

Nodos de la Física

Descripción de la estructura, objetivos y actividades de los centros de acción científica, públicos y privados, más significativos en España que, con una notable participación de físicos, realizan investigación científica o técnica y docencia avanzada

Sobre IFT

Por José L. Fernández Barbón, Susana Hernández y Ángel M. Uranga

El Instituto de Física Teórica (IFT) UAM-CSIC fue creado oficialmente en 2003 como un centro mixto perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y a la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). Su creación culminó la unión de varios equipos de investigación consolidados pertenecientes a la UAM y al CSIC que mantenían anteriores colaboraciones estables. La combinación de expertos en diversas líneas de investigación y las sinergias generadas propiciaron la creación de un centro que ha alcanzado la excelencia y el reconocimiento a nivel internacional.

El IFT es el único centro español dedicado íntegramente a la investigación en Física Teórica. El objetivo del IFT es desarrollar investigación de excelencia en la frontera de la Física, desde lo infinitamente pequeño a lo infinitamente grande, y desde los primeros instantes del Universo hasta su destino último. En el IFT se trabaja en los campos de la Física de Partículas Elementales, Astropartículas y Cosmología, con el objetivo de entender las claves fundamentales de la Naturaleza y del Universo. Esto incluye áreas tan fascinantes como las propiedades del bosón de Higgs, las oscilaciones de neutrinos, la supersimetría, los agujeros negros, la teoría de cuerdas, la inflación cósmica en el origen del Universo, la materia oscura y energía oscura del Cosmos, el entrelazamiento cuántico y nuevos estados cuánticos de la materia.

Además de las actividades de investigación, el IFT realiza una intensa tarea de formación de jóvenes investigadores a nivel internacional a través de un reconocido programa de formación de postgrado en Física Teórica, con Mención de Excelencia del Campus de Excelencia Internacional UAM+CSIC y del Ministerio de Educación desde 2009, y de la incorporación de investigadores postdoctorales. Asimismo, el IFT lleva



Fig. 1. Instalaciones del IFT en el campus de la Universidad Autónoma de Madrid



Fig. 2. El IFT organiza múltiples congresos internacionales, con asistencia de figuras internacionales, como los premios Nobel M. Veltman, S. Glashow y D. Gross en la conferencia inaugural 2011 (Gorka Lejarcegi/*El País*).

a cabo una gran labor de transferencia de conocimiento a la sociedad, a través de ciclos de conferencias, coloquios de divulgación, y una pionera difusión de vídeos de divulgación científica de alto impacto en plataformas digitales.

El IFT se ubica en un moderno edificio (Figura 1) inaugurado en 2011, en el campus de la Universidad Autónoma de Madrid en Cantoblanco (Madrid). Las instalaciones incluyen un auditorio de gran capacidad, varias salas de seminarios y diversas aulas de menor tamaño para docencia y discusiones científicas. Este conjunto permite albergar un elevado número de congresos internacionales, escuelas y programas de investigación, y de organizar un nutrido programa de visitantes de alto nivel internacional (Figura 2). En el mismo edificio (Centro de Física Teórica y Matemáticas) y conjuntamente con el Instituto de Ciencias Matemáticas, el IFT cuenta con la amplia biblioteca Jorge Juan y un centro de procesamiento de datos, que alberga diversos equipos de computación científica de altas prestaciones, fundamentales en algunas líneas de investigación del IFT.

El IFT acoge aproximadamente a un centenar de investigadores: 25 miembros permanentes, 4 investigadores tenure-track, aproximadamente 20 investigadores postdoctorales y 50 investigadores predoctorales. Se trata de un centro eminentemente internacional, con más de un 40 % de investigadores extranjeros (un 90 % en el caso de investigadores postdoctorales), que cada año alberga una docena de congresos internacionales y varios cientos de visitantes y participantes extranjeros. El IFT forma parte de la línea estratégica "Física Teórica y Matemáticas" del Campus de Excelencia Internacional (CEI) UAM+CSIC establecido en 2009. Desde 2012, está acreditado como Centro de Excelencia Severo Ochoa. Los investigadores del IFT lideran numerosos proyectos de investigación en el ámbito tanto nacional como

