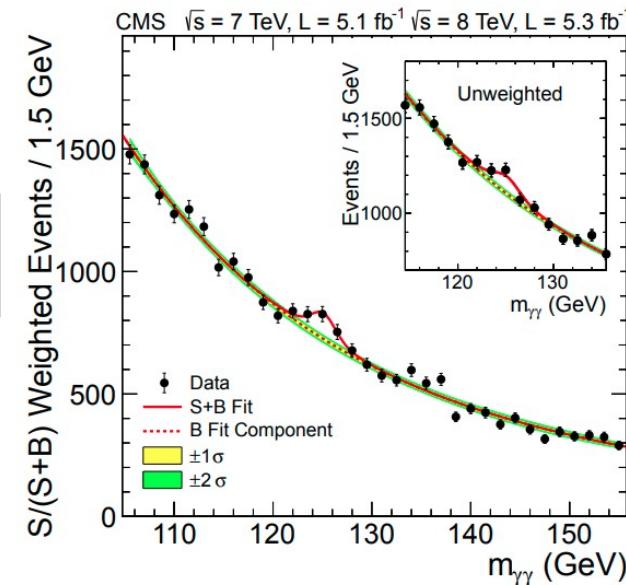


# Física en el LHC: objetivos y desafíos (I)

- El LHC y sus experimentos fueron diseñados para profundizar en varios aspectos del ME
- **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

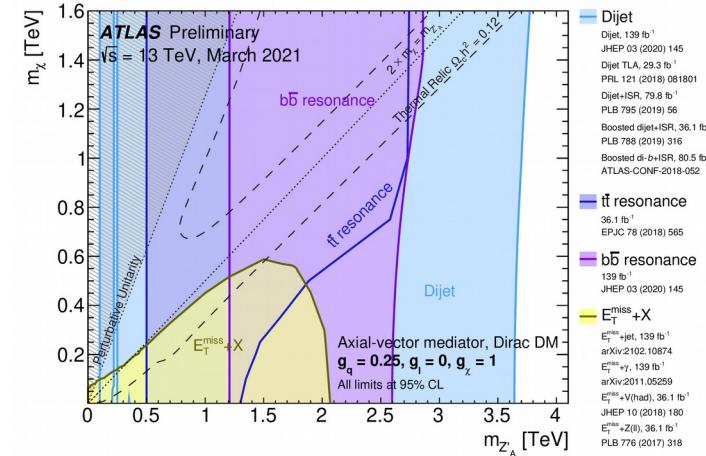
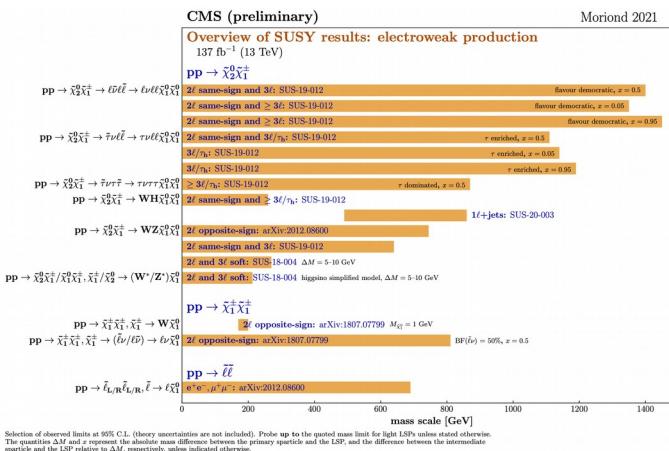


Premio nobel  
de Física 2013



# Física en el LHC: objetivos y desafíos (II)

- Ningún indicio de Nueva Física ha sido observado a pesar del intenso programa de búsquedas
  - Búsquedas de SUSY: límites de las masas de partículas supersimétricas  $\sim$  frontera de 1 TeV
  - Búsquedas de Materia Oscura: excluyendo grandes regiones del espacio de parámetros
  - Resonancias de di-jets,  $W'$ ,  $Z'$  excluyendo masas por encima de varios TeV
- Las propiedades del bosón de Higgs medidas sin encontrar desviaciones con respecto al EM
- A partir del año 2022, en el llamado **Run 3**, el LHC reanudará su funcionamiento
  - Medidas más precisas de las propiedades del bosón de Higgs
  - Nuevos canales de Nueva Física: partículas de tiempo de vida larga, RPV SUSY, etc
  - Estudio de asimetrías de la universalidad leptónica



# El Gran Colisionador de Hadrones de alta luminosidad

- Aumentará **1 orden de magnitud la luminosidad del LHC** (hasta  $3000 \text{ fb}^{-1}$  al final de su vida)
  - Nuevos y más poderosos imanes, nuevas líneas de transmisión, cadena de aceleración, etc
- Los experimentos están en proceso de adaptar los detectores a las nuevas condiciones
  - **CMS Phase-2 “Upgrade”**: tracker, calorímetros, sistema de muones, MTD, L1, etc
- Estudio de las **propiedades del bosón de Higgs** con acceso a nuevos procesos (HH)
- Búsquedas de **nueva física**, especialmente en topologías raras o no tan exploradas en el LHC
  - En este contexto cobran especial relevancia las búsquedas de partículas de larga vida media



# Líneas de investigación

1.- Análisis de datos con el experimento CMS: Run 3 y HL-LHC

2.- Instrumentación: “Phase-2 Upgrade” de CMS y el MIPs Timing Detector

3.- Tomografía muónica en aplicaciones industriales

4.- Futuros aceleradores

5.- Técnicas Avanzadas de Computación y Análisis

# Líneas de investigación

1.- Análisis de datos con el experimento CMS: Run 3 y HL-LHC

2.- Instrumentación: “Phase-2 Upgrade” de CMS y el MIPs Timing Detector

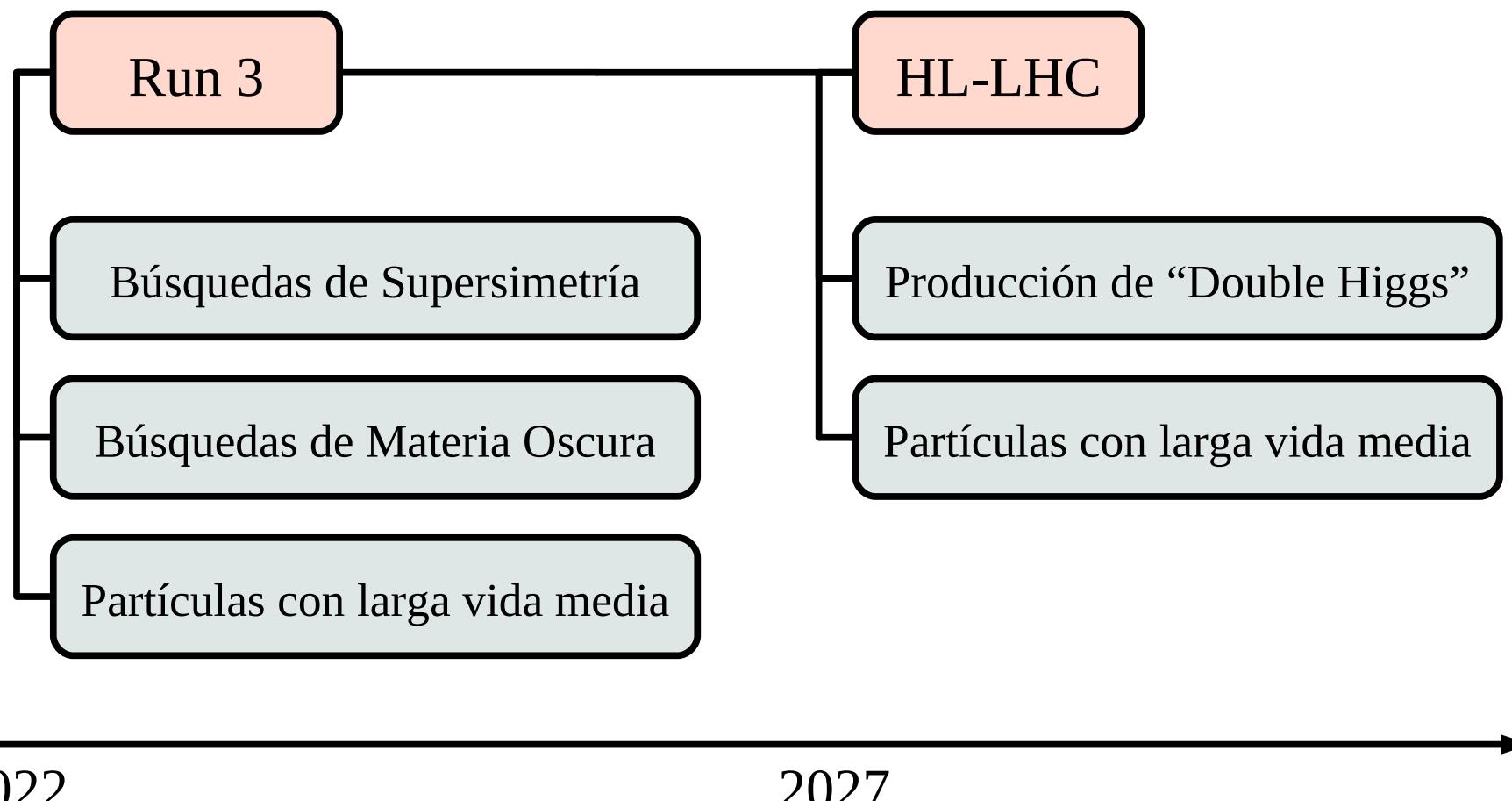
3.- Tomografía muónica en aplicaciones industriales

