



**ESCUELA DE VERANO DE FÍSICA DE
PARTÍCULAS, ASTROPARTÍCULAS Y
COSMOLOGÍA**

Esquema de contenidos V.1

Phy6cool

2023 - ESQUEMA DE CONTENIDOS

Guion preliminar de contenidos teóricos que se impartirán durante la escuela Phy6cool 2023. Para más información:

<http://phy6cool.ciemat.es/>

phy6cool@ciemat.es

Contenidos de temática transversal (*leptones*)

e:	INTRODUCCIÓN TEÓRICA	6
μ :	INSTRUMENTACIÓN (I & II)	8
τ :	COMPUTACIÓN CIENTÍFICA	9

Contenidos teóricos (*quarks*)

UP:	FÍSICA DE COLISIONADORES (I & II)	10
DOWN:	NEUTRINOS	10
CHARM:	ASTROPARTÍCULAS (RAYOS CÓSMICOS & GAMMA)	12
STRANGE:	MATERIA OSCURA	12
TOP:	COSMOLOGÍA	14
BOTTOM:	ONDAS GRAVITACIONALES	15

CONTENIDOS DE TEMÁTICA TRANSVERSAL (leptones)

e: INTRODUCCIÓN TEÓRICA

RESUMEN:

La física fundamental tiene hoy en día un modelo estándar de la cosmología, conocido como Λ CDM. Está basado en la teoría general de la relatividad y en el principio cosmológico. Esta teoría explica todos los resultados observacionales obtenidos con gran precisión. Además, se han obtenido de él numerosas predicciones, todas ellas confirmadas posteriormente por las observaciones. Por otra parte, la teoría microscópica de las interacciones fundamentales, el modelo estándar (SM), explica todos los resultados experimentales sobre partículas elementales acumulados desde hace un siglo, hasta escalas de energía del orden del TeV. Esta teoría está basada en la teoría cuántica de campos, que unifica la física cuántica con la teoría especial de la relatividad. Uno de los grandes objetivos de la física fundamental es desarrollar un marco conceptual que unifique ambas teorías. Sin embargo, a pesar del enorme trabajo que los científicos llevan realizando décadas para unificarlas, ambas teorías están en conflicto.

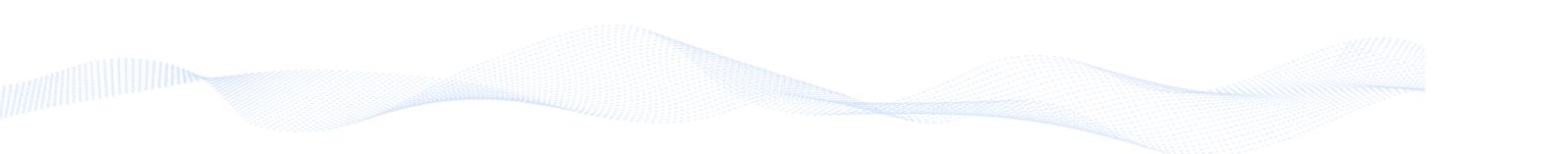
En esta sesión revisaremos las dos teorías, la relación entre ellas y los problemas abiertos en la física fundamental, que justifican las líneas de investigación desarrolladas con más detalle en las restantes asignaturas de Phy6cool.

CONTENIDOS:

1. Los pilares de la física

- a. Situación de la física fundamental
- b. Métodos de estudio

2. El modelo estándar

- a. Perspectiva histórica
 - b. Física cuántica
 - c. Relatividad especial
 - d. Simetrías
 - e. El modelo estándar
 - f. Limitaciones del modelo estándar
- 

3. La relatividad general

- a. Gravedad de Einstein
- b. Pruebas experimentales clásicas
- c. Ondas gravitacionales
- d. Cosmología: Λ CDM
- e. El sector oscuro: materia y energía oscuras

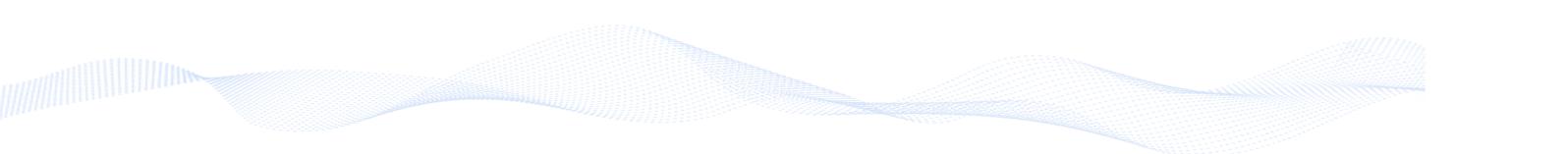
4. Problemas abiertos en física de partículas y cosmología

REFERENCIAS

Libros de texto:

1. *Introduction to Elementary Particles*, D. Griffiths, ed. Wiley-VCH Verlag GmbH (2008), ISBN 9783527406012.
2. *Gauge Theories in Particle Physics: A Practical Introduction*, I. Aitchison & A. Hey, ed. Institute of Physics (2003), ISBN 978-0-585-44550-2.
3. *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*, S. Carroll, ed. Addison-Wesley (2003), ISBN 0805387323.
Versión disponible online en <https://arxiv.org/abs/gr-qc/9712019>.
4. *Modern Cosmology*, S. Dodelson, ed. Academic Press Inc (2020), ISBN 0128159480.