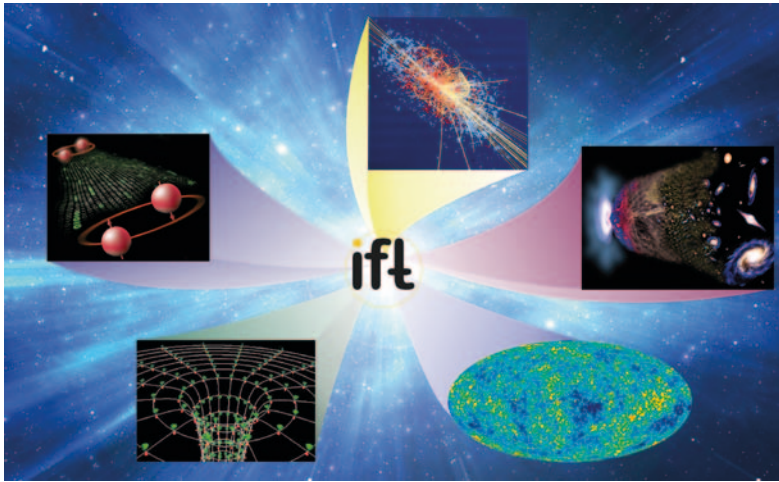


Fig. 3. Los campos de investigación del IFT abarcan la Física de Partículas, las Astropartículas y la Cosmología.

internacional, incluyendo la coordinación de redes nacionales Consolider, redes europeas ITN y RISE, y varios proyectos del Consejo Europeo de Investigación (ERC, de sus siglas en inglés), dos de ellas en la modalidad avanzada (AdG) y dos en modalidad de incorporación (CIG). Varios investigadores del IFT participan en las más prestigiosas asociaciones y comités internacionales, como la Academia de Europa, el Comité Asesor Internacional del CERN, el panel de Altas Energías de la Sociedad Europea de Física (HEP-EPS), así como en los grupos teóricos de colaboraciones experimentales de frontera como DES, BOSS, SDSS, DESI, PAU, T2HK y DUNE.

Ejes de investigación

El IFT es un centro de investigación básica enfocado a explorar las fronteras de nuestro conocimiento fundamental de la naturaleza. Su organización está adaptada al carácter único de esta investigación. En el umbral del siglo XXI, existen tres fronteras que limitan nuestro conocimiento de las leyes fundamentales de la Naturaleza: lo infinitamente pequeño, lo infinitamente grande, y la frontera de la complejidad.

- La frontera de lo infinitamente pequeño es el régimen de la Física de Partículas de altas energías, que se centra en el comportamiento de los constituyentes más pequeños de la materia, y las interacciones fundamentales entre ellas.
- La frontera de lo infinitamente grande corresponde al campo de la Cosmología, que explora las propiedades del Universo considerado como un todo, abarcando desde su origen primordial, su evolución en el tiempo y su composición actual, hasta su destino último.
- La frontera de la complejidad se refiere a los fenómenos emergentes. Este campo abarca de forma transversal múltiples áreas del conocimiento humano, como la biología o las ciencias sociales, pero tiene manifestaciones específicas en la Física Fundamental. Éstas surgen en el comportamiento de partículas y fuerzas en condiciones extremas, en las que las correlaciones cuánticas colectivas generan nuevos fenómenos dinámicos, que posiblemente podrían proporcionar nuevas claves sobre la naturaleza fundamental del espacio y el tiempo.

A pesar de la aparente disparidad, estas tres fronteras del conocimiento se funden en el comienzo del Universo, remitiéndonos continuamente al origen del Cosmos y sus leyes. La interrelación entre estos campos de investigación convierte al IFT en un crisol de conocimiento compartido de diversas áreas en continua interacción. Esto determina en gran medida la dinámica cotidiana del IFT, que se basa en el fomento de la discusión científica informal y la colaboración, catalizada con la organización de actividades internas, como cafés científicos y foros de discusión, y con participación externa, como seminarios, congresos y visitas científicas de alto nivel.