4.- Futuros aceleradores

5.- Técnicas Avanzadas de Computación y Análisis

# Objetivos generales

- › Búsqueda de Nueva Física y estudio de las propiedades del Bosón de Higgs en CMS
  - › Elemento común: **topologías con uno o más leptones** (electrón/muon)
  - › Dos escenarios temporales diferentes: **Run 3 del LHC (2022)** y el **HL-LHC (2027)**



# Run 3: SUSY con 2 leptones del mismo sabor y carga opuesta

- En 2022 el LHC comenzará el Run 3 con una energía centro de masas en el rango 13-14 TeV
  - Una luminosidad integrada prevista en torno a  $160 \text{ fb}^{-1}$
- Esta sub-línea busca reincidir en el análisis que lideré durante el Run 2 con los datos del Run 3
  - Especial **énfasis en procesos de sección eficaz más baja**: electroweak SUSY
  - Uso de nuevos triggers que permitan reducir el pt de los leptones (L1 Kalman triggers)
  - Zonas de señal con ISR (Initial State Radiation) jet para modelos con espectro comprimido
  - Aplicación de “taggers” basados en **aprendizaje automático** para identificar “boosted” Ws

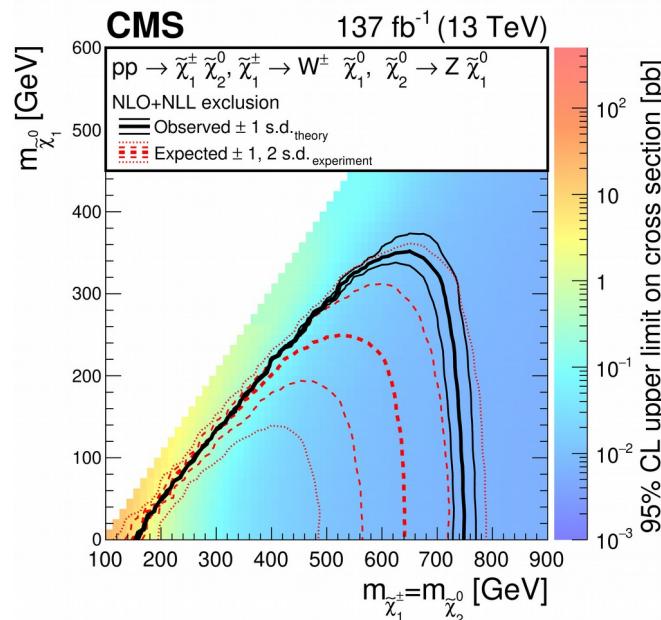
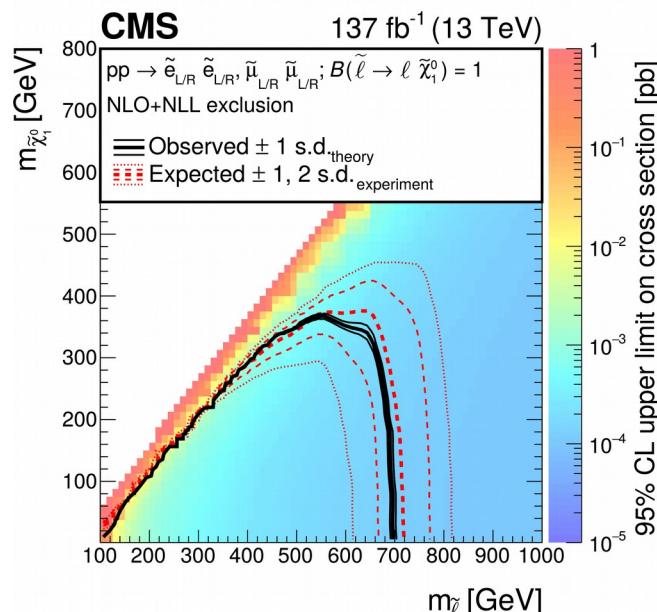


University of  
Zurich<sup>UZH</sup>

Universidad de Oviedo

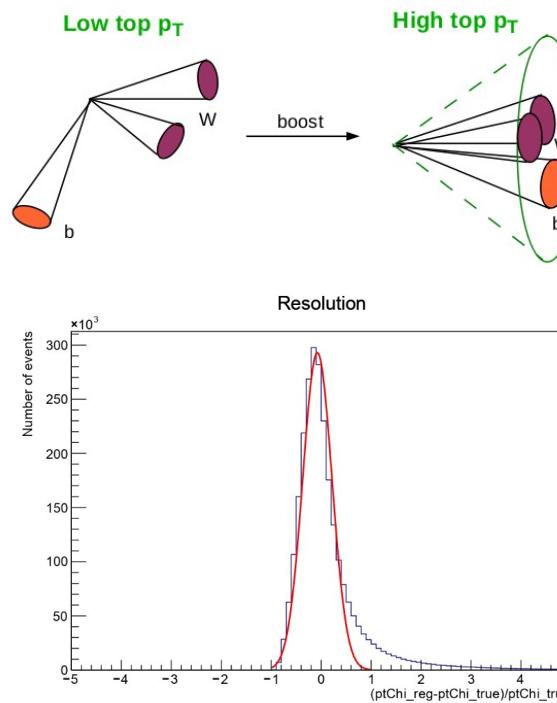
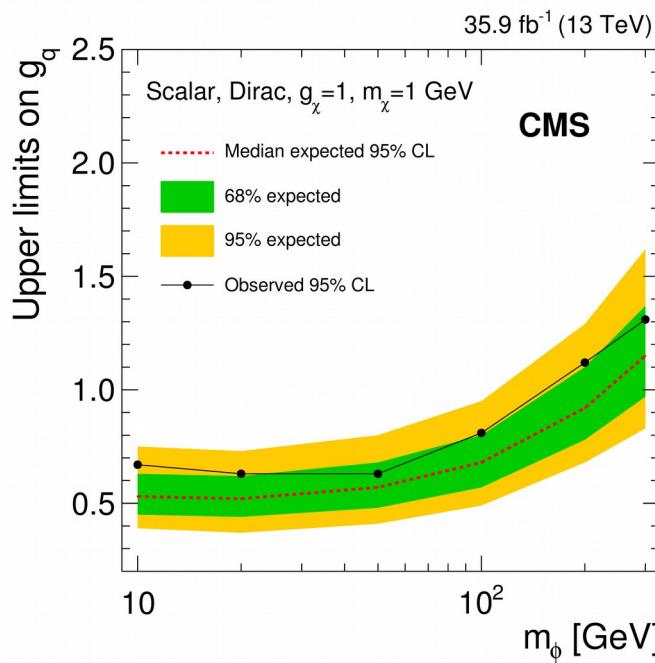


