

LA FÍSICA FUNDAMENTAL DESDE UNA PERSPECTIVA MULTIDISCIPLINAR: EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN AVANZADA EN FÍSICA FUNDAMENTAL

Jose María del Peso Malagón

Director Centro Investigación Avanzada en Física Fundamental (CIAFF-UAM)

Samuel A. Giuliani

Secretario CIAFF-UAM

RESUMEN

El presente artículo presenta los objetivos, las actividades de investigación científica, y las tareas formativas que se realizan en el Centro de Investigación Avanzada en Física Fundamental de la Universidad Autónoma de Madrid (CIAFF-UAM). El objetivo del CIAFF es fomentar la multidisciplinariedad de distintos grupos del departamento de Física Teórica, sus sinergias con las áreas transversales de Inteligencia Artificial y Microelectrónica, y apoyar la formación de jóvenes investigadores.

1. INTRODUCCIÓN

El Centro de Investigación Avanzada en Física Fundamental de la Universidad Autónoma de Madrid (CIAFF-UAM) se creó el 27 de abril de 2017 para promover la excelencia en las áreas básicas de Física Experimental de Partículas Elementales, Astrofísica y Cosmología y Física Nuclear, así como potenciar sus aspectos multidisciplinarios. Posteriormente se unieron áreas transversales, una de Inteligencia Artificial y otra de Microelectrónica, para facilitar las sinergias y multidisciplinariedad de las áreas básicas, y se añadió la nueva área básica de Tecnologías Cuánticas. De esta manera, el Centro ha podido implicarse en nuevos retos científico-tecnológicos, que implican desarrollo de instrumentación y técnicas computacionales.

En la actualidad el Centro lo componen 29 miembros doctores, la mayoría profesores permanentes, de tres departamentos distintos de la UAM: Física Teórica, Física Aplicada e Ingeniería Informática. También hay 24 estudiantes de doctorado supervisados por miembros doctores del Centro.

Como indicador de la actividad científica, durante 2023 los miembros del Centro han publicado 144 artículos en revistas internacionales de primer nivel y son Investigadores Principales (IP) de 8 proyectos de investigación, actualmente activos, financiados mediante concurrencia competitiva por distintas instituciones regionales, nacionales, europeas e internacionales.

Como indicador de la actividad formativa, durante 2023 se han presentado 4 tesis doctorales dirigidas por miembros del CIAFF-UAM. Además, el personal del Centro participa activamente en la docencia regular tanto de grado como de máster y docencia específica como cursos de doctorado, tutoriales y formación técnica.

2. PROGRAMAS CIENTÍFICOS

En la actualidad existen cinco programas científicos activos: Física Experimental en grandes aceleradores, Física Experimental sin colisionadores, Astrofísica, Física Nuclear y Tecnologías Cuánticas.

2.1. Física Experimental de Partículas

2.1.1. Colisionadores.

El principal foco de este programa es comprender los últimos componentes de la materia y las fuerzas que actúan entre ellos.

Hay un grupo de CIAFF-UAM que contribuye al experimento ATLAS desde sus inicios en 1994. Este experimento es uno multipropósito del colisionador LHC (de las siglas en inglés de Large Hadron Collider). El LHC, circular de unos 27 km de circunferencia, tiene dos modos de funcionamiento: uno en el que se aceleran protones (núcleos de hidrógeno) y otro en el que se aceleran núcleos atómicos grandes. Solo nos concentraremos en el primer modo, que es el que funciona durante la mayor parte del año.

