

LA FUSIÓN NUCLEAR POR CONFINAMIENTO INERCIAL Y LA INVESTIGACIÓN EN EL INSTITUTO DE FUSIÓN NUCLEAR

La investigación en la fusión nuclear por confinamiento inercial (FCI) sigue avanzando. Ciertamente que algunos resultados de la *National Ignition Facility* (NIF) no han sido lo definitivos que se podía esperar, pero la crítica exhaustiva que se ha realizado sobre sus causas, así como la consolidación de otras opciones que estaban a un nivel más bajo de desarrollo, ha abierto nuevas vías para obtener el objetivo final de la energía útil. El número de instalaciones ha crecido en los últimos años y los experimentos cuidadosos, y refrendados por simulaciones más detalladas, llevan a un optimismo moderado y expectante. La investigación en la tecnología continúa con contribuciones en colaboración internacional tanto en láseres, fabricación de blancos, materiales y diagnóstico. El Instituto de Fusión Nuclear "Guillermo Velarde" mantiene una intensa actividad en diversas áreas de FCI que aquí se describen, apuntando paralelamente a sacar beneficio de esta investigación en otros temas científicos que van desde la astrofísica y alta densidad de energía, la nanoplasmónica/nanotecnología, materiales en condiciones extremas, fuentes intensas de radiación, transporte de neutrones y seguridad y otras.

INTRODUCCIÓN

La investigación en la fusión nuclear por confinamiento inercial (FCI) sigue sin pausa, con sus avatares, su desarrollo en diversos laboratorios en el mundo en ocasiones muy dependientes de los resultados que las grandes instalaciones experimentales producen de manera continua. La repercusión de los resultados de la *National Ignition Facility* (NIF) en el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL, EE.UU.) ha llevado a lo que se podría entender como una ralentización de la investigación. Nada más lejos de la realidad; el proceso de desarrollo ha pasado a ser mucho más fiable, cauto y esperanzador con nuevas instalaciones y propuestas: conexión europeo-americana en el láser Omega de LLE Rochester, el lanzamiento del LMJ-Petal en Burdeos, el uso del propio Laser Magajoule (LMJ), la construcción de instalaciones en el megajulio de energía en Rusia y China, la investigación en el Gekko-XII del Institute of Laser Engineering (ILE) en Osaka, la aparición de concep-

tos de implosión como ignición por choque (*shock Ignition*), *Magnetized Liner Inertial Fusion*, y la continuación de la Ignición rápida y los blancos directos de alta ganancia.

Por otra parte después de la iniciativa europea del proyecto Esfri Hiper, donde se llevó a cabo un desarrollo integral de la planta de potencia con un diseño de reactor y sus componentes, se continúa activamente con la investigación en la comprensión de la física hacia tecnologías avanzadas en la composición de la primera pared, la envoltura, las ópticas, todo en el contexto internacional y bajo el paraguas de programas nacionales y europeos.

El Instituto Fusión Nuclear-Guillermo Velarde / Universidad Politécnica de Madrid que agrupa profesores de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) y la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) tiene un papel protagonista en el desarrollo de la fusión por confinamiento inercial en Europa. Instituto que consta en este momento con

J. MANUEL PERLADO¹,
M. COTELO¹,
E. DEL RÍO¹,
R. GONZÁLEZ-ARRABAL¹,
F. OGANDO^{1,2},
E. OLIVA¹,
O. PEÑA-RODRÍGUEZ¹,
A. RIVERA¹,
J. SANZ^{1,2},
P. SAUVAN^{1,2},
F. SORDO^{1,3},
P. VELARDE¹,
E.V. FERNÁNDEZ-TELLO¹,
J. MORENO¹,
P. MARTÍNEZ¹,
P. DÍAZ NÚÑEZ¹,
P. DÍAZ RODRÍGUEZ¹,
A. FIERRO¹,
J.A. SANTIAGO¹,
M. PANIZO-LAIZ¹,
E. MÍNGUEZ¹.