Instituto de Física de Cantabria



# Run 3: Búsquedas de Materia Oscura en canales leptónicos

- Búsqueda de Materia Oscura producida en asociación con quarks top (sencillo o par)
- Esta búsqueda constituye una consolidación de la búsqueda de materia oscura del Run 2
  - Una de las principales novedades es la inclusión del canal semileptónico
  - Uso de “taggers” basados en aprendizaje automático para identificar “boosted” top/W
  - Uso del “Dark pt” basado en una Red Neuronal Profunda como elemento de discriminación
  - Aplicable también a la búsqueda de DM con “single top”

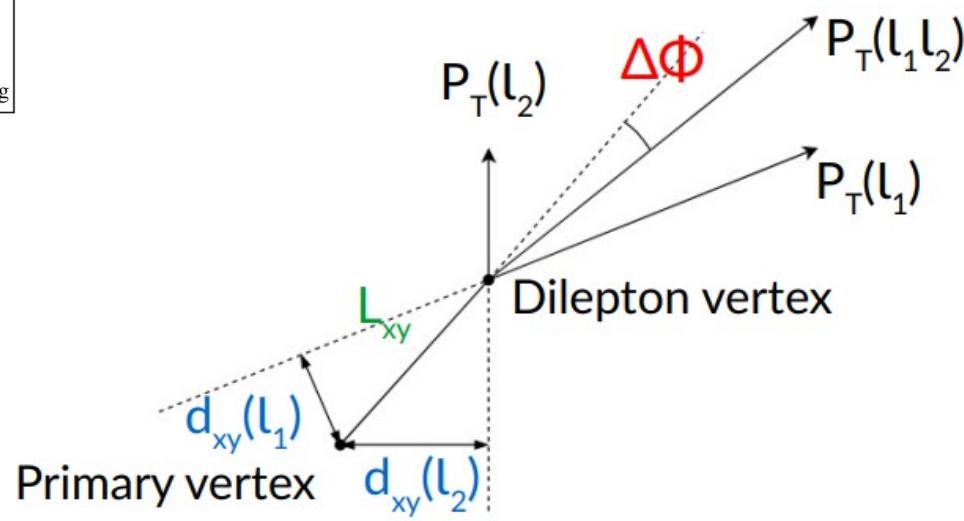
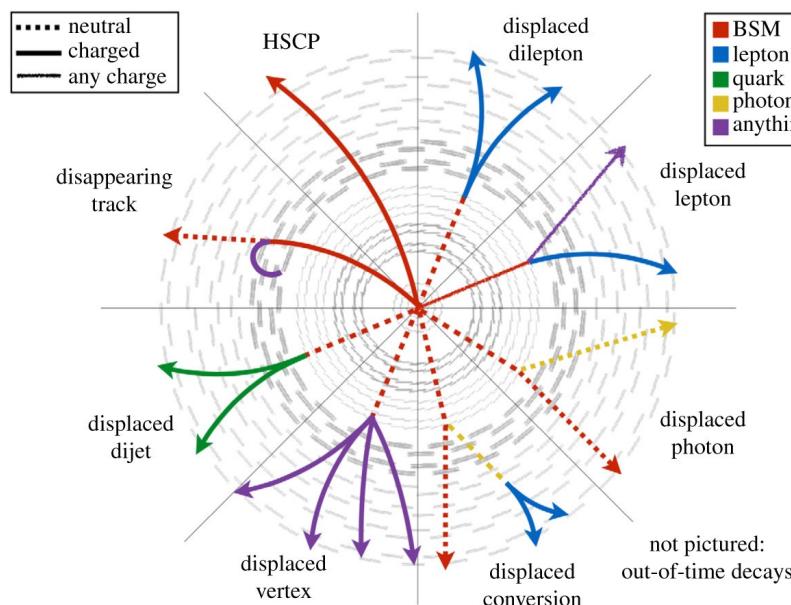


# Run 3: Búsquedas de partículas de larga vida media

- Producción de partículas de larga vida media decayendo a **pares de leptones desplazados**
- Estas búsquedas son de altísimo interés dada la aparente ausencia de Nueva Física hasta ahora
  - Una explicación a esta ausencia es que la Física venga en topologías no convencionales
- Este análisis extiende el análisis realizado durante el Run 2
  - Extensión a modelos de SUSY con “RPV” (Violación de paridad R)
  - Mejora de los objetos desplazados desarrollados durante el Run 2
  - Implementación y optimización de dichos métodos a nivel de Trigger