El IFT se organiza en cuatro líneas de investigación que encajan con una o varias de estas fronteras, y que se focalizan en retos concretos del actual momento histórico en el campo de la Física Fundamental: (i) el origen de la masa; (ii) el origen y composición del universo; (iii) teoría de cuerdas y gravedad cuántica; (iv) sistemas fuertemente cuánticos.

El origen de la masa: El Modelo Estándar de partículas elementales y más allá

La pregunta fundamental en este área de investigación es la explicación teórica de las masas de las partículas elementales. La cuestión del origen de la masa es claramente fundamental y clave en nuestra comprensión de la Física de Partículas, que gira alrededor de los conceptos de la ruptura espontánea de la simetría electrodébil mediante el campo de Higgs. Las investigaciones del IFT se centran en el estudio de las propiedades del bosón de Higgs, descubierto en el laboratorio CERN en Ginebra (Suiza) en 2012, en el Modelo Estándar de partículas elementales, y en extensiones del

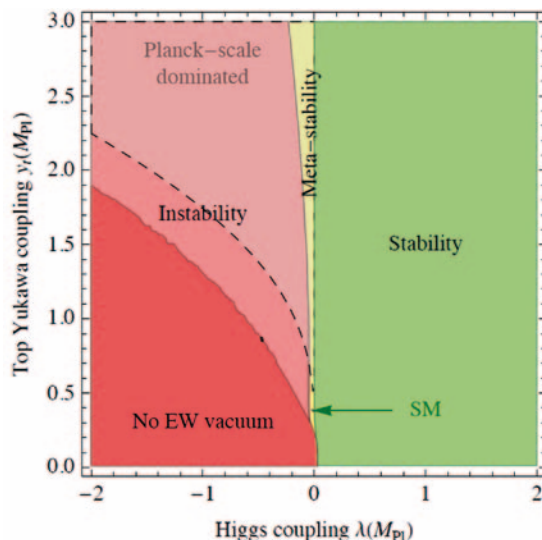


Fig. 4. Estudio del rango de estabilidad del vacío en términos de las masas del bosón de Higgs y del quark top [1].

mismo, basadas en las ideas de supersimetría o de modelos compuestos en acoplamiento fuerte. Algunos de nuestros resultados recientes en este campo incluyen por ejemplo la determinación de las condiciones bajo las cuales el vacío puede ser inestable [1] (Figura 4), o las propiedades generales de una hipotética estructura interna en la partícula de Higgs [2]. El papel que juegan los neutrinos en este esquema es otro de los clásicos problemas teóricos de la física de partículas, cuyas implicaciones podrían incluso explicar el misterio de la asimetría entre materia y antimateria en el Universo [3].

En los próximos años, los desarrollos más activos del campo estarán dominados por el estudio del bosón de Higgs y sus interacciones, y por la determinación de los parámetros del sector de los neutrinos. Una fracción importante del trabajo teórico en este área está por tanto directamente relacionado con los resultados de la segunda fase del LHC en el CERN, y con futuros experimentos de neutrinos. El IFT mantiene contacto directo con estas instalaciones, especialmente a través de colaboraciones con el grupo de Teoría del CERN, de la coordinación de las redes europeas RISE Invisibles Plus y ITN Elusives en el campo de la Física de neutrinos, y de la participación en los grupos teóricos de experimentos de neutrinos como TH2K y DUNE.

El origen y la composición del Universo: Física de Astropartículas y Cosmología

Este área de investigación gira alrededor del tremendo desarrollo de las técnicas de observación del Universo en las últimas décadas, con un enorme caudal de datos experimentales de precisión sobre su naturaleza y propiedades, desde la Astrofísica hasta las más profundas cuestiones sobre la naturaleza del espacio y el tiempo. La investigación del IFT se centra en el estudio de la época primigenia, cercana al origen del Universo, y en el estudio teórico de su evolución y su composición actual; especialmente en la naturaleza y propiedades de la materia oscura y la energía oscura, que conjuntamente forman el 95 % de la densidad de energía del Universo. Todos estos estudios son sinérgicos con la investigación de Física de Partículas más allá del Modelo Estándar mencionada anteriormente.