¹Instituto Fusión Nuclear-"Guillermo Velarde" / Universidad Politécnica de Madrid

²Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, UNED

³ESS-Bilbao

NUCLEAR FUSION BY INERTIAL CONFINEMENT AND RESEARCH AT THE NUCLEAR FUSION INSTITUTE

Research in Inertial Confinement Fusion (ICF) continues actively. Some results from National Ignition Facility (NIF) were not as promising as expected, but exhaustive critics and consolidation of other options some previously less worked has opened new routes to obtain the final goal of useful energy. The number of facilities increased in last years and careful experiments with more reliable simulations offer a promising future. The *Instituto de Fusión Nuclear "Guillermo Velarde"* maintain an intense activity in different areas of ICF here described, and simultaneously get benefit of such research for other science interest such as Astrophysics, high energy density in general, nanoplasmic and nanotechnology, materials under extreme conditions, intense sources of radiation, neutron transport and safety, and others.

30 profesores, 7 posdoctorandos, y 15 estudiantes de doctorado, asociado con la ESS-Bilbao siendo su sede para el Diseño del Blanco de la European Spallation Source (ESS) en Lund (Suecia) con 13 ingenieros fundamentalmente emergentes de la UPM y constituido en grupos de investigación denominados según las tareas aquí enunciadas.

FÍSICA DE PLASMAS Y FLUIDODINÁMICA

En los últimos años, el estudio de los procesos de interacción de láseres ultraintensos con la materia ha experimentado un gran auge gracias, en buena medida, al desarrollo de nuevas instalaciones experimentales. Hoy, mayo de 2019, en el mundo están operativos unos diez láseres de petawatios (PW), en España se encuentra el CLPU (Salamanca), que operan a 800 nm con intensidades superiores a 10^{19} W/cm². Por otro lado en los últimos años se han construido láseres de rayos X (ajustable por debajo de unos 10 keV) de electrones libres, lo que ha disparado la investigación en imagen, materiales, dinámica atómica en plasmas de no equilibrio, etc. El XFEL es la gran apuesta europea en este tipo de láseres. Estamos desarrollando herramientas [1] capaces de estudiar la evolución temporal a escala de femtosegundos (fs) de los materiales irradiados por estos láseres, típicamente con intensidades alrededor de 10^{18} W/cm². Los plasmas creados por estos láseres de rayos X evolucionan isocóricamente fuera del equilibrio termodinámico, lo que complica sustancialmente los cálculos.

Otro tipo de láseres, de menor potencia pero más energéticos (NIF, LMJ) permiten estudiar procesos relacionados con fusión inercial, con materiales sometidos a presiones extremas y con astrofísica de laboratorio (Figura 1). Desde hace años hemos estado desarrollando herramientas de simulación de los plasmas generados por estos láseres, lo que nos ha permitido simular experimentos realizados [2] recientemente en estas instalaciones y relacionados con ondas de choque radiativas, donde la radiación juega un papel importante, así como la simulación de remanentes de supernovas [3]. Las mismas herramientas se pueden aplicar a los plasmas generados por láseres de TW para la producción de fuentes secundarias de rayos X [4, 5]. Desarrollos financiados por proyectos nacionales y,

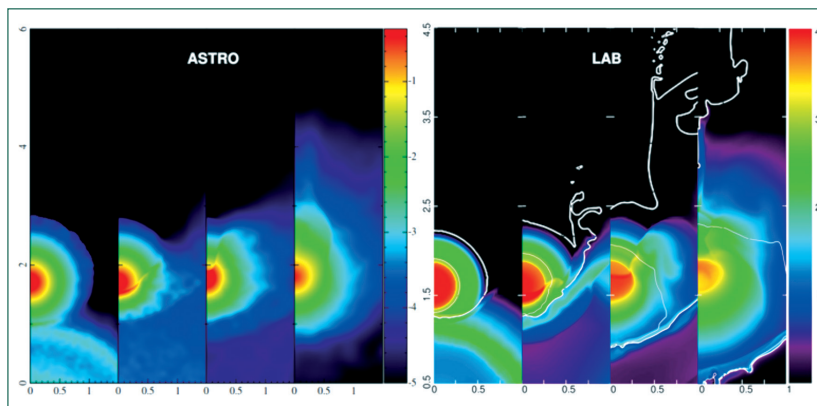


Figura 1. Simulación de la interacción del material eyectado en una explosión de supernova con la estrella vecina. Los resultados obtenidos con códigos de astrofísica y los obtenidos con los de plasmas de laboratorio son semejantes, a pesar de la disparada diferencia de escalas de s a ns.

sobre todo, europeos (TUIX, ELI, LaserLab JRI) desde el año 2005.