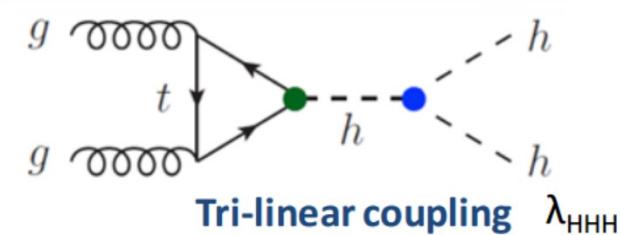
Universidad de Oviedo



# HL-LHC: Medida de la sección eficaz del proceso “HH”

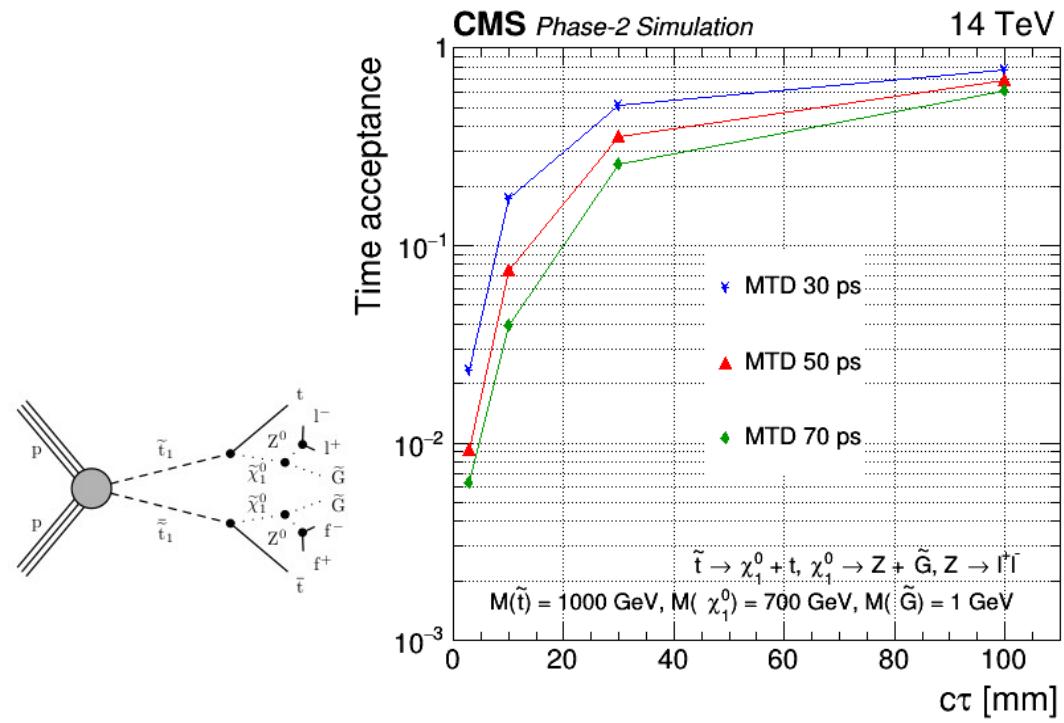
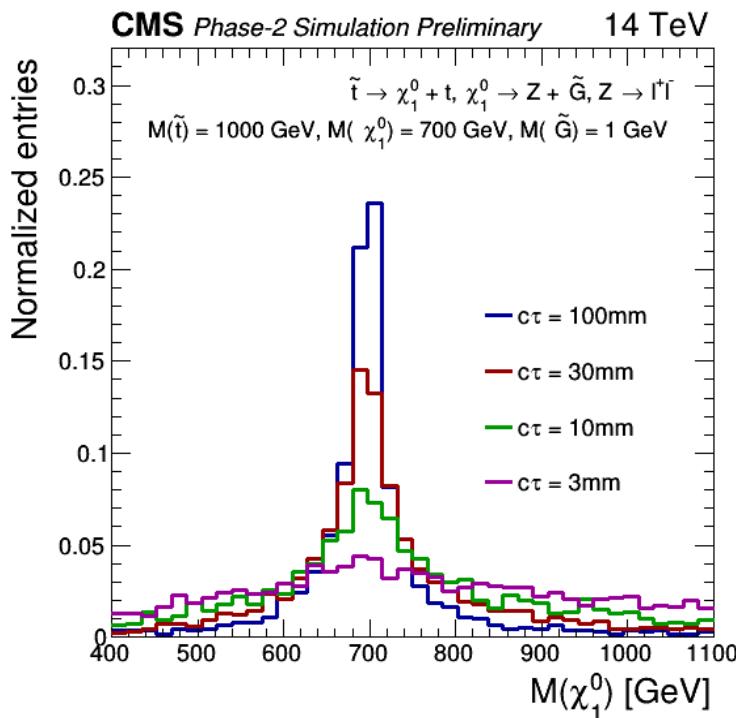
- La producción de HH es una herramienta fundamental para el estudio del potencial de Higgs
  - Acceso directo al “**self-coupling**” o “**trilinear coupling**” y posibles desviaciones
- Con una sección eficaz de 28.4 fb es uno de los análisis más destacados en el HL-LHC
- El análisis se compone de 5 sub-análisis atendiendo a los decaimientos del segundo Higgs:
  - $\text{HH} \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ ,  $\text{HH} \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$ ,  $\text{HH} \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ ,  $\text{HH} \rightarrow b\bar{b}WW$ ,  $\text{HH} \rightarrow b\bar{b}ZZ$
- Este análisis fue también elegido como “benchmark” para el TDR del MTD
- La propuesta de este proyecto es trabajar en el canal  $\text{HH} \rightarrow b\bar{b}WW$ 
  - **Uso de la experiencia adquirida en el MTD para mejorar el aislamiento de leptones**

Di-Higgs decay	Signal increase (%)		Expected significance	
	BTL	BTL+ETL	No MTD	MTD
$b\bar{b}b\bar{b}$	13	17	0.88	0.95
$b\bar{b}\tau\tau$	21	29	1.3	1.6
$b\bar{b}\gamma\gamma$	13	17	1.72	1.85
$b\bar{b}WW$			0.53	0.58
$b\bar{b}ZZ$			0.35	0.40
Combined			2.4	2.7



# HL-LHC: Búsqueda de partículas de larga vida media

- › La búsqueda de partículas de larga vida media es otro elemento destacado en el HL-LHC
- › La medida temporal aportada por el MTD abre posibilidades únicas para este tipo de física
  - › El retraso temporal de las partículas puede utilizarse como una variable discriminadora
  - › La estimación de la velocidad puede usarse para reconstruir propiedades de las partículas
- › Este proyecto persigue llevar a la práctica estas ideas que desarrollé para el TDR del MTD



# Líneas de investigación

1.- Análisis de datos con el experimento CMS: Run 3 y HL-LHC

2.- Instrumentación: “Phase-2 Upgrade” de CMS y el MIPs Timing Detector

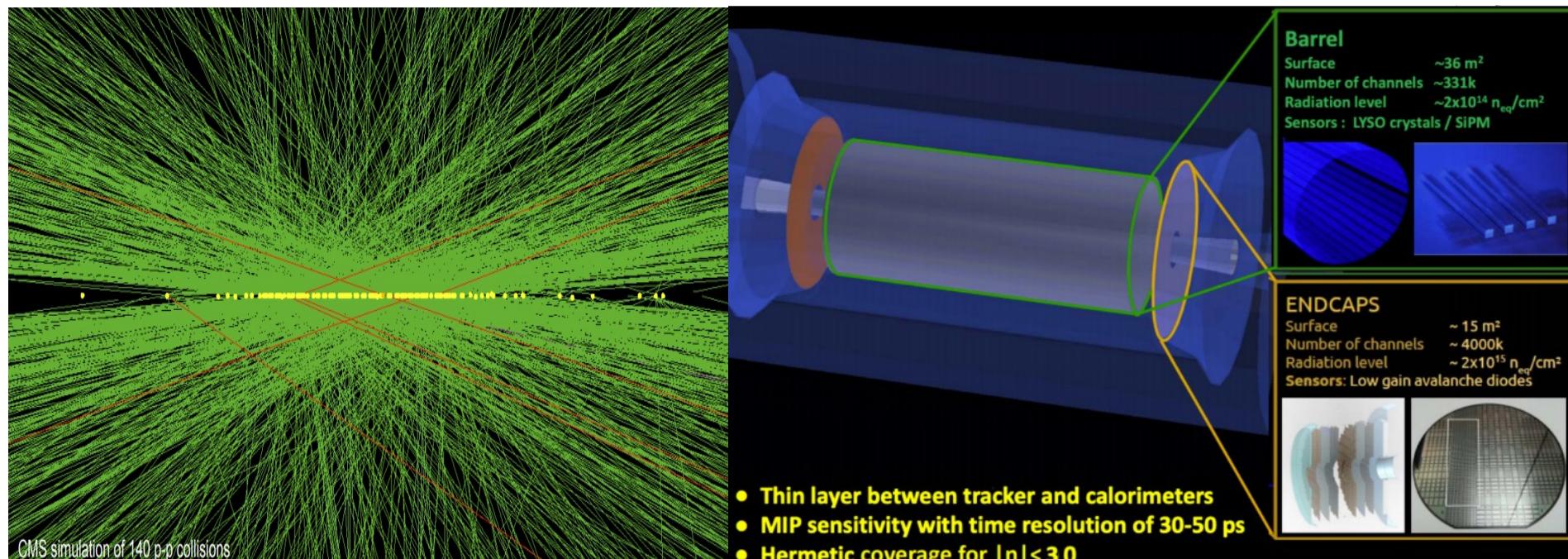
3.- Tomografía muónica en aplicaciones industriales