El estudio de las condiciones reinantes en las épocas más remotas, cercanas al Big Bang, está dominado en las últimas décadas por la hipótesis de la inflación cósmica. El IFT se distingue por albergar grandes expertos en la construcción de modelos de inflación fundamentados en física microscópica de partículas elementales o teoría de cuerdas. Recientemente, el resultado no confirmado del observatorio BICEP ha propiciado un gran interés en la construcción de modelos basados en física de muy alta energía, cercana a la escala de Planck [4].

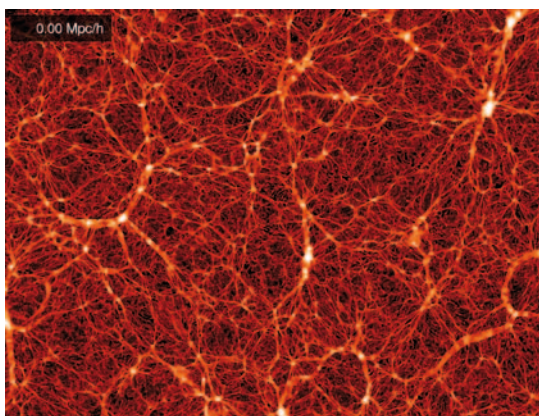


Fig. 5. Simulación por ordenador de la distribución de materia oscura en el Universo en estructuras a gran escala.

El problema de la elucidación de la materia oscura en el Universo es una de las prioridades del IFT (Figura 5), ya sea en la elaboración de modelos teóricos [5, 6], como en la comparación con los resultados de búsquedas directas o indirectas, como por ejemplo excesos de emisiones de rayos gamma en el centro de la Vía Láctea [7] o la distribución detallada de materia en halos galácticos [8].

En los próximos años, se espera un continuo flujo de datos observacionales en este campo, con una gran oportunidad asociada a las nuevas ventanas al Universo abiertas por la espectacular reciente detección de ondas gravitacionales emitidas por la colisión de agujeros negros. El IFT coordina el proyecto Consolider Multidark, la mayor red española (con participación internacional) de grupos de investigación en materia oscura. Además, varios miembros del IFT pertenecen a los grupos de teoría de experimentos actuales y futuros en los campos de materia oscura (como super-CDMS y Fermi-LAT) y de energía oscura (como DES, BOSS, SDSS, DESI, PAU, Euclid).

Sistemas fuertemente cuánticos: Teorías en el retículo, información cuántica y materia condensada

La frontera de la complejidad se manifiesta en la Física Fundamental esencialmente en el estudio de sistemas cuya dinámica es radicalmente cuántica. Esto se produce bien porque la dinámica del vacío incluye interacciones intensas, como en la Cromodinámica Cuántica (QCD, por sus siglas en inglés) que describe las interacciones fuertes entre quarks y gluones, o bien por la existencia de

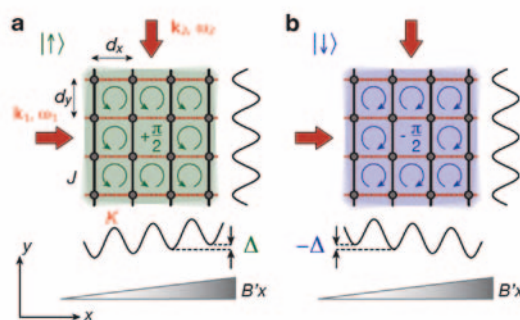


Fig. 6. Representación de la red óptica para la simulación del hamiltoniano de Hofstadter [11].