Finalmente, y relacionado con lo anterior, se están desarrollando algoritmos para la diagnosis de plasmas con rango desde el visible a rayos X. Igualmente se están desarrollando dentro del programa europeo Voxel nuevas cámaras y los algoritmos de reconstrucción [6] necesarios para poder realizar imágenes 3D con rayos X a baja dosis, lo que permitiría tomografía axial computarizada (TAC) de muy baja dosis.

GRUPO DE MATERIALES AVANZADOS

Se trabaja en el desarrollo de nuevos materiales capaces de resistir las condiciones hostiles (altos flujos de irradiación y cargas térmicas)

que existen en los reactores de fusión. Mediante simulaciones computacionales se ha estudiado la respuesta del W, material de la primera pared en el reactor de FCI europeo Hiper [7]. Los cálculos termomecánicos, para sus condiciones de operación y geometría, predicen su tiempo de vida e identifican sus amenazas.

Fundamental la alta retención de especies ligeras, productos de fusión, que se prevé lleguen a la primera pared produciendo hinchamiento y exfoliación. Se propone el uso de materiales nanoestructurados por su gran densidad de fronteras de grano que, bajo ciertas condiciones de irradiación, produce un efecto autosanante; en su estudio se usa la computación multiscale

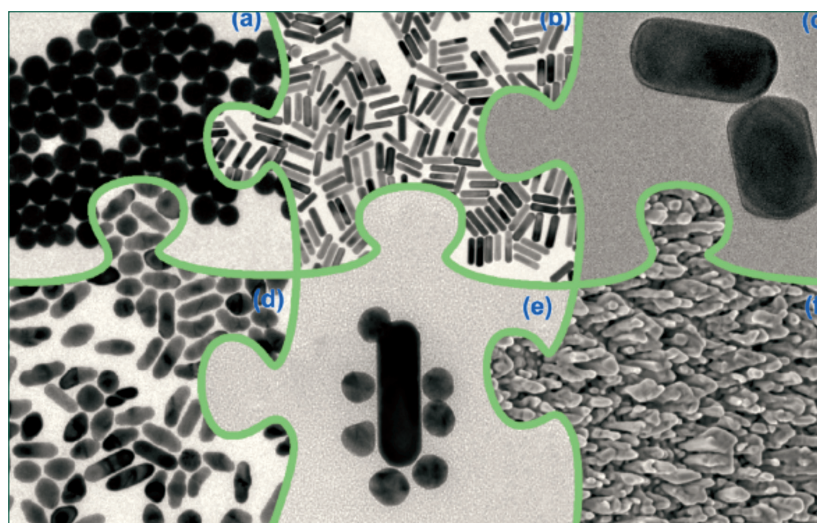


Figura 2. Micrografías de microscopía electrónica de algunas nanoestructuras plasmónicas de oro con las que trabajamos (fabricadas por nuestros colaboradores). Nanopartículas coloidales: (a) nanopartículas esféricas, (b) nanovarillas, (c) dímeros de nanovarillas, (d) nanovarillas modificadas con pulsos láser, (e) estructura modificada con láser, compuesta de una nanovarilla y varias esferas. (f) nanocolumnas depositadas sobre un sustrato de silicio.

(DFT, OKMC, MD) junto a experimentos [8-10], lo que permite concluir que las fronteras de grano son caminos preferenciales de difusión del H lo que retrasaría el hinchamiento a fluencias mayores [11].

Se ha concluido un diseño conceptual de manto reproductor basado en cerámicas de litio que controla de manera eficaz y dinámica el TBR manteniendo un inventario de tritio constante durante la operación del reactor. Mediante simulaciones computacionales se han estudiado las lentes finales de sílice en Hiper proponiendo soluciones para controlar su temperatura, evitando aberraciones, durante las fases de operación del reactor [12].