Los protones viajan a una velocidad cercana a la de la luz agrupados en manojos de unos cien mil millones de protones por dos tubos en los que se ha hecho un alto vacío perfecto, por un tubo los manojos viajan en un sentido y por el otro tubo en sentido contrario. La separación entre manojos es de 25 nanosegundos en tiempo, es decir la cuarentava parte de un microsegundo, lo que equivale a unos 7 metros. La trayectoria se controla con campos magnéticos, aprovechando que los protones tienen carga eléctrica, y la aceleración se realiza con imanes superconductores a temperatura inferior a 2 grados Kelvin (menos de 271 grados centígrados bajo cero) hasta alcanzar su energía máxima (7 TeV nominalmente). Un manajo se hace chocar con otro manajo que viene en sentido contrario en los puntos donde hay instalado detectores, en particular en el centro de ATLAS. Las dimensiones de ATLAS son: 46 metros de longitud, 25 metros de diámetro y contiene un centenar de millones de canales de lectura (electrónica) o celdillas. Por cada cruce de dos manojos (cada 25 ns) se producen más de 20 choques protón-protón.

El resultado de cada colisión protón-protón es la creación de partículas en una cantidad que depende del proceso de interacción entre los componentes fundamentales de los protones: quarks y gluones. La energía, dirección y naturaleza de estas partículas se mide con los distintos sub-detectores de ATLAS, que podemos categorizar en tres grandes grupos: detectores centrales de trazas, calorímetros y cámaras de muones. ATLAS ha acumulado alrededor de un Exabyte de datos (mil millones de Gigabytes) que se han analizado con programas de ordenador sofisticados.

Algunos de los miembros de CIAFF-UAM contribuyeron a la construcción del calorímetro electromagnético, para la medida de la energía y dirección de electrones/positrones y fotones. Este calorímetro ha sido una pieza clave para muchos estudios, como, por ejemplo, el descubrimiento de la partícula de Higgs a través de su desintegración en fotones o en electrones/positrones.

En la actualidad el Centro CIAFF-UAM tiene actividades diversas dentro de la colaboración ATLAS, entre las que destacan:

- 1) El análisis de datos para medir la constante de acoplamiento de la fuerza nuclear fuerte, medidas de propiedades de la partícula de Higgs, medidas de secciones eficaces y otros estudios;
- 2) Operación del detector, mantenimiento de la calibración, actividades organizativas;
- 3) Centro de Proceso de Datos (CPD), creado y mantenido por miembros del CIAFF-UAM, con más de 1 Petabyte de datos de ATLAS y casi 1000 cores de CPU para simulaciones y proceso

de datos. Este CPD está integrado en una red internacional de unos 150 centros para el proceso de datos del experimento ATLAS.

El centro CIAFF-UAM también ha participado en el experimento CMS del LHC, con una contribución al trigger de muones.

2.1.2. Neutrinos

El principal foco de esta línea es el estudio de las propiedades de los neutrinos, por ejemplo, la determinación precisa de sus masas. Para cada leptón (electrón, muon o tau) hay un neutrino asociado. Los neutrinos solo interactúan con la materia a través de la fuerza nuclear débil. Por ello, es difícil su detección.

El detector Super-Kamiokande, situado en Hida (Japón), es un tanque con más de 50 mil toneladas de agua pura que está colocado a unos 1000 metros de profundidad para evitar contaminación por rayos cósmicos y que contiene más de doce mil tubos fotomultiplicadores en su interior. Está ideado para la detección de neutrinos a través de la llamada luz Cherenkov. Nada puede ir más rápido que la luz en el vacío. Sin embargo, en un medio, como por ejemplo agua, puede haber partículas que viajen a mayor velocidad que la luz en ese medio, sin violar ninguna ley física.

Las partículas con carga eléctrica que se mueven a mayor velocidad que la luz en un medio, emiten luz Cherenkov. Si un neutrino electrónico que llega al tanque interactúa con el agua produce un electrón. La luz del efecto Cherenkov de estos electrones se detecta y convierte en corriente eléctrica con los fotomultiplicadores. Se pueden detectar tanto neutrinos electrónicos como muónicos. Los neutrinos pueden provenir de varias fuentes, siendo las principales el Sol y la interacción de rayos cósmicos con la atmósfera, o bien generados en el complejo de aceleradores J-PARC para Física Nuclear situado en Tokai (a 180 km de Hida).