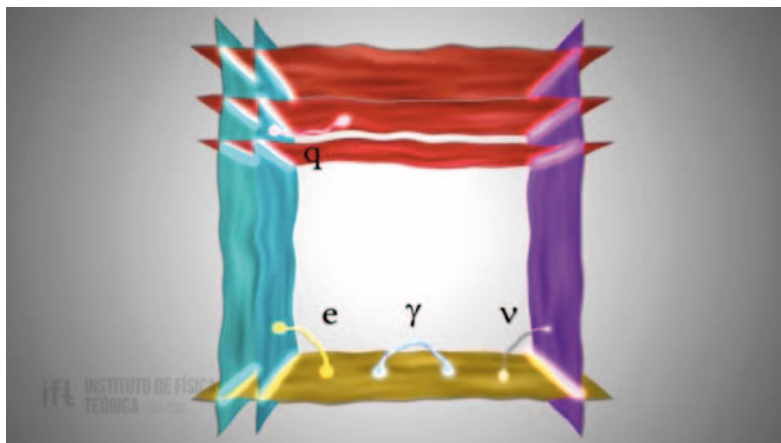


Fig. 7. Configuraciones de defectos topológicos (D-branas) en teoría de cuerdas que reproducen el contenido del Modelo Estándar de partículas elementales.

correlaciones cuánticas de gran alcance incluso en sistemas con muchas partículas, como en determinados ámbitos en Física de la Materia Condensada. El común denominador es la exploración de la Teoría Cuántica de Campos en sus extremos, usando aproximaciones multidisciplinarias de física estadística, materia condensada, redes ópticas, grupo de renormalización, simetría conforme, y más recientemente dualidades holográficas con sistemas gravitacionales.

El IFT siempre ha desarrollado una labor importante en el estudio de QCD, tanto a nivel matemático como en el desarrollo de códigos numéricos dedicados. Este trabajo es esencial en la comparación con resultados experimentales de física de quarks pesados, una de las posibles ventanas a nueva física más allá del modelo estándar [9, 10].

En el campo de los fenómenos colectivos en materia condensada y computación cuántica, el IFT es competitivo a nivel internacional en el diseño teórico de simuladores cuánticos, conjuntos de átomos fríos en redes ópticas de láser que simulan la dinámica de sistemas de materia condensada, con posibles aplicaciones a información cuántica [11] (Figura 6).

Fig. 8. La formación de jóvenes investigadores de Máster y Doctorado en Física Teórica es una faceta vital en el IFT.



En sistemas en los que los métodos analíticos o la simulación numérica son poco eficientes, como en sistemas fuertemente acoplados y en evolución temporal, el IFT ha desarrollado una intensa actividad con grandes resultados utilizando las dualidades holográficas con sistemas gravitacionales. Existen líneas establecidas de trabajo que analizan la dinámica de la termalización en plasmas con interacciones fuertes, el cálculo de entrelazamiento cuántico y fenómenos de transporte en materiales exóticos como semimetales y aislantes topológicos [12].

La relación sinérgica entre el estudio de sistemas fuertemente cuánticos con otras líneas de investigación, especialmente los sistemas gravitacionales mediante las dualidades holográficas, permiten visualizar nuevos niveles de comprensión de problemas como el confinamiento de los quarks, los superconductores de alta temperatura, y el desarrollo de ideas clave en Computación Cuántica.

Teoría de cuerdas y gravedad cuántica

Este área de investigación explora las leyes fundamentales en situaciones en las que la naturaleza cuántica de la gravedad es relevante. La unificación de la materia y el espacio-tiempo se ha convertido en una posibilidad al alcance de la Física del siglo XXI, de la mano del desarrollo de la teoría de cuerdas en las últimas décadas, que ha cristalizado en la propuesta de dualidades holográficas entre sistemas que relacionan soluciones gravitacionales de tipo agujero negro con sistemas de muchas partículas en acoplamiento fuerte. Se trata de una exploración especulativa y abierta, pero directamente imbricada con los campos anteriores, y con el potencial de cambiar de forma drástica nuestra concepción del Universo.