Una de las líneas más activas del grupo está orientada al estudio sistemático de la alta excitación electrónica y sus efectos sobre los materiales nanoestructurados (Figura 2) [13,14]. Dada la gran analogía entre la alta excitación electrónica inducida por la irradiación y aquella local mediada por plasmón, se han aplicado con éxito a sistemas plasmónicos algunos de los métodos desarrollados para estudiar materiales de fusión [15]. En este aspecto, el grupo de materiales tiene una posición de liderazgo pues actualmente lidera una acción COST sobre este tema en la que participan 30 países y 199 investigadores [16].

En el contexto de estudio de los aceros ferrítico-martensíticos se ha investigado la formación de intersticiales en FeCr y Cr con diversos potenciales empíricos y DFT. Se mostró como el potencial original frente a una revisión del modelo *two-band* y el modelo dependiente de concentración daban errores de varios eV en las energías de formación y enlace de los intersticiales *Fe-containing* en Cr puro [17].

NEUTRÓNICA COMPUTACIONAL (UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA)

Esta investigación se realiza a través del grupo TECF3IR/UNED y centra su interés en el análisis y diseño de las instalaciones más relevantes para el desarrollo de la *energía de fusión nuclear* ocupando un lugar muy destacado a nivel internacional en el campo de la *Neutrónica Computacional*.

La oferta científico-tecnológica realizada se puede dividir en dos apartados: i). Diseño: proporcionar soluciones de análisis y diseño nu-

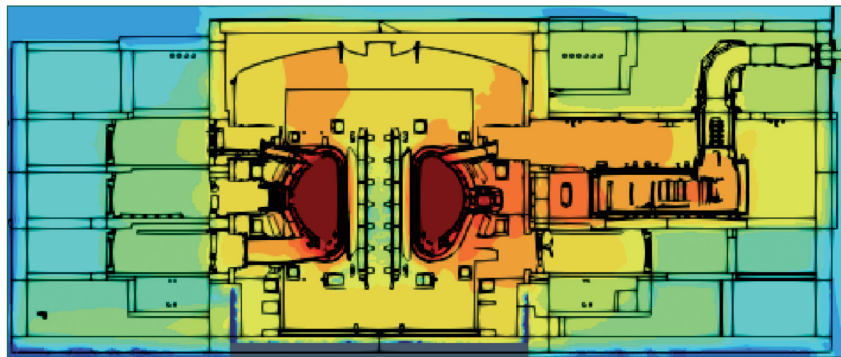


Figura 3. Ejemplo de distribución de la radiación en el Tokamak y los edificios de ITER.



Figura 4. Prototipo del Target Vessel y configuración final con el cassette de la ESS (cortesía de ESS-Bilbao).

clear con un alto nivel de integración y calidad; y ii) Metodología: elaborar procedimientos, generando modelos de cálculo y *software* que permite responder a desafíos de diseño anteriormente difíciles de abordar, con un alto nivel de fiabilidad.

Las actividades de análisis y diseño se han encuadrado en el marco de los siguientes proyectos: i) dentro de la fusión por confinamiento magnético, ITER, DEMO/EUROfusion y JET; ii) dentro de fusión por confinamiento inercial, NIF e HiPER, y iii) dentro de las instalaciones para cualificación de materiales para reactores de fusión, IFMIF-DONES y LIPAc.

En el apartado de metodología, destacar el desarrollo de *software*: i) para integrar transporte-activación para predicción de campos de radiación neutrón-gamma, respuestas nucleares y dosis en un amplio rango de condiciones operacionales, *Sistema DISUNED* [18] y *Sistema R2S-SUNED* [19]; ii) para cálculos de activación, *Sistema ACAB* [20]; iii) para transporte neutrón, gamma y partículas cargadas, *Sistema MCUNED* [21]; y iv) elaborar procedimientos y modelos geométricos complejos que incluyan todos los detalles relevantes de la instalación [22].

Todos los modelos mencionados cuentan con un muy notable grado de reconocimiento a nivel interna-

cional. Es especialmente destacable que la herramienta DIS-UNED es, a día de hoy, la herramienta recomendada por ITER para la determinación de campos de radiación residual en dicha instalación. Por otra parte, los procedimientos y experiencia adquirida en la elaboración de modelos de simulación han permitido desarrollar varios modelos de transporte de radiación que han sido adoptados como referencia dentro de proyectos tales como ITER [23].