Libros de divulgación:

5. *The Theory of Almost Everything: the Standard Model, the unsung triumph of modern physics*, R. Oerter, ed. Plume (2006), ISBN 0452287863.
 6. *Deep Down Things: The Breathtaking Beauty of Particle Physics*, B. A. Schumm, ed. Johns Hopkins University Press (2004), ISBN 9780801879715.
 7. *Los ingredientes secretos: materia oscura, energía oscura y las nuevas ideas sobre el universo*, E. Sánchez Álvaro, ed. Cultiva Libros (2015), ISBN 9788416422098.
- 

II: INSTRUMENTACIÓN (I & II)

RESUMEN:

En esta sesión introduciremos los tipos más importantes de detectores y los conceptos básicos de la instrumentación científica más común en los experimentos de física de partículas y astrofísica.

Para construir un experimento en física de partículas necesitamos algunos elementos básicos como son un detector de radiación y una cadena de electrónica, que acabe convirtiendo la medida del detector en una información que pueda procesarse posteriormente en los sistemas de computación científica.

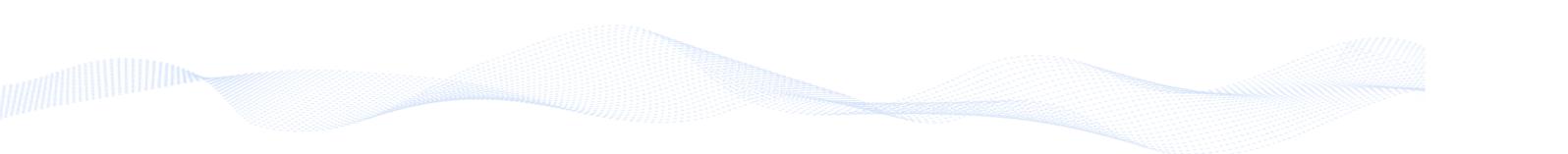
En la actualidad se disponen de múltiples tipos de detectores, cuyo diseño y materiales empleados difieren en gran medida dependiendo del experimento en cuestión y de las características físicas de las partículas que se pretenden medir.

Por otro lado, es imprescindible hoy en día contar con un sistema de adquisición de datos que permita almacenar en un ordenador la información que proporciona el detector sobre las partículas que estamos intentando medir. Estos sistemas de adquisición de datos están inevitablemente formados por electrónica que interesa cuidar pues es crítica para poder realizar de forma fiable tu medida. Se revisarán los conceptos necesarios de las tecnologías empleadas hoy en día para poder construir cualquier experimento.

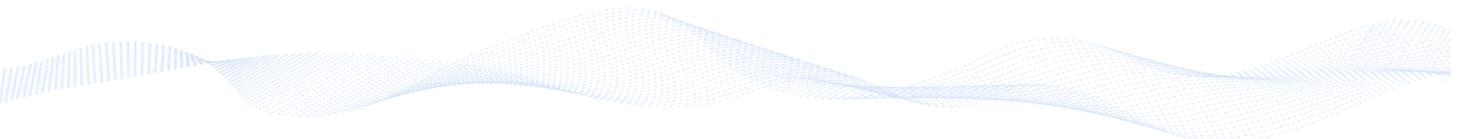
CONTENIDOS:

1. Interacción de partículas con la materia
2. Tipos de detectores
 - a. Partículas cargadas - detectores gaseosos
 - b. Partículas cargadas - detectores de estado sólido
 - c. Partículas cargadas - centelleadores
 - d. Partículas neutras - fotodetectores
 - e. Identificación de partículas
 - f. Calorimetría
3. Aceleradores
 - a. Historia de los aceleradores
 - b. Tipos de aceleradores
 - c. Componentes
4. Instrumentación científica
 - a. Electrónica frontal
 - b. Electrónica digital
 - c. Sistemas de disparo y adquisición de datos

BIBLIOGRAFÍA:



1. Gaseous Radiation Detectors. Fundamentals and Applications : Fabio Sauli, ISBN: 9781107043015
2. Particle Detectors: Fundamentals and Applications: Hermann Kolanoski , Norbert Wermes
3. <https://home.cern/science/experiments/how-detector-works>
4. K. Kleinknecht - Detectors for Particle Radiation, C.U.P. 1990
5. R.K. Bock & A. Vasilescu - The Particle Detector BriefBook, Springer 1998
6. R. Fernow - Introduction to Experimental Particle Physics, C.U.P. 1986
7. W.R. Leo - Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer-Verlag 1987
8. G.F. Knoll - Radiation Detection and Measurement, Wiley 1989