La actividad del IFT se centra principalmente en la propuesta de modelos de Física de Partículas en teoría de cuerdas, en el estudio de agujeros negros y su dinámica a nivel cuántico, y en la aplicación de dualidades holográficas a sistemas en acoplamiento fuerte, ya descritos en el apartado anterior.

Además de sus aplicaciones a Cosmología, el IFT es pionero en la teoría de cuerdas aplicada a Física de Partículas [13], especialmente en términos de los solitones no perturbativos denominados D-branas (Figura 7), y sus generalizaciones en teoría F. Estos modelos permiten el estudio de mecanismos de ruptura de supersimetría y el cálculo del espectro de partículas supersimétricas para su posible confrontación con resultados experimentales futuros del LHC [14].

En cuestiones más teóricas, relacionadas con la naturaleza cuántica de la gravitación, el IFT tiene abiertas potentes líneas de investigación en fundamentos de la holografía [15], teoría de agujeros negros supersimétricos [16], y nuevos modelos de agujeros negros cuánticos, en términos de conden-

sados de Bose-Einstein de gravitones en régimen de criticalidad cuántica [17].

El grupo del IFT disfruta de dos proyectos ERC en la modalidad Avanzada en este campo. Asimismo, este área de investigación está en contacto directo con los principales grupos a nivel mundial, a través de colaboraciones o del establecimiento de redes europeas, como la red COST “The String theory Universe”, en el que coordina el grupo de trabajo sobre Física de Partículas en teoría de cuerdas.

Formación

Además de las actividades investigadoras, una de las misiones fundamentales del IFT es la formación de jóvenes investigadores (Figura 8), reflejado en el elevado porcentaje del 75 % de miembros en fase predoctoral o postdoctoral de sus carreras. La labor se inicia en la supervisión por miembros del IFT de trabajos de fin de grado de estudiantes de la Universidad Autónoma de Madrid. A un nivel de iniciación a la investigación, el IFT participa en el programa de posgrado de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid, cuyas clases se imparten en las instalaciones del centro. Incluye el programa de Máster, reconocido de Excelencia Internacional desde 2009, y el de Doctorado. El posgrado en el IFT es líder a nivel nacional y competitivo a nivel internacional, con aproximadamente un 20 % de estudiantes de intercambio ERASMUS en el máster y un 50 % de estudiantes de doctorado extranjeros. La atracción de talento internacional se manifiesta también en la formación postdoctoral, con un 90 % de investigadores extranjeros, principalmente de países del entorno europeo, Latinoamérica y Asia, y cofinanciada con entidades privadas como la Fundación La Caixa.

Los estudiantes de doctorado se integran como auténticos miembros del IFT y disfrutan de un activo programa de cursos, seminarios, foros de discusión y congresos, así como la posibilidad de completar su formación en escuelas y congresos en el extranjero. La investigación de su tesis doctoral se realiza en contacto directo y colaboración con el investigador responsable, en temas de la mayor actualidad científica en su campo de investigación. Los investigadores formados en el IFT se incluyen en la asociación IFT Alumni, colectivo que incluye más de 100 miembros, que reciben información sobre las actividades del IFT e invitaciones a sus diversos actos científicos y sociales.

La formación en el IFT garantiza una cualificación de excelencia, y posibilita la incorporación de los jóvenes formados al mercado laboral y a puestos postdoctorales en instituciones líderes en Europa, EE. UU., o en compañías punteras fuera del ámbito académico, en campos como el desarrollo de software, la tecnología, o las finanzas (Figura 9).