Los trabajos desarrollados y en progreso bajo contrato y proyectos para las distintas instalaciones (ITER, DEMO/EUROfusion y JET, NIF e Hiper, IFMIF-DONES y LIPAc) quedan reflejados en las referencias, Figura 3 [24-27].

COLABORACIÓN ENTRE EL IFN Y ESS-BILBAO PARA LA CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA A LA ESTACIÓN DE BLANCO DE ESS

Las fuentes de espalación son dispositivos diseñados para producir muy alta generación de neutrones mediante dichas reacciones nucleares. Para producirlas es necesario acelerar un hadrón (normalmente un proton H) que se lanza sobre un núcleo con alto número másico (wolframio, mercurio, plomo) dando lugar a la reacción. El lugar en el que tiene lugar estas reacciones

se conoce como blanco de espalación.

Los blancos son dispositivos de ingeniería complejos donde se deposita una gran cantidad de energía en forma de calor. En algunos casos, la densidad de potencia del material de espalación es mayor que la producida en las barras de combustible de los reactores nucleares lo que es un auténtico reto de ingeniería. El blanco de la *European Spallation Source* es uno de estos casos. En octubre de 2014, el consorcio ESS-Bilbao fue elegido por ESS como entidad responsable del diseño, ingeniería de detalle y fabricación de su blanco.

La Fuente Europea de Espalación (ESS) es un ambicioso proyecto europeo con un presupuesto de 1843 millones de euros cuyo objetivo es diseñar, construir y operar la fuente de neutrones más intensa del mundo. ESS utilizará un haz de protones con una potencia media de 5 MW (3-5 veces superior a la SNS (EE.UU.) y J-PARC (Japón)) que impactará sobre un blanco de wolframio rotatorio refrigerado mediante helio gas.

El material de espalación, estará configurado por bloques de wolframio de 10x20x80 mm colocados en tresbolillo con una separación de 2mm entre ellos. Entre los huecos del wolframio circulará helio (80 m/s y 10 bares) para extraer el calor. Los bloques se ensamblan en una estructura de acero inoxidable conocida como *Cassette* (187 bloques por *cassette*), 36 de las cuales se introducen en el interior de una rueda de acero inoxidable de 2.5 m de diámetro (*Target Vessel*), sincronizada con el haz de protones incidiendo una vez en cada *cassette* con una frecuencia de 0.5 Hz.

El diseño del blanco ha finalizado confirmado su diseño mediante prototipos (Figura 4) y la fabricación del componente final comenzó a mediados de 2018. Con algunos elementos completados, se espera entregar el componente en septiembre de 2020.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren destacar el papel de financiación que están jugando H2020 Voxel, Eurofusión ENR-IFE/CEA-02, ENR-IFE19.CCFE-01, Comunidad de Madrid, TechnoFusion(II)-CMS2013/MAE-2745, TechnoFusion(III)-CMS2018/EMT-4437 y Planes Nacionales ENE2015-70300-C3-3-R. ■