τ: COMPUTACIÓN CIENTÍFICA

RESUMEN:

La ciencia moderna necesita la computación masiva. Los experimentos de las grandes colaboraciones de física producen cada vez mayores cantidades de datos, que se deben almacenar, transferir, procesar y analizar. El éxito de estos experimentos pasa por desplegar y operar importantes infraestructuras de recursos computacionales, por adoptar herramientas y tecnologías informáticas modernas, y por formar adecuadamente a los usuarios de estos recursos, los científicos.

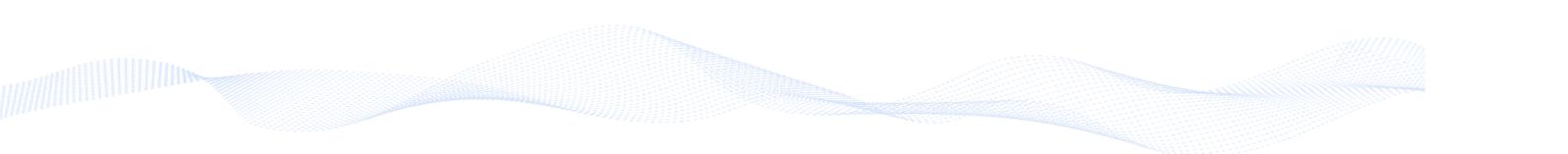
En la sesión de computación, estudiaremos el rol que la computación tiene en las grandes colaboraciones experimentales de física, y en el día a día del científico, y repasaremos las tendencias tecnológicas actuales, así como los desafíos que se plantean en el futuro próximo.

Finalmente, y como preparación para la sesión práctica, discutiremos los fundamentos y aplicabilidad de un campo en auge en el mundo científico en general: las herramientas y técnicas de aprendizaje automático, y en particular las redes neuronales.

CONTENIDOS:

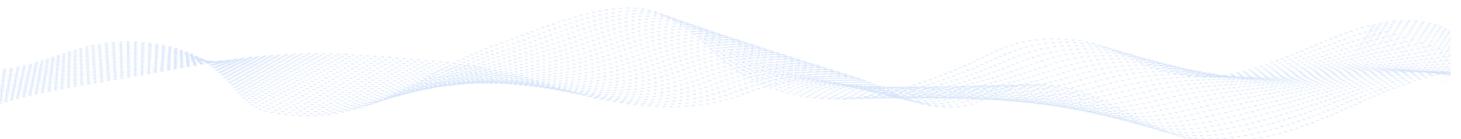
1. El papel de la computación en la ciencia moderna.
 - a. Contexto histórico: la era de los datos.
 - b. Gestión de cantidades masivas de datos en los experimentos de física.
2. La computación para el físico experimental.
 - a. Tecnologías y tendencias.
3. Introducción al entorno de *Jupyter Notebooks* y el ecosistema de *Python*
4. Breve introducción a las redes neuronales y aplicaciones

REFERENCIAS

1. I. J. Taylor, E. Deelman et al, Workflows for e-Science, Springer-Verlag London Limited, 2007.
 2. C. M. Bishop, Pattern recognition and machine learning, Springer, 2006.
 3. The HEP Software Foundation, J. Albrecht, A.A. Alves et al. A Roadmap for HEP Software and Computing R&D for the 2020s. Comput Softw Big Sci 3, 7, Springer, 2019, <https://doi.org/10.1007/s41781-018-0018-8>
 4. The past, present and future of computing in high-energy physics, Physics World, 26 Nov 2019,
- 
- A decorative blue wavy pattern at the bottom of the page, consisting of multiple overlapping, semi-transparent blue lines that create a sense of motion and depth.

<http://physicsworld.com/a/the-past-present-and-future-of-computing-in-high-energy-physics>

5. Machine learning proliferates in particle physics, Symmetry, 8 Jan 2018, <https://www.symmetrymagazine.org/article/machine-learning-proliferates-in-particle-physics>
6. Worldwide LHC Computing Grid, <http://wlcg-public.web.cern.ch/>
7. The Scikit-HEP project, <https://github.com/scikit-hep/scikit-hep>
9. Project Jupyter (Jupyter Notebooks y JupyterLab), <https://jupyter.org/>



CONTENIDOS TEÓRICOS (quarks)

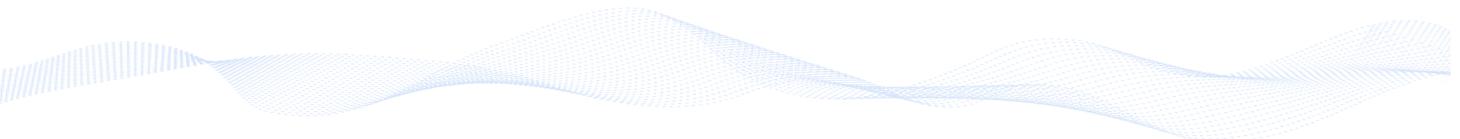
UP: FÍSICA DE COLISIONADORES (I & II)

RESUMEN:

Los colisionadores de partículas son una de las herramientas más potentes para estudiar el mundo de las partículas elementales.