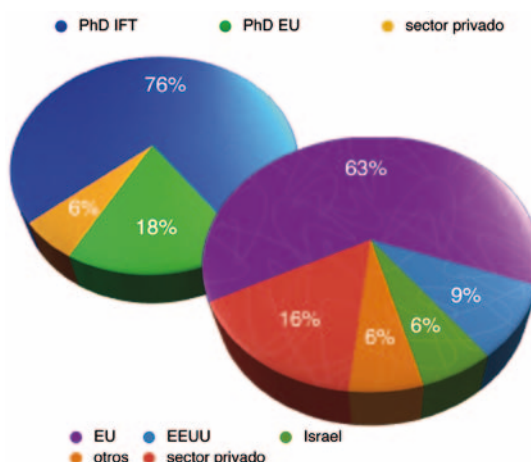


Fig. 9. Distribución de destino de estudiantes de Máster (izquierda) y de Doctorado (derecha) del IFT, en un muestreo del periodo 2012-2016.

Transferencia de conocimiento y divulgación

La misión del IFT se completa con su actividad de transferencia de conocimiento a la sociedad, fundamentalmente a través de la divulgación científica, ámbito en el que colabora con reconocidas instituciones a nivel nacional e internacional (Figura 10).

El IFT colabora con el Grupo Internacional de Divulgación en Física de Partículas (International Particle Physics Outreach Group) en la organización del Taller Interactivo en Física de Partículas. Esta actividad acoge estudiantes de Bachillerato que visitan el IFT durante una jornada para experimentar de primera mano la actividad de un centro de investigación.

En 2014 el IFT colaboró con el CERN y la Fundación Príncipe de Asturias organizando el evento CERNland National Award Ceremony, de entrega de premios a los alumnos finalistas del concurso CERNland. El evento contó con la participación de Luciano Maiani, ex-Director General y Profesor Distinguido Severo Ochoa IFT. En 2015 el IFT colaboró con el Museo Thyssen-Bornemisza con varias actividades explorando las relaciones Arte-Ciencia. Incluyó la exhibición especial “Invisibles-Thyssen” de obras seleccionadas para ilustrar conceptos de interés científico, y sesiones de conferencias y mesas redondas con renombrados científicos y expertos en arte. Finalmente, el IFT celebra la Semana de la Ciencia de Madrid con la organización de ciclos de conferencias para un concurrido público, en colaboración con el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología, y con la Residencia de Estudiantes CSIC.

El sector de la enseñanza secundaria es de alto interés para el IFT por su papel en la formación de futuras generaciones de científicos. Por ello, el IFT colabora con la Comunidad de Madrid impartiendo cursos de física moderna en el programa de mejora de la calidad de la enseñanza. Asimismo, y en colaboración con el Centro Nacional de Física de Partículas, Astropartículas y Nuclear (CPAN), mantiene un exitoso programa de charlas de miembros del IFT en centros de enseñanza secundaria del área geográfica de Madrid, con más de 40 charlas anuales.



Fig. 10. Actividades de divulgación del IFT.

Finalmente, una actividad pionera y de gran impacto del IFT es la elaboración de vídeos divulgativos y su difusión en Youtube, incluyendo una exitosa serie de vídeos de animación en colaboración con el exitoso canal QuantumFracture. El canal Youtube del IFT cuenta con un elevado número de suscriptores y visualizaciones sin parangón en otras instituciones nacionales o internacionales (más de 150.000 suscriptores y 3.500.000 visualizaciones). Sus estadísticas de visualización son marcadamente internacionales, con un gran impacto en Latinoamérica.

El IFT se encuentra en la vanguardia de la fascinante aventura del conocimiento de la Naturaleza en su nivel más fundamental, que abre a la nueva generación de jóvenes investigadores, y de la que hace partícipe a la sociedad en general.

Referencias

[1] D. BUTTAZZO, G. DEGRASSI, P. P. GIARDINO, G. F. GIUDICE, F. SALA, A. SALVIO y A. STRUMIA, "Investigating the near-criticality of the Higgs boson", *JHEP* 1312 (2013) 089.

[2] R. ALONSO, M. B. GAVELA, L. MERLO, S. RIGOLIN y J. YEPES, "The Effective Chiral Lagrangian for a Light Dynamical 'Higgs particle'", *Phys.Lett.* B722 (2013) 330-335.