El Centro CIAFF-UAM tiene actividades diversas en este experimento:

- 1) Análisis de datos relacionados con oscilaciones de neutrinos muónicos a neutrinos electrónicos, y simetría CP.
- 2) Calibración del detector.
- 3) Futuras mejoras del detector para mejorar su eficacia de detección.
- 4) Diseño y construcción de la siguiente generación de detectores: Hyper-Kamiokande.

2.2. Astrofísica y Cosmología

Las actividades de investigación del Grupo de Astrofísica y Cosmología del CIAFF cubren un amplio espectro, que abarca todas las escalas astronómicas posibles, desde los planetas hasta las mayores estructuras cósmicas del Universo.

2.2.1 Formación estelar y exoplanetas

La formación estelar, los sistemas planetarios y los planetas son eslabones de una misma cadena: el colapso gravitatorio de un fragmento de nube molecular, que da lugar a la formación de estrellas y, a continuación, de discos circumestelares donde se formarán los planetas. Hay varios proyectos en curso relativos a esta cadena evolutiva: i) proto-estrellas y objetos estelares jóvenes; ii) evolución de los discos proto-planetarios hacia discos planetarios; iii) cinturones de Kuiper y luz exozodiacal en estrellas maduras de la vecindad solar; iv) detección y caracterización de planetas similares a la Tierra en estrellas cercanas. La investigación del departamento se desarrolla en el marco de grandes consorcios internacionales (por ejemplo, DUNES y GASPS relacionados con el telescopio espacial Herschel o ARENA).

2.2.2 Astrofísica extra-galáctica

La evolución química de diferentes tipos de sistemas en el universo proporciona firmas clave que nos ayudan a identificar los principales procesos que regulan la transformación de gas en estrellas dentro de las galaxias, una de las cuestiones clave abiertas en la formación y evolución de las galaxias. El subgrupo de astrofísica extra-galáctica estudia estos procesos, tanto desde un punto de vista teórico (es decir, de modelización) como a través de observaciones, ideando nuevas metodologías para la determinación de las abundancias químicas en las poblaciones estelares y el gas interestelar. Actualmente, gran parte del trabajo se centra en la explotación científica de los datos espectroscópicos de campo integral, la «actividad» (emisión de radiación de alta energía) en los núcleos de las galaxias y su conexión con la formación violenta de estrellas. El grupo está muy implicado en varias colaboraciones internacionales como, por ejemplo, AMUSING, HI-KIDS, WEAVE, etc. y contribuye regularmente con herramientas de software abierto para la comunidad científica.

2.2.3 Astrofísica y cosmología computacionales

Nuestro grupo desarrolla simulaciones de estructuras visibles en el Universo a diferentes escalas astronómicas: desde las más grandes - del orden de mil millones de años luz - hasta las más pequeñas, por ejemplo, galaxias como la Vía Láctea o galaxias enanas.

En las escalas más grandes, se tienen en cuenta y se exploran los efectos gravitatorios de los componentes de materia y energía oscuras, así como los efectos 'gasodinámicos'. Estas simulaciones son un laboratorio virtual que sirve para probar y verificar teorías y modelos astrofísicos y cosmológicos; también es una herramienta para diseñar futuras estrategias observacionales e instrumentales.

A escalas más cortas, el grupo estudia la formación de galaxias en un contexto cosmológico, para desarrollar códigos lo más realistas posibles, que incluyan la formación de estrellas, la retroalimentación y modelos sofisticados de enriquecimiento químico. El grupo también ha desarrollado diferentes telescopios software, para tener en cuenta con precisión los efectos del polvo en las SED y las imágenes de galaxias simuladas, entre otros.

El equipo participa en grandes colaboraciones internacionales sobre simulaciones del Universo y algunas de ellas, como las denominadas MultiDark, Jubilee y UNITSIM, siguen siendo las mayores simulaciones del mundo que incluyen simultáneamente gas y materia oscura.