El LHC (Large Hadron Collider) es el más grande y potente acelerador de partículas jamás construido y está ahora mismo en funcionamiento en el CERN (Laboratorio Europeo de Física de Partículas). Es una máquina en la frontera de la energía, que nos permite realizar un amplio espectro de medidas de precisión y búsquedas de nueva física más allá de los límites del modelo estándar. Las colisiones de protones o iones pesados producidas en el LHC se analizan en sus cuatro experimentos principales (ATLAS, CMS, LHCb, ALICE). Uno de los mayores logros del campo en los últimos años fue el descubrimiento del bosón de Higgs en el año 2012 por ATLAS y CMS. El LHC y su extensión a un régimen de alta luminosidad (HL-LHC) continuará funcionando hasta finales de la década de los 30s. Más allá del HL-LHC, la comunidad científica internacional prepara el futuro del campo de la física de colisionadores, evaluando distintas propuestas de nuevas máquinas: nuevos colisionadores $e+e^-$, ep , pp o colisionadores de muones, cada una de ellos con distintas características y ventajas para estudiar el mundo subnuclear.

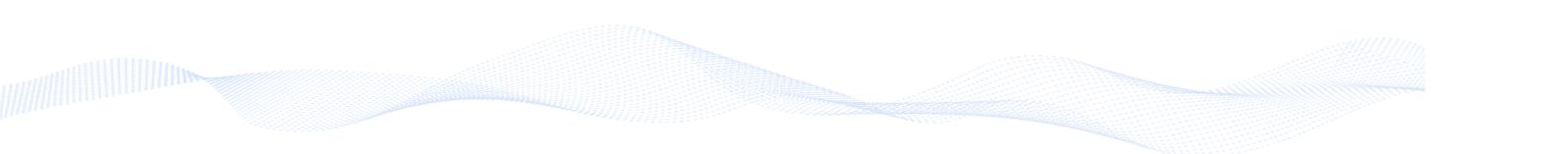
En esta clase presentaremos la historia de los experimentos en colisionadores y como resultaron esenciales para construir y validar el modelo estándar; los fundamentos del estudio de colisiones en el LHC; los últimos resultados experimentales de las distintas áreas estudiadas en el LHC (física electrodébil, cromodinámica cuántica, física del sabor, física del quark top, física del Higgs, búsquedas de nueva física); y también la futura evolución del campo, centrándonos en las diferencias principales entre el estudio de colisiones de leptones y de hadrones.



CONTENIDOS:

1. Introducción a la física en colisionadores
 - a. Breve introducción histórica
 - b. Panorama actual
 2. Entendiendo los datos: del detector al análisis
 3. Física en el LHC
 - a. Midiendo el Modelo Estándar
 - b. Física del Quark Top
 - c. Física del Bosón de Higgs
 - d. Más allá del Modelo Estándar
 - e. Física del Sabor
 - f. Colisiones de Iones Pesados
 4. Futuros proyectos
 - a. Futuros colisionadores e+e- (Higgs Factories)
 - b. Futuros colisionadores de hadrones
 - c. Otras tecnologías
-

REFERENCIAS

1. <https://home.cern/science/physics>
 2. <http://cms.ciemat.es/>
- 
- A decorative blue wavy pattern consisting of many thin, overlapping lines that create a sense of motion and depth, located at the bottom of the page.

DOWN: NEUTRINOS

RESUMEN:

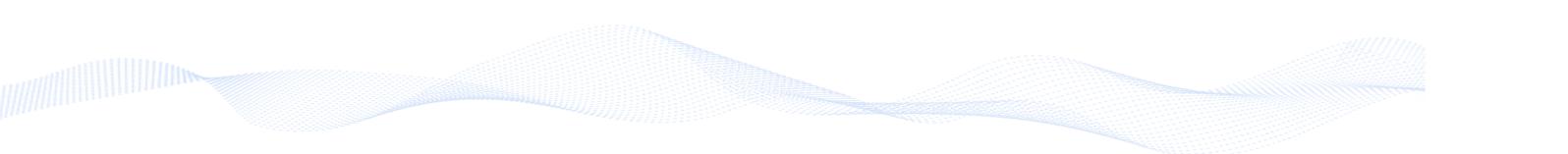
Los neutrinos son las partículas del modelo estándar de las que menos sabemos, a pesar de su abundancia, porque interactúan muy débilmente con la materia. Originalmente propuestas como partículas sin masa, los experimentos de oscilaciones de neutrinos han demostrado que sí tienen masa, aunque todavía no sabemos su valor o cómo se genera.