4.- Futuros aceleradores

5.- Técnicas Avanzadas de Computación y Análisis

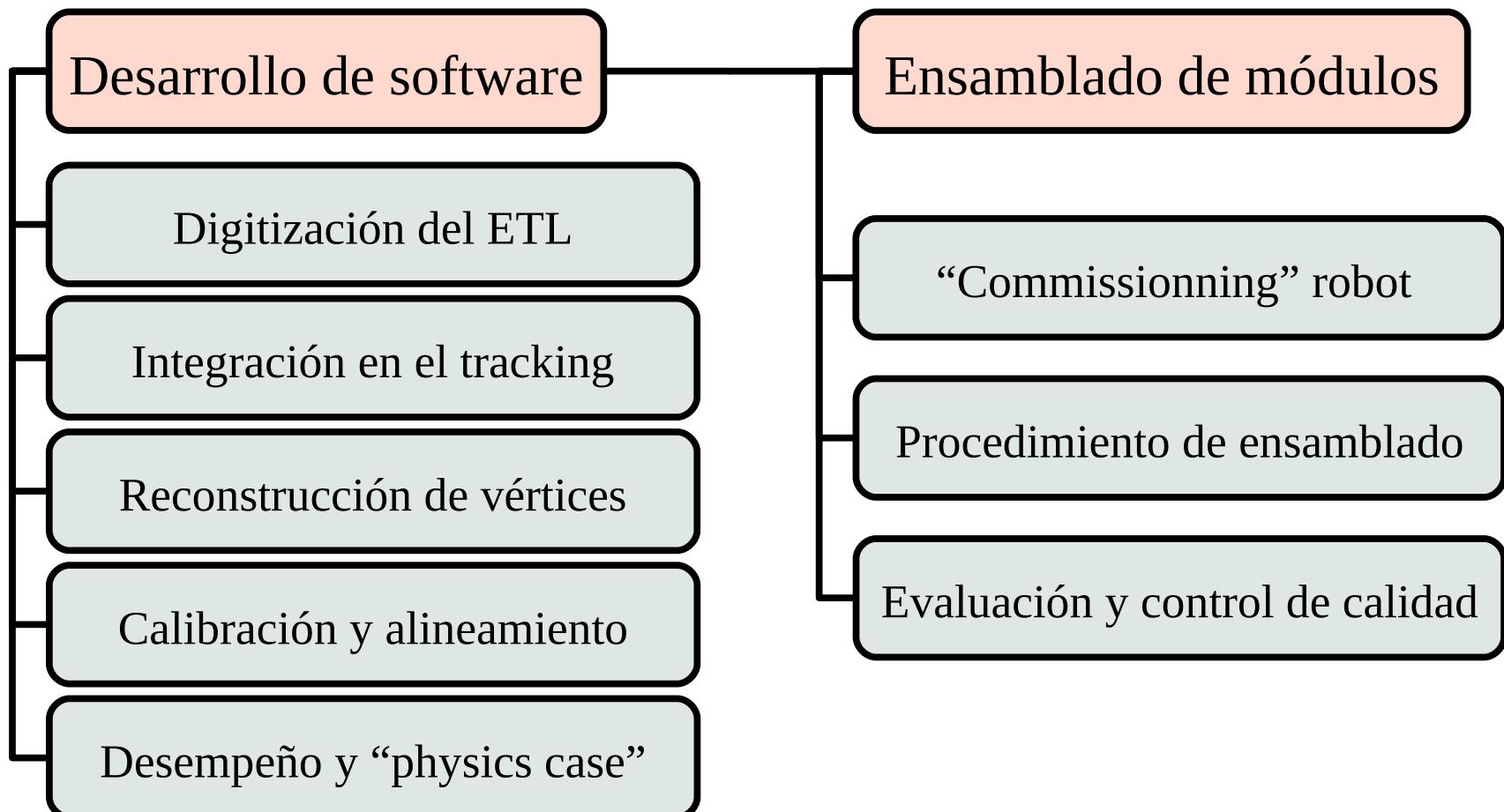
# El MIPs Timing Detector: MTD

- El HL-LHC impondrá unas condiciones de operación muy complicadas a los detectores
- Concretamente el nivel de pile-up se espera que aumente desde los 40 del LHC a 140-200
- El **MTD** es un subdetector con capacidad para medir el tiempo de paso de las partículas
  - **BTL (Barrel Timing Layer):** Tecnología de detección basada en cristales (LYSO)
  - **ETL (Endcap Timing Layer):** Tecnología de detección basada en silicio (LGADs)
- Esta información permitirá discriminar trazas espúreas volviendo a un pile-up como el del LHC



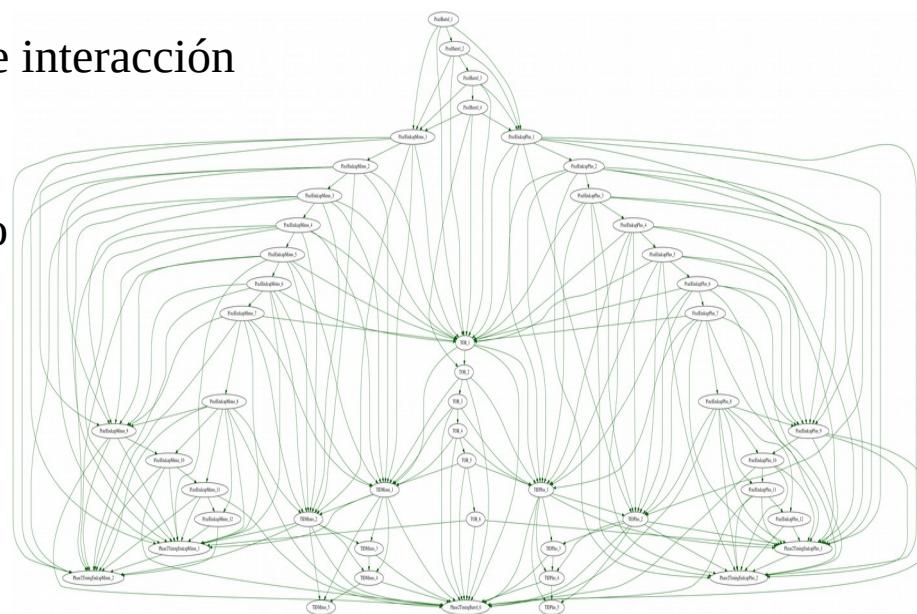
# Objetivos generales

- › Contribución al desarrollo y construcción del MIPs Timing Detector
- › Responsable (L2 convener) del desarrollo del software de reconstrucción del detector
- › Responsable del ensamblado de ~ 900 módulos del ETL con los sensores LGADs



# Desarrollo de software del MTD (I)

- Sofisticación de la **digitización del ETL** en el software de CMS (CMSSW)
  - La primera fase (inclusión de píxeles en los LGADs y zonas de no ganancia) está lista
  - Inclusión y parametrización de la forma de señal y modulación de la electrónica de lectura
  - En contacto con expertos en LGADs (IFCA, CNM) y electrónica (Fermilab)
- **Integración del MTD en el tracking general de CMS (4D Tracking)**
  - En 2020 logré exitosamente incluir el MTD en el sistema de navegación del tracker
  - Adaptación de las estructuras necesarias para la aplicación del Kalman filter
  - Propagación temporal del MTD al punto de interacción
  - Resolución de la ambigüedad de masa
  - Adaptación del sistema al tracking iterativo