[3] M. C. GONZÁLEZ-GARCÍA, M. MALTONI, J. SALVADO y T. SCHWETZ, "Global fit to three neutrino mixing: critical look at present precision", *JHEP* 1212 (2012) 123.

[4] F. MARCHESANO, G. SHIU y A. M. URANGA, "F-term Axion Monodromy Inflation", *JHEP* 1409 (2014) 184.

[5] C. STREGE, G. BERTONE, D.G. CERDEÑO, M. FORNESA, R. RUIZ DE AUSTRI y R. TROTTA, "Updated global fits of the cMSSM including the latest LHC SUSY and Higgs searches and XENON100 data", *JCAP* 1203 (2012) 030.

[6] D. G. CERDEÑO, M. PEIRÓ y S. ROBLES, "Low-mass right-handed sneutrino dark matter: SuperCDMS and LUX constraints and the Galactic Center gamma-ray excess", *JCAP* 1408 (2014) 005.

[7] S. CLESSE y J. GARCÍA-BELLIDO, "The clustering of massive Primordial Black Holes as Dark Matter: measuring their mass distributions with Advanced LIGO", *Phys.Dark Univ.* 10 (2016) 002.

[8] F. PRADA, A. A. KLYPIN, A. J. CUESTA, J.E. BETANCORT-RIJO y J. PRIMACK, Halo concentrations in the standard Λ CDM cosmology, *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* 423 (2012) 3018-3030. F. IOCCO, M. PATO y G. BERTONE, "Evidence for dark matter in the inner Milky Way", *Nature Phys.* 11 (2015) 245-248.

[9] C. PENA (DEL IFT) *et al.* (28 autores), "Review of lattice results concerning low-energy particle physics", *Eur.Phys.J.* C74 (2014) 2890.

[10] P. DIMOPOULOS, R. FREZZOTTI, G. HERDOIZA, V. LUBICZ, C. MICHAEL, D. PALAO, G. C. ROSSI, F. SANFILIPPO, A. SHINDLER, S. SIMULA, C. TARANTINO y M. WAGNER (colaboración ETM), "Lattice QCD determination of m_b , f_B and f_{B_s} with twisted mass Wilson fermions", *JHEP* 1201 (2012) 046.

[11] M. AIDELSBURGER, M. ATALA, M. LOHSE, J. T. BARREIRO, B. PAREDES y I. BLOCH, "Realization of the Hofstadter Hamiltonian with ultracold atoms in optical lattices", *Physical Review Letters* 111, 185301 (2013).

[12] A. CORTIJO, Y. FERREIROS, K. LANDSTEINER y M. A. H. VOZMEDIANO, "Elastic Gauge Fields in Weyl Semimetals", *Phys.Rev.Lett.* 115 (2015) n.º 17, 177202. K. LANDSTEINER, Y. LIU y Y.-W. SUN, "Quantum phase transition between a topological and a trivial semimetal from holography", *Phys.Rev.Lett.* 116 (2016) no.8, 081602. K. LANDSTEINER, Y. LIU y Y.-W. SUN, "Odd viscosity in the quantum critical region of a holographic Weyl semimetal", *Phys.Rev.Lett.* 117 (2016) n.º 8, 081604.

[13] L. E. IBÁÑEZ y A. M. URANGA, *String theory and particle physics: an introduction to string phenomenology* (Cambridge University Press, 2012).

[14] L. APARICIO, D. G. CERDEÑO y L. E. IBÁÑEZ, "Modulus-dominated SUSY-breaking soft terms in F-theory and their test at LHC", *JHEP* 0807 (2008) 099.

[15] N. BEISERT, R. HERNÁNDEZ y E. LÓPEZ, "A Crossing-symmetric phase for AdS₅×S⁵ strings", *JHEP* 0611 (2006) 070.

[16] T. ORTÍN, *Gravity and strings* (Cambridge Univ. Press, 2014 [1.ª edición] y 2015 [2.ª edición]).

[17] G. DVALI y C. GÓMEZ, "Black Hole's Quantum N-portrait", *Fortsch.Phys.* 61 (2013) 742-767.