En esta clase revisaremos el lugar de los neutrinos dentro del modelo estándar, profundizaremos en el fenómeno cuántico de la oscilación de neutrinos (el cambio periódico entre los tipos de neutrinos), y los experimentos que han medido los parámetros que gobiernan las oscilaciones usando neutrinos procedentes del Sol, de reactores nucleares, de la atmósfera y de aceleradores. También discutiremos los experimentos presentes y futuros para medir los parámetros que faltan, así como la masa de los neutrinos, y las conexiones que abre la masa de los neutrinos con la Física más allá del Modelo Estándar. Finalmente estudiaremos el papel de los neutrinos como mensajeros capaces de aportar información de fenómenos astrofísicos y cosmológicos cuando son captados por nuestros detectores.

CONTENIDOS:

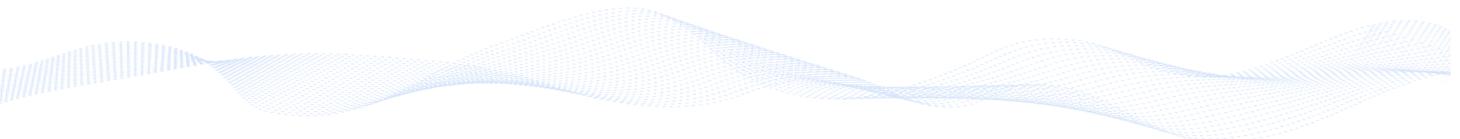
1. Neutrinos en el Modelo Estándar
 2. Oscilaciones de neutrinos
 - a. Teoría
 - b. El ángulo de mezcla θ_{12} y la diferencia de masas Δm_{21}^2
 - c. El ángulo de mezcla θ_{23} y la diferencia de masas Δm_{32}^2
 - d. El ángulo de mezcla θ_{13}
 - e. La fase de violación CP
 3. Neutrinos estériles
 4. Medida directa de la masa del neutrino
 5. Desintegración Doble Beta sin neutrinos
 6. Mensajeros del Universo
-

REFERENCIAS

1. <https://neutrinos.fnal.gov/>
 2. <https://www.symmetrymagazine.org/collection/neutrinos-101>
 3. Sergio Pastor, Los neutrinos, Editorial CSIC y Catarata ISBN: 978-84-00-09863-6
 4. Hitoshi Murayama, The origin of neutrino mass, Physics World, Volume 15, 2002
 5. <http://neutrinos.ciemat.es/>
- 
- A decorative wavy pattern at the bottom of the page, consisting of multiple overlapping, light blue, semi-transparent wave-like lines.



6. <https://www.dunescience.org/>
7. P. A. N. Machado, O. Palamara, D. Schmitz, *The Short-Baseline Neutrino Program at Fermilab*, <https://arxiv.org/abs/1903.04608>
8. <https://sbn.fnal.gov/>



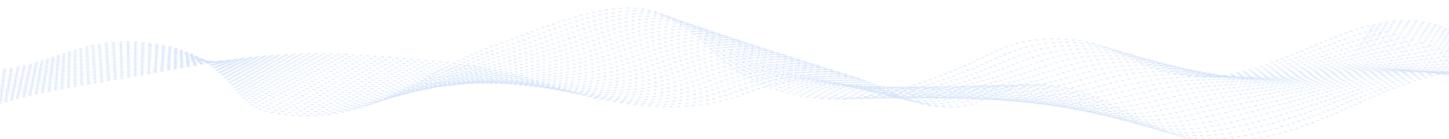
CHARM: RAYOS CÓSMICOS

RESUMEN:

El descubrimiento de los rayos cósmicos (partículas cargadas de alta energía provenientes del espacio exterior) se remonta a principios del siglo pasado. Los rayos cósmicos constituyen las partículas más energéticas del universo, alcanzando una energía de hasta 10^{20} eV. En las últimas décadas, el creciente interés por la física de los rayos cósmicos ha llevado a la puesta en funcionamiento de experimentos recientes (AMS, PAMELA, DAMPE, CALET, PIERRE-AUGER, TA...) que han aportado resultados novedosos y precisos en lo relativo a los mecanismos de origen y propagación en la galaxia, la detección de indirecta de materia oscura, la existencia de antimateria de origen primordial y las fuentes capaces de acelerar partículas a tan alta energía, y han motivado el desarrollo paralelo de nuevos modelos que expliquen estas observaciones. La explicación y discusión de estos experimentos y sus medidas y de estos modelos y su interpretación constituirán el núcleo de la sesión.