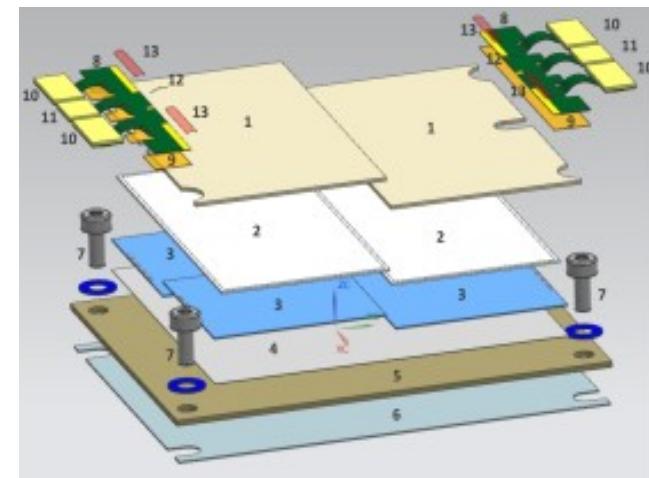


# Desarrollo de software del MTD (II)

- **Reconstrucción de vértices** utilizando la información temporal (4D vertexing)
  - Algoritmo de “Deterministic Annealing” en dos dimensiones (aplicación al MTD)
  - Exploración de algoritmos alternativos: limpieza a posteriori utilizando el tiempo
  - Colaboración con expertos en “vertexing” (PSI) y tracking de CMS
- **Calibración y alineamiento del MTD**
  - Identificación de constantes y parámetros necesarios para operar el detector
  - Establecimiento de protocolos de cálculo de las constantes: procedimiento, frecuencia, etc
  - Bases de datos online/offline para albergar las constantes
  - Creación del software necesario de alineamiento para el MTD en CMSSW
- **Desempeño de MTD** en los objetos de física y mejora del “**Physics Case**”
  - Establecimiento de informaciones del MTD estándar en los formatos de datos de CMS
  - Colaboración con los grupos de Física para mejorar los algoritmos de reconstrucción
  - Mejora y extensión de los “Physics cases” del MTD (ver línea de investigación 1)

# Ensamblado de módulos del ETL (I)

- El IFCA ha adquirido el compromiso de construir 900 módulos del ETL del MTD
  - Parte del proyecto del plan estatal (estando yo como responsable del paquete de trabajo)
  - El trabajo se suma a los esfuerzos de Universidad de Nebraska, Fermilab y Torino/INFN
- “Commissioning” del robot de ensamblado
  - Parte del proceso fue iniciado ya en el contexto de un TFG y un TFM
  - **Integración de visión artificial en el robot** para realizar el alineamiento de piezas
  - **Integración del control de las líneas de vacío** (16 líneas en la planificación actual)
  - Medida de la precisión espacial y tiempos medios de operación del robot



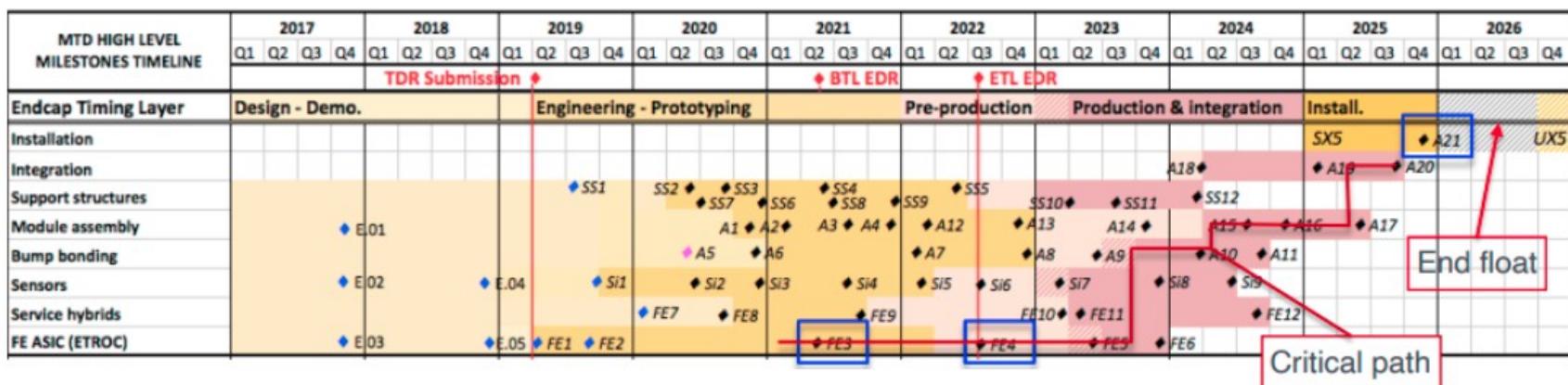
# Ensamblado de módulos del ETL (II)

## ➤ Preparación y aplicación de los procedimientos de ensamblado

- Preparación de base de datos para registro de componentes entrantes e inspección visual
- Programación del robot con secuencia completa de ensamblado, incluyendo procedimiento automático de alineamiento visual y control sincronizado de las líneas de vacío

## ➤ Evaluación y control de calidad de los módulos ensamblados

- Control de funcionamiento eléctrico
- Controles de resistencia mecánicos y térmicos
- Creación de bases de datos para registro de módulos salientes



# Líneas de investigación

1.- Análisis de datos con el experimento CMS: Run 3 y HL-LHC

2.- Instrumentación: “Phase-2 Upgrade” de CMS y el MIPs Timing Detector

3.- Tomografía muónica en aplicaciones industriales

4.- Futuros aceleradores

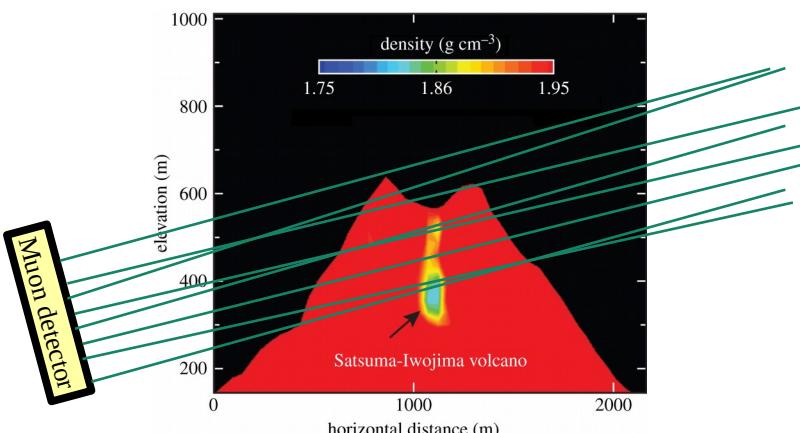
5.- Técnicas Avanzadas de Computación y Análisis

# Tomografía muónica: muones cósmicos

- Un flujo constante de muones (10000 por minuto y m<sup>2</sup>) alcanza la superficie de la tierra
- Fundamentalmente interactúan con la materia perdiendo energía y desviando su trayectoria
  - Cuando mayor es la densidad más energía pierden y más se desvían
- Estas propiedades permiten usar a los muones como una herramienta de testado de densidad

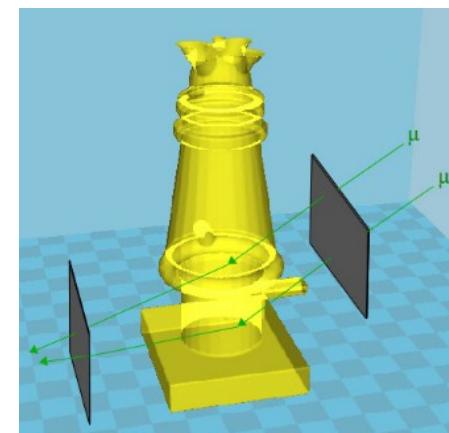
## Tomografía muónica de absorción

- Medidas de la atenuación del flujo
- Un único detector requerido
- Objetos grandes + largos tiempos de exposición
- Aplicaciones: geología, vulcanología, etc