Nuestro grupo lidera además varias colaboraciones internacionales como “The Three Hundred Galaxy Clusters” (<https://www.the300-project.org>) y “Constrained Local Universe Simulations” (<http://www.clues-project.org>).

2.2.4. Física de Astropartículas y Cosmología

Esta línea se ocupa del origen y la composición del Universo y abarca la investigación en física de astropartículas y cosmología. Ambos campos están experimentando una tentadora transformación como consecuencia de los numerosos experimentos en marcha que proporcionan resultados precisos sobre el Universo a sus mayores escalas.

2.3. Física Nuclear

Las líneas de investigación principales del grupo de Física Nuclear del CIAFF es el estudio teórico de las propiedades del núcleo atómico y el rol de las mismas en la producción de elementos pesados en el Universo.

2.3.1. Estructura Nuclear

El núcleo atómico, que contiene la práctica totalidad de la masa de la materia, es un fascinante ejemplo de sistema cuántico a muchos cuerpos. En el núcleo atómico coexisten tres de las cuatro interacciones fundamentales: la interacción fuerte, que liga protones y neutrones dentro del núcleo; la interacción débil, responsable de las desintegraciones beta; y la interacción electromagnética a la base de la repulsión coulombiana entre protones. El balance entre estas interacciones fundamentales da lugar a todos los elementos (y núcleos) conocidos.

La descripción del núcleo atómico representa un gran desafío de la física teórica, ya que el número de protones y neutrones que típicamente componen un núcleo es demasiado grande para poder resolver exactamente la ecuación de Schrödinger, pero demasiado pequeño para poder emplear argumentos basados en la física estadística.

Además, la interacción nuclear que gobierna los nucleones en el núcleo no puede derivarse directamente de la teoría de la cromodinámica cuántica, debido al carácter no perturbativo de esta última a las (bajas) energías relevantes para la física nuclear. Debido a ello, la interacción entre nucleones en el núcleo requiere una modelización basada en interacciones efectivas. Los investigadores del CIAFF trabajan en el desarrollo y la aplicación de modelos y métodos computacionales que permitan describir las propiedades de los núcleos atómicos con creciente precisión y exactitud. Entre estos modelos están los métodos autoconsistentes basados en los funcionales de la energía dependientes de la densidad, la aplicación de algoritmos de machine learning, y la resolución del problema a muchos cuerpos nuclear empleando ordenadores cuánticos.

2.3.2. Astrofísica Nuclear

El objetivo de la astrofísica nuclear es describir los procesos nucleares que ocurren y alimentan los distintos objetos astrofísicos, así como el origen cósmico de los elementos químicos presentes en el Universo.

Hoy en día, sabemos que la mayoría de los elementos ligeros, como el oxígeno y el hierro, se han formado a partir de la fusión de núcleos ligeros en núcleos más pesados en el interior de las estrellas. Sin embargo, la producción de elementos más pesados, como el oro y el uranio, requieren de procesos nucleares y escenarios astrofísicos distintos al de la fusión de elementos ligeros. En particular, la producción de los elementos más pesados que se encuentran en la naturaleza requiere de flujos de neutrones libres que permitan la formación de nuevos elementos a partir de una sucesión de capturas neutrónicas y desintegraciones beta.

Los investigadores del CIAFF estudian cómo las propiedades nucleares afectan la producción de elementos pesados en escenarios astrofísicos como el colapso de dos estrellas de neutrones. El alto flujo de neutrones libres presente en dichos escenarios permite la formación de núcleos exóticos con vidas medias muy cortas, cuya producción y detección en los laboratorios es sumamente difícil. La descripción teórica de las propiedades de dichos núcleos exóticos es, por tanto, fundamental para entender el origen cósmico de los elementos químicos que se encuentran en la naturaleza.