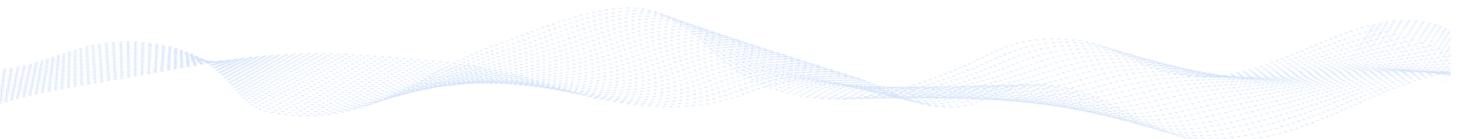
CONTENIDOS:

1. Introducción
 - a. Un poco de historia
 - b. Espectro
 - c. Composición
 - d. Origen
 - e. Detección
 - f. Preguntas abiertas
 2. Rayos cósmicos galácticos
 - a. Espectrómetros y calorímetros
 - b. Protones y núcleos
 - i. Resultados
 - ii. Primarios y secundarios
 - iii. Difusión
 - c. Electrones, positrones y antiprotones
 - i. Resultados
 - ii. Materia oscura
 - iii. Púlsares
 - d. Antinúcleos
 3. Rayos cósmicos extragalácticos
 - a. Detección y cascadas
 - b. Resultados
 4. Perspectivas de futuro
-



REFERENCIAS

1. M.S. Longair, *High Energy Astrophysics*, Cambridge University Press, 2011
2. T. Stanev, *High Energy Cosmic Rays*, Springer, 2010
3. R. Aloisio et al., *Multiple Messengers and Challenges in Astroparticle Physics*, Springer, 2018
4. M. Kachelriess, D.V. Semikoz, *Cosmic Ray Models*. <https://arxiv.org/abs/1904.08160>
5. S. Gabici et al., *The origin of Galactic cosmic rays: challenges to the standard paradigm*. <https://arxiv.org/abs/1903.11584>



CHARM: RAYOS GAMMA

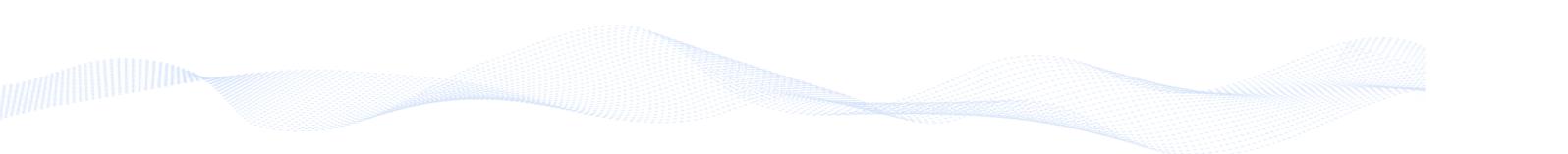
RESUMEN:

Los rayos gamma son los fotones más energéticos del universo. Se producen por mecanismos muy diferentes al resto de fotones que observamos en el cielo y por ello es especialmente interesante la información que nos dan de las fuentes astrofísicas que los emiten, pero también su modo de detección es completamente distinto. En esta sesión hablaremos de los fenómenos que los producen, de cómo los podemos detectar (cascadas electromagnéticas y luz cherenkov), del panorama experimental actual (Fermi, HAWC, HESS, VERITAS, MAGIC...) y futuro (CTA, LHAASO...), de los resultados recientes más relevantes en este rango de energías y del papel del CIEMAT en la astrofísica de rayos gamma.

CONTENIDOS:

1. Introducción
 - a. Historia
 - b. Importancia de los rayos gamma en el marco de la astrofísica
 - c. Mecanismos de producción
 2. Fuentes de rayos gamma
 - a. Galácticas
 - b. Extragalácticas
 3. Panorama experimental
 - a. Detectores espaciales
 - b. Cascadas atmosféricas extensas
 - c. Luz Cherenkov
 - d. Detectores terrestres
 4. Resultados recientes
 5. Papel del CIEMAT en rayos gamma
-

REFERENCIAS

1. <http://cta.ciemat.es/>
 2. J. Hinton, *Astroparticle Physics*, Elsevier, 2013
 3. <https://www.cta-observatory.org/>
- 

STRANGE: MATERIA OSCURA

RESUMEN:

Existen multitud de indicios a todas las escalas astronómicas (de galáctica a cosmológica) que apuntan a la existencia de cinco veces más masa de la que podemos observar. Esta masa, llamada materia oscura, se acumula en torno a galaxias y cúmulos de galaxias y es responsable, con su atracción gravitacional, de la formación de las estructuras observadas en el universo.