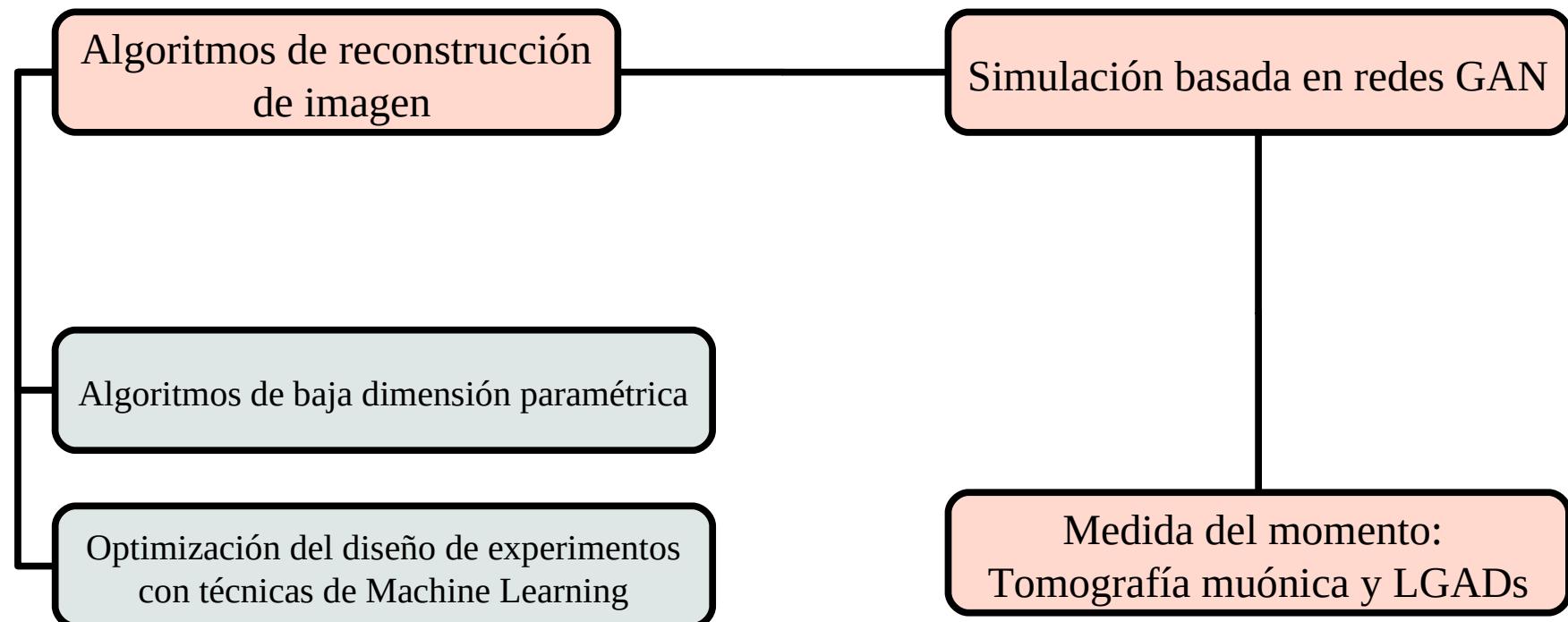
## Tomografía muónica de “scattering”

- Medida de la desviación angular (scattering)
- Dos detectores requeridos (antes y después)
- Objetos pequeños + cortos tiempos de exposición
- Aplicaciones: seguridad de fronteras, nuclear, etc



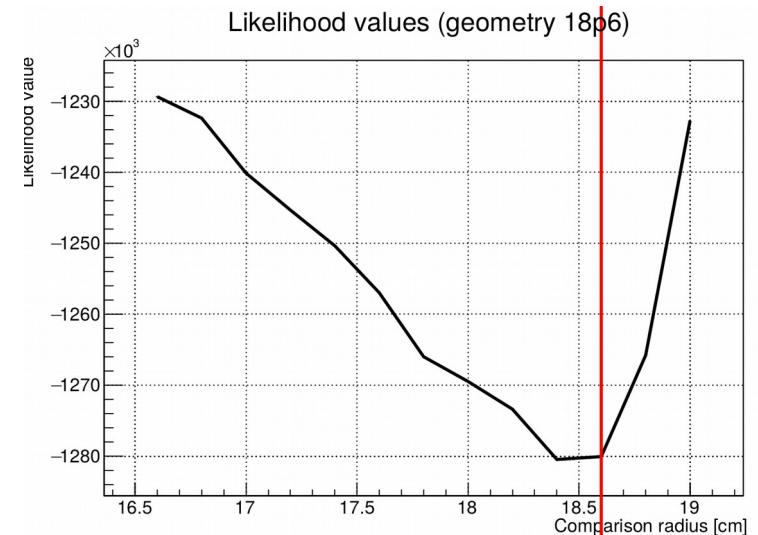
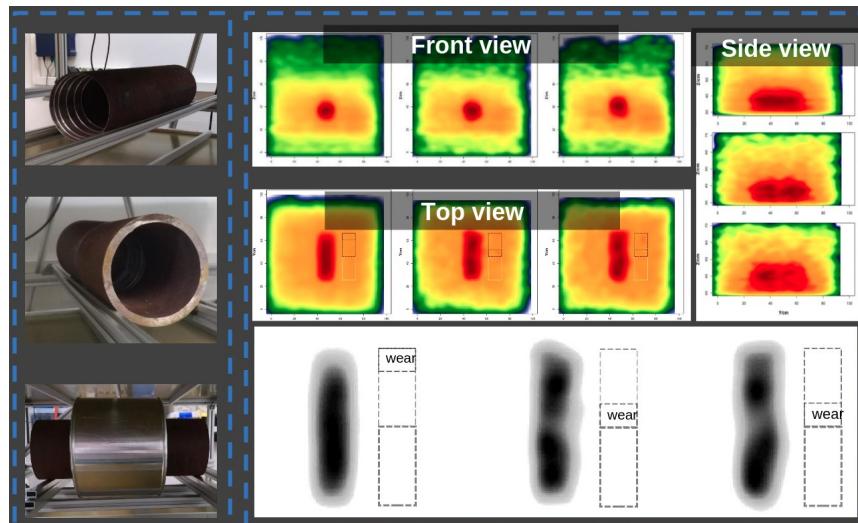
# Objetivos generales

- Establecer la tomografía muónica como una técnica de ensayos no destructivos en la industria
  - Mantenimiento preventivo de equipamiento, control de calidad del proceso productivo
- Ventajas competitivas de la tomografía muónica en este entorno:
  - Alto poder de penetración y la posibilidad de operar con el equipamiento en funcionamiento



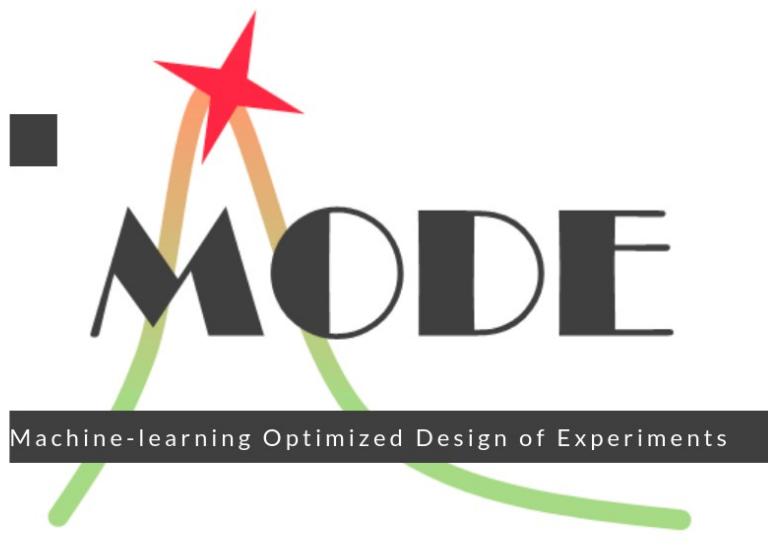
# Algoritmos de baja dimensión parámetrica