Tanto el cálculo teórico de las propiedades nucleares como la simulación de la producción de elementos pesados en el universo pueden ser tareas muy exigentes desde el punto de vista computacional. Para llevar a cabo los proyectos más demandantes, los investigadores del CIAFF recurren a instalaciones de computación de alto rendimiento y algoritmos de Machine Learning que puedan reducir los tiempos de cálculo sustancialmente.

2.4. Tecnologías Cuánticas

Los ordenadores clásicos utilizan sistemas con dos posibles estados, que llamaremos 0, 1. Los ordenadores cuánticos utilizan sistemas cuánticos donde 0 y 1 son posibles, así como combinaciones lineales de ambos. Los coeficientes son números complejos cuyo módulo cuadrado indica la probabilidad de obtener o bien 0 o bien 1. Al haber infinitamente más estados simultáneos en el cálculo que en la computación clásica, los cálculos se harán mucho más rápido. Por otra parte, la descripción de sistemas cuánticos en Física Atómica o en Física Nuclear, se simularán mucho más rápido con un sistema cuántico que con un sistema clásico binario.

Otra ventaja tecnológica la tendríamos con las comunicaciones. Por ejemplo, en una conversación o en una transacción bancaria entre dos partes a distancia, se podrían preparar estados entrelazados que permitirían discernir si se ha producido una modificación del estado por parte de un espía. Esto mejoraría la seguridad de las redes de comunicación respecto a las tecnologías clásicas binarias. También podrían transferirse estados cuánticos a distancia, lo que se llama teleportación.

Existen también tecnologías cuánticas para la fabricación de dispositivos de medida y mejorar su precisión. Son ejemplos, los relojes atómicos, voltímetros ultraprecisos para mediciones en nanotecnología, mejora de los aparatos de resonancia magnética y mejorar la detección de ondas gravitacionales.

Son tareas actuales donde miembros de CIAFF-UAM están involucrados las simulaciones cuánticas de teoría cuántica de campos en diversos contextos o entornos y el entrelazamiento para tres fotones y comparación con datos experimentales para su explicación.

3. ACTIVIDADES DE FORMACIÓN

Además de la docencia regular en grado y máster que tienen todos los profesores del centro CIAFF-UAM, se dirigen tesis doctorales en todas las líneas de investigación, así como trabajos fin de master y fin de grado, lo que acerca a los estudiantes a la investigación puntera. También se imparten cursos de especialización en diversas áreas a través de cursos de doctorado, así como cursos sobre temas técnicos.

Las infraestructuras del Centro se han utilizado también para formar a jóvenes estudiantes. En particular, el observatorio del tejado del Módulo 15 de la Facultad de Ciencias, con un telescopio de 51 cm. Se usa regularmente en tres asignaturas: Trabajos Fin de Grado y Practicas Externas en Física, y Técnicas Observacionales en Astronomía del Máster de Física Teórica. También se realizan actividades de divulgación científica para el público general como las “Jornadas de Astronomía” en la UAM, las “Noches de puertas abiertas a la observación”, y visitas de colegios y grupos de adultos programadas.

4. CONCLUSIONES

El CIAFF-UAM es un centro de investigación interdisciplinar, cuyo objetivo es fomentar las sinergias entre los grupos de Física Experimental de Partículas Elementales, Astrofísica y Cosmología, Física Nuclear y Tecnologías Cuánticas del Departamento de Física Teórica de la UAM. La colaboración entre estos grupos y la incorporación de las áreas transversales de Inteligencia Artificial y Microelectrónica tiene como objetivo el desafío de nuevos retos científicos-tecnológicos ligados al desarrollo de técnicas experimentales, modelos teóricos y métodos computacionales. Como parte de sus objetivos, el CIAFF se propone formar jóvenes investigadores a través de cursos de doctorado y de especialización, y acercar los estudiantes a la investigación puntera a través de eventos de divulgación.