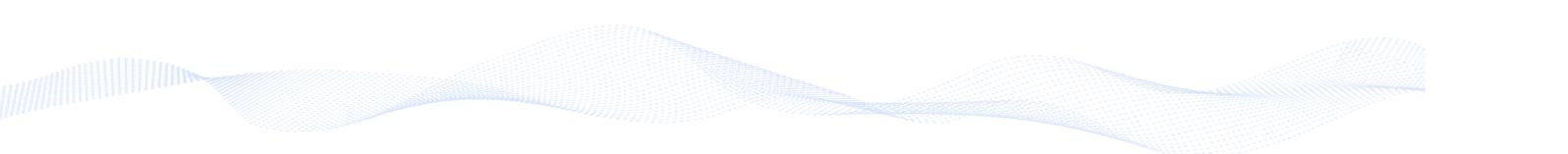
La mayoría de la materia del universo, pues, parece quedarse atrapada en la atracción gravitatoria de galaxias y cúmulos, tener un tiempo de vida mayor que el de la edad actual del universo y no interactuar electromagnéticamente. A grandes rasgos, aquí termina el conocimiento actual sobre la materia oscura.

En esta clase hablaremos de las evidencias observacionales en las que se basa el conocimiento actual, los principales candidatos a formar la materia oscura y las líneas de investigación más importantes para su detección e identificación.

CONTENIDOS:

1. La materia oscura en la física de partículas y en la cosmología
 - a. Primeras evidencias observacionales
 - b. Medidas precisas de su densidad y distribución espacial
2. Candidatos a materia oscura
 - a. Agujeros negros primordiales
 - b. WIMPS
 - c. Axiones y otros candidatos
3. Detección directa de WIMPs
 - a. Panorama observacional presente y futuro:
 - i. *Estado general de la búsqueda directa*
 - ii. *El “problema” de DAMA/LIBRA*
 - b. Detección con TPCs de Ar y Xe líquidos
 - c. El experimento DarkSide

REFERENCIAS

1. <http://darkmatter.ciemat.es/research-output>
- 

TOP: COSMOLOGÍA

RESUMEN:

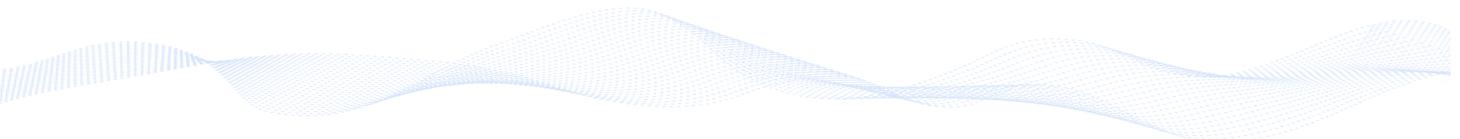
El inicio del siglo XXI ha visto el desarrollo del modelo estándar de la cosmología, Λ CDM. El universo está compuesto de un 70% de *energía oscura*, un 25% de *materia oscura* y un 5% de materia ordinaria. Aunque la naturaleza del sector oscuro todavía es un enigma, esta teoría ha tenido un éxito rotundo en la explicación del cosmos; tanto de la expansión acelerada en el universo tardío como de la formación de la estructura a gran escala.

Durante la sesión, nos introduciremos en los *fundamentos teóricos* de Λ CDM: cuáles son las componentes energéticas que encontramos y cómo, gracias a las ecuaciones de la relatividad general, podemos describir su dinámica y reconstruir la historia del Universo desde el *big bang* hasta hoy. También nos adentraremos en las *bases observacionales* que sustentan la teoría: las medidas de la temperatura del fondo cósmico de microondas que nos permiten imaginar cómo era el universo primitivo o movernos a épocas más tardías, extrayendo información a partir de la distribución de galaxias y de las violentas explosiones de las supernovas la.

Finalmente, describiremos los análisis en los que está involucrado el grupo del Ciemat en los grandes cartografiados de galaxias como el presente *Dark Energy Survey* (DES) o el futuro *Legacy Survey of Space and Time* (LSST), los cuales con sus medidas de las distancias y formas de cientos de millones de galaxias permitirán determinar con una precisión sin precedente los parámetros del modelo estándar.

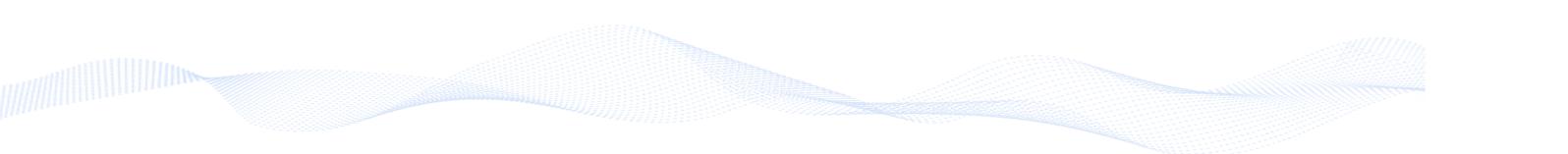
CONTENIDOS:

1. Modelo estándar de la cosmología
 - a. Fundamentos de Λ CDM: principio cosmológico y componentes energéticas.
 - b. Historia del universo: del periodo inflacionario hasta hoy.
 - c. Ecuaciones fundamentales: relatividad general y física estadística.
 - d. Estimando distancias: redshift.
 - e. Formación y evolución de la estructura a gran escala.
2. El Universo como laboratorio
 - a. Tests clásicos: ley de Hubble, nucleosíntesis y abundancias primordiales



- b. El universo temprano: fondo cósmico de microondas (CMB)
 - c. El universo tardío:
 - i. *Supernovas Ia*
 - ii. *Cartografiados de galaxias*: proyectos presentes y futuros y sus principales análisis.
-

REFERENCIAS

1. S. Dodelson. *Modern Cosmology*. Elsevier 2020
 2. P. Schneider. *Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction*. Springer 2015
 3. J. Peacock. *Cosmological Physics*. CUP 2012
 4. Observational Probes of Cosmic Acceleration: <https://arxiv.org/abs/1201.2434>
 5. S. M. Carroll, "The Cosmological Constant", *Living Reviews on Relativity* 4 (2001) article 4, <https://link.springer.com/article/10.12942/lrr-2001-1>
 6. S. Weinberg, "[The Cosmological Constant Problem](#)", *Reviews of Modern Physics*. **61** (1989) 1–23.
- 

BOTTOM: ONDAS GRAVITACIONALES

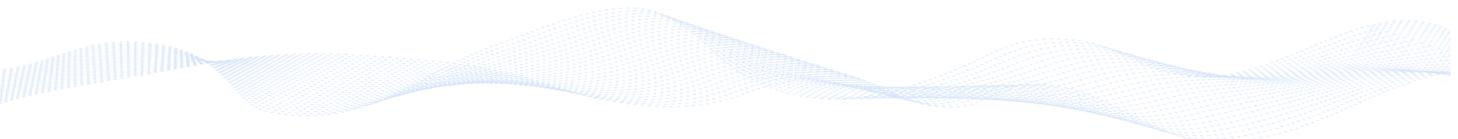
RESUMEN:

Las ondas gravitacionales son perturbaciones en el espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz y son causadas por la aceleración de masas. Fueron predichas por la teoría de la relatividad general de Einstein en 1916, pero no fue hasta 2015 que fueron detectadas directamente por el experimento LIGO. La detección de las ondas gravitacionales ha sido uno de los mayores logros de la física moderna, y ha permitido a los científicos estudiar fenómenos astrofísicos que antes eran inaccesibles, como la colisión de agujeros negros y estrellas de neutrones. Desde su detección inicial en 2015, los experimentos LIGO, Virgo y Kagra (LVK) han detectado varias fusiones de agujeros negros y estrellas de neutrones.

En esta sesión, introduciremos los conceptos básicos de la física de ondas gravitacionales. A continuación describiremos el método de observación de las mismas, los detectores LIGO, Virgo y Kagra, y discutiremos algunos de sus resultados de mayor impacto. Por último, describiremos los detectores de última generación, Einstein Telescope (ET) y Cosmic Explorer (CE), que se empezarán a construir en los próximos años.

CONTENIDOS:

1. Introducción a las ondas gravitacionales:
 - a. Conceptos básicos de relatividad general.
 - b. Ondas gravitacionales.
 2. Detección de ondas gravitacionales:
 - a. Principios de detección.
 - b. Experimentos actuales: LIGO, Virgo y Kagra.
 3. Física de ondas gravitacionales:
 - a. Fusión de agujeros negros.
 - b. Estudios de poblaciones: agujeros negros primordiales.
 - c. Fusión de estrellas de neutrones.
 - d. Astrofísica de multi-mensajeros.
 - e. Determinación del parámetro de Hubble.
 4. El futuro de la detección de ondas gravitacionales:
 - a. Programa de observación de LVK.
 - b. La siguiente generación: ET y CE.
-



REFERENCIAS

1. E. F. Taylor and J. A. Wheeler, *Spacetime Physics: Introduction to Special Relativity*, Editorial WH Freeman (1992). ISBN-10: 0716723271.
2. B. Schutz, *A First Course in General Relativity*, Cambridge University Press (2022). ISBN-10: 1108492673.
3. J. B. Hartle, *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*, Cambridge University Press (2021). ISBN-10: 1316517543.
4. N. D. Mermin, *It's About Time: Understanding Einstein's Relativity*, Princeton University Press (2021). ISBN-10: 0691218773.
5. M. Maggiore, *Gravitational Waves: Volume 1: Theory and Experiments* and Volume 2: Astrophysics and Cosmology, Oxford University Press (2018). ISBN-10: 0198755287.