- Las aplicaciones industriales son problemas de baja dimensión paramétrica
  - Normalmente existen planos con descripciones detalladas de las geometrías
  - El interés consiste en ver pequeñas variaciones sobre una geometría nominal conocida
- Dos familias de algoritmos siendo investigadas :
  - Algoritmos basados en “Maximum Likelihood” estimation
  - Algoritmos de regresión basados en **Aprendizaje Automático Profundo**
- Colaboración con la empresa Muon Systems en el marco de un doctorado industrial
  - Aplicación de los algoritmos a problemas del sector (publicaciones en camino)



# Optimización del diseño de experimentos con ML

- Miembro de la **colaboración MODE** (ML for Optimized Design of Experiments)
- Foco en el uso de “**Differential Programming**” para optimizar el diseño de experimentos
  - Función objetivo encapsulando la figura de mérito deseada
  - Programa paramétrico y diferenciable para calcular la función de objetivo
- Actualmente trabajando en tomografía muónica como un “Physics Case”
  - Escribiendo un primer software TomOpt basado en PyTorch
  - Objetivo: geometría y densidad del objeto inspeccionado en muografía de scattering



**UCL**  
Université  
catholique  
de Louvain



**UCA**  
UNIVERSITÉ  
Clermont  
Auvergne

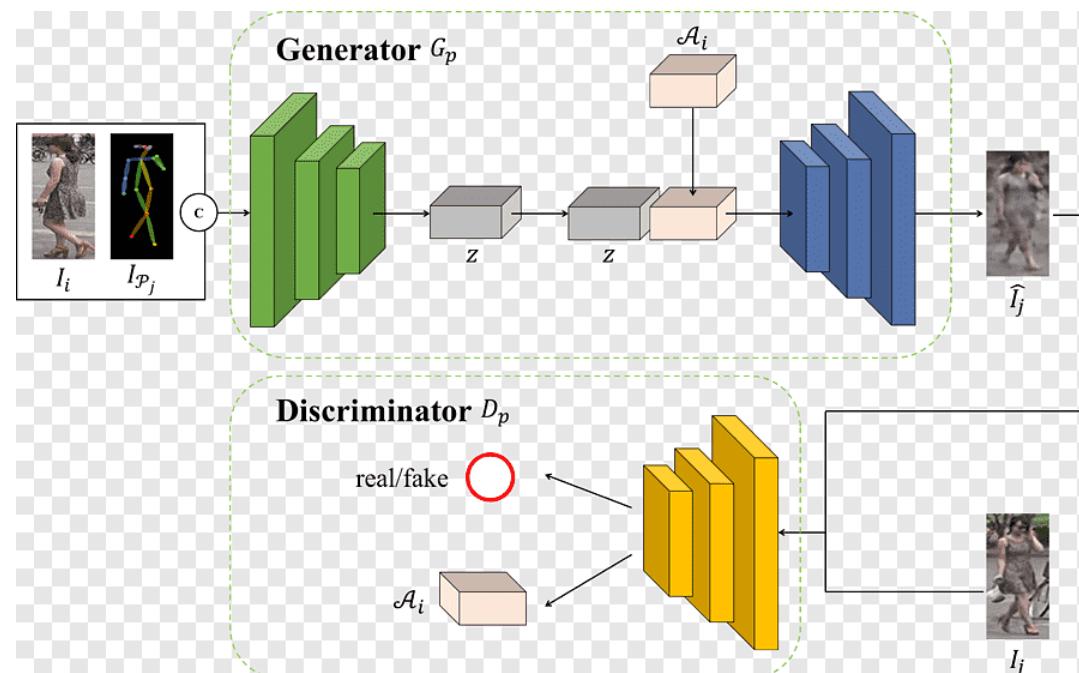


NEW YORK UNIVERSITY



# Simulación ultra-rápida basada en redes GAN

- › Los métodos basados en ML supervisado requieren grandes cantidades de simulación
  - Muestras de entrenamiento que cubran el espacio de parámetros satisfactoriamente
- › En tomografía muónica se usa el estándar GEANT4 → muy intensivo computacionalmente
- › La idea es sustituir GEANT4 usando un sistema de **Redes Generativas Adversarias**
  - Varios órdenes de magnitud en la velocidad de generación (una vez entrenadas)
  - Posibilidad de entrenar con datos reales para absorber las propiedades de los detectores

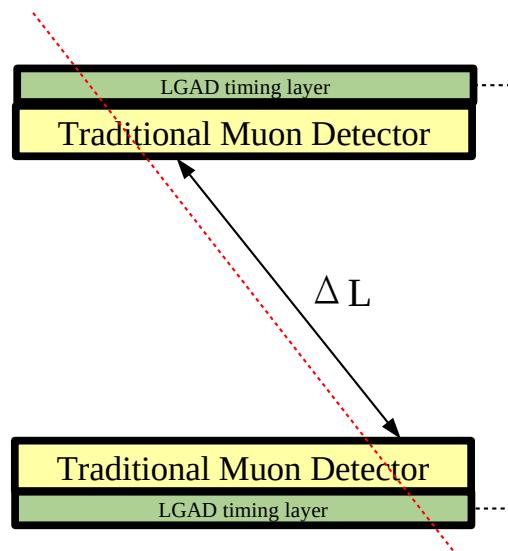


Proyecto concedido:

*“Algoritmia de simulación ultra-rápida para aplicaciones industriales de tomografía muónica usando redes neuronales generativas adversarias”*

# Medida del momento de los muones: TM and LGADs

- › Nueva idea propuesta en el marco de una colaboración entre IFCA, CNM and ITAINNOVA
- › Una de las grandes limitaciones de la TM es el desconocimiento del momento de los muones
  - › La desviación angular depende del material pero también de  $p$   $\theta_0 = \frac{13.6}{\beta cp} z \sqrt{x/X_0} [1 + 0.038 \ln(x/X_0)]$
  - › En experimentos el momento se mide a través de la curvatura en campos magnéticos
  - › Esta opción no es viable en aplicaciones industriales (precio + dificultad técnica)
- › Los algoritmos de TM promedian el valor del momento sufriendo pérdida de resolución
- › **Idea: estimar el momento a través de la medida de la velocidad usando LGADs**



**Proyecto concedido:** “Un nuevo método tomográfico de muones en 4D para la obtención de imágenes de la salud estructural de grandes infraestructuras”

$$\Delta T = T_2 - T_1 \rightarrow \beta = \frac{1}{c} \frac{\Delta L}{\Delta T} \rightarrow p = m_{muon} \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Time resolution  $\sim 50\text{ps}$  and  $\Delta L \sim 1\text{m} \rightarrow$  momentum resolution  $\sim 10\%$

# Líneas de investigación

1.- Análisis de datos con el experimento CMS: Run 3 y HL-LHC

2.- Instrumentación: “Phase-2 Upgrade” de CMS y el MIPs Timing Detector

3.- Tomografía muónica en aplicaciones industriales

4.- Futuros aceleradores

5.- Técnicas Avanzadas de Computación y Análisis

# Futuros aceleradores: posicionamiento científico

- En el año 2020 se publicó el “**Update of the European Strategy for Particle Physics**”
- En este documento se resumen las prioridades de la comunidad europea de física de partículas:
  - Máxima prioridad es la construcción de un colisionador  $e^+e^-$  que sea una “**Higgs Factory**”
  - En el largo plazo → perseguir la construcción de un colisionador pp con  $\text{sqrt}(s) \sim 100 \text{ TeV}$
- Para conseguir estos objetivos las recomendaciones son:
  - Comenzar investigación en tecnologías de aceleración y sobre todo en imanes de superconductor de alto campo
  - Investigar la viabilidad de un gran acelerador de protones en el CERN con  $\text{sqrt}(s) \sim 100 \text{ TeV}$  que tenga como fase previa un  $e^+e^-$  (“Higgs Factory”)
  - El ILC en Japón es compatible con esta estrategia
- En los próximos años nuevas líneas de trabajo se abrirán en este contexto (instrumentación de detectores, computación), siendo necesario un buen posicionamiento científico