- [1] Q. van den Berg et al, Clocking Femtosecond Collisional Dynamics via Resonant X-Ray Spectroscopy, *Phys. Rev. Lett* 120 (2018)
- [2] F. Suzuki-Vidal et al, Counterpropagating Radiative Shock Experiments on the Orion Laser, *Phys. Rev. Lett.* 119 (2017)
- [3] D. García-Senz et al, Interaction of Hemispherical Blast Waves with Inhomogeneous Spheres: Probing the Collision of a Supernova Ejecta with a Nearby Companion Star in the Laboratory, *The Astrophysical Journal*, 871 (2019)
- [4] A. Barbas y P. Velarde, Development of a Godunov method for Maxwell's equations with Adaptive Mesh Refinement, *Journal of Computational Physics*, 300 (2015)
- [5] E. Oliva et al, A proposal for multi-tens of GW fully coherent femtosecond soft X-ray lasers, *Nature Physics* 6 (2012)
- [6] N. Vigano, et al, "Advanced light-field refocusing through tomographic modeling of the photographed scene", *Optics Express*, 27, 6, 7834-7856 (2019)
- [7] D. Garoz, et al., Modelling the thermomechanical behaviour of the tungsten first wall in HiPER laser fusion scenarios, *Nucl. Fusion*. 56 (2016) 126014.
- [8] C. Guerrero, et al., First principles study of the behavior of hydrogen atoms in a W monovacancy, *J. Mater. Sci.* 51 (2015) 1445-1455.
- [9] G. Valles, et al., Temperature dependence of underdense nanostructure formation in tungsten under helium irradiation, *J. Nucl. Mater.* 490 (2017) 108-114.
- [10] C. González, M. Panizo-Laiz, R. González-Abascal et al., H trapping and mobility in nanostructured tungsten grain boundaries: a combined experimental and theoretical approach, *Nucl. Fusion*. 55 (2015) 113009; and P.M. Piaggi, et al., *J.Nucl. Mater.* 458 (2015) 233-239.
- [11] G. Valles, et al., Influence of grain boundaries on the radiation-induced defects and hydrogen in nanostructured and coarse-grained tungsten, *Acta Mater.* 122 (2017) 277-286.
- [12] A.R. Páramo, et al., Transmission final lenses in the HiPER laser fusion power plant: system design for temperature control, *Nucl. Fusion*. 54 (2014) 123019.
- [13] L. Montaña-Priede, O. Peña-Rodríguez, A. Rivera, et al., Optimizing the electric field around solid and core-shell alloy nanostructures for near field applications, *Nanoscale*. (2016). doi:10.1039/C6NR03801H; *J. Phys. Chem. C* 121 (2017) 23062.
- [14] A. Rivera, et al., Permanent modifications in silica produced by ion induced high electronic excitation: Experiments and atomistic simulations, *Sci. Rep.* 7 (2017) 10641, and O. Peña-Rodríguez, et al., *Sci. Rep.* 7 (2017) 1.
- [15] G. González-Rubio, P. Díaz-Núñez, A. Rivera, A. Prada, O. Peña-Rodríguez, et al., Femtosecond laser reshaping yields gold nanorods with ultranarrow surface plasmon resonances, *Science*. 358 (2017) 640-644.
- [16] CA17126 - Towards understanding and modelling intense electronic excitation, (n.d.). <https://www.cost.eu/actions/CA17126/#tabs|Name:overview>
- [17] P. Klaver, E. del Rio, et al., Inconsistencies in modelling interstitials in FeCr with empirical potentials, *Computational Materials Science*. 121 (2016) 204-208.
- [18] P.Sauvan et al., "D1S-UNED 3.1.4 User's Manual", Dpto. Ingeniería Energética - UNED, (2018)
- [19] P. Sauvan, et al., "Development of the R2SUNED Code System for Shutdown Dose Rate Calculations", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 63 (2016) 375-384
- [20] J. Sanz, O. Cabellos and N. García-Herranz, ACAB-2008: Activation Code V2008. User's manual V2008, Nuclear Energy Agency NEA Data Bank. NEA-1839, (2008)
- [21] P.Sauvan, J.Sanz, F.Ogando, "New capabilities for Monte Carlo simulation of deuteron transport and secondary products generation", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 614 (2010) 323-330
- [22] A. J. López-Revelles, "MCNP model of the ITER Tokamak Complex" *Fusion Engineering and Design* 136 (2018) 859-863
- [23] R. Juárez, et al., "The use of the long modular diagnostics shield module to mitigate shutdown dose rates in the ITER diagnostics equatorial ports", *Nuclear Fusion*, 58 (2018), 5; *Nucl. Fus.* 58 (2018) 12; *Fus. Eng. Des.* 134 (2018) 92-96
- [24] T. Eade, et al., "Activation and decay heat analysis of the European DEMO blanket concepts". *Fus. Eng. and Deign.* 2017, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.02.100>
- [25] R.Villari et al., "ITER oriented neutronics benchmark experiments on neutron streaming and shutdown dose rate at JET", *Fus. Eng. and Design*, 123 (2017), 171.
- [26] R. Juárez et al., "Thermo-fluid dynamics and corrosion analysis of a self cooled lead lithium blanket for the HiPER reactor", *Nuclear Fusion* 55 (2015) 9.
- [27] B. Brañas, et al., "The LiPac beam dump", *Fus. Energy and Design* 127 (2017).