

Desarrollo de diagnósticos para plasmas: catalizador de nueva física

K. J. McCarthy^I, A. Sola^{II}, E. Anabitarte^{III}, N. Bordel^{IV}, J. Cotrino^V, C. Gómez-Aleixandre^{VI}, F. J. Gordillo Vázquez^{VII}, S. Mar^{VIII}, R. Martínez^{IX}, G. Rodríguez Prieto^X, I. Tanarro^{XI} y J. Trujillo Bueno^{XII}

Los diagnósticos constituyen una parte fundamental de los estudios de plasmas, sean plasmas atmosféricos o astrofísicos, plasmas fríos dedicados a estudios de ciencia básica o a aplicaciones industriales, o plasmas calientes confinados magnéticamente. Además, existe una gran variedad de técnicas de diagnosis, muchas de las cuales, como la espectroscopía óptica o las sondas, son empleadas para los diferentes tipos de plasmas. Por otra parte, existe un acoplamiento fuerte entre el desarrollo de los diagnósticos y el de la física de plasmas, es decir que los diagnósticos actúan como catalizador para el desarrollo de nueva física. En este trabajo revisamos la gran variedad de plasmas que se estudian en los laboratorios españoles y las técnicas empleadas actualmente para entender y controlar los plasmas, y presentamos los desarrollos de nuevos diagnósticos en curso, así como la física que se espera investigar.

Introducción

El plasma es el estado de la materia conocida más abundante en el universo, y no sólo está presente en las estrellas, sino que también aparece en fenómenos naturales en la Tierra (figura 1) [1]. Su importancia para la sociedad, por ejemplo para aplicaciones industriales, crece continuamente y los plasmas forman una parte esencial de la infraestructura tecnológica de los países desarrollados [2]. En paralelo, la utilización del plasma en el desarrollo de la fusión nuclear —que plantea una posible solución al problema de la energía— ha alcanzado un alto grado de desarrollo y sofisticación [3]. El desarrollo tecnológico requiere un esfuerzo continuado no sólo en el campo de la ciencia básica de plasmas sino también en el de los diagnósticos que son la clave para entenderlos y controlarlos. Asimismo, conocimientos procedentes de los estudios de plasmas astrofísicos y atmosféricos tienen una contribución importante en dicho desarrollo, además de ampliar nuestro entendimiento del universo y de

la Tierra [4]. Un somero inventario de estos desarrollos constata un fuerte solapamiento entre las técnicas y tecnologías empleadas en la diagnosis de los distintos plasmas siendo dicha constatación de esperar dado que la mayor parte de la física y de los fenómenos conocidos es común a todos ellos, por ejemplo, la turbulencia, el transporte, o la interacción del plasma con la materia sólida o la radiación, siendo muy llamativo que los diagnósticos cubran casi todo el espectro electromagnético, desde los rayos-X hasta las microondas (figura 2), e involucren un gran número de fenómenos de la física [5]. Para muchas situaciones, la correcta interpretación de las medidas proporcionadas por los diagnósticos requiere de una herramienta adicional, es decir de cálculos por simulación donde se reproducen las condiciones físicas del plasma y su influencia sobre los parámetros de interés.

Los grupos españoles que trabajan en plasmas lo hacen con una gran variedad de diagnósticos y los valores de sus parámetros básicos (densidad y temperatura de partículas cargadas) cubren muchos órdenes de magnitud, por lo que sería difícil resumir todo el campo abarcado en un solo artículo. Aquí, se pretende presentar un resumen del estado

I Laboratorio Nacional de Fusión, CIEMAT, 28040 Madrid, kieran.mccarthy@ciemat.es

II Departamento de Física, Universidad de Córdoba, 14071 Córdoba, fa1sodia@uco.es

III Departamento de Física Aplicada, Universidad de Cantabria, 39005 Santander, ernesto.anabitarte@unican.es

IV Departamento de Física, Universidad de Oviedo, 33006 Oviedo, bordel@uniovi.es

V Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, CSIC-Universidad de Sevilla, 41092 Sevilla, cotrino@us.es

VI Instituto de Ciencia de Materiales, CSIC, Cantoblanco, 28049 Madrid, cgaleix@icmm.csic.es

VII Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC, 18080 Granada, vazquez@iaa.es

VIII Departamento de Óptica, Universidad de Valladolid, 47011 Valladolid, santiago@opt.uva.es

IX Departamento de Química Física, Universidad del País Vasco, 01006 Vitoria-Gasteiz, r.martinez@ehu.es

X Escuela Técnica de Ingeniería Industrial, Universidad de Castilla-La Mancha, 13071 Ciudad Real, gonzalo.RPrieto@uclm.es

XI Instituto de Estructura de la Materia, CSIC, 28006 Madrid, i.tanarro@csic.es

XII Instituto de Astrofísica de Canarias, 38205 La Laguna (Santa Cruz de Tenerife), jtb@iac.es

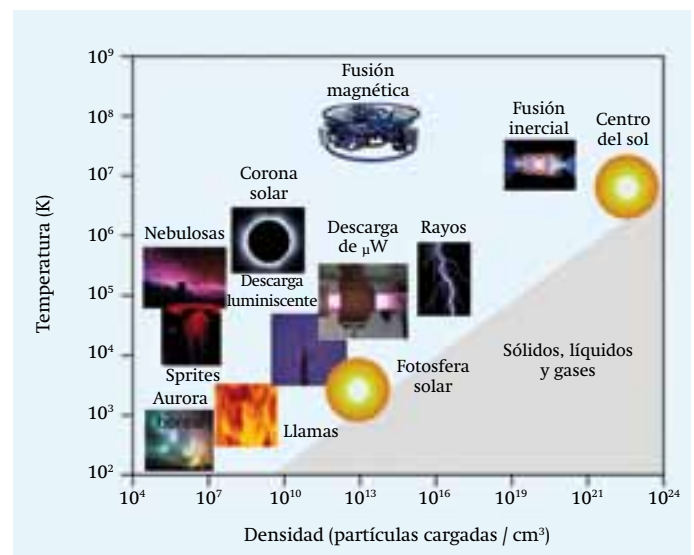


Fig. 1. Distintos tipos de plasmas, clasificados por los valores de dos de sus magnitudes más características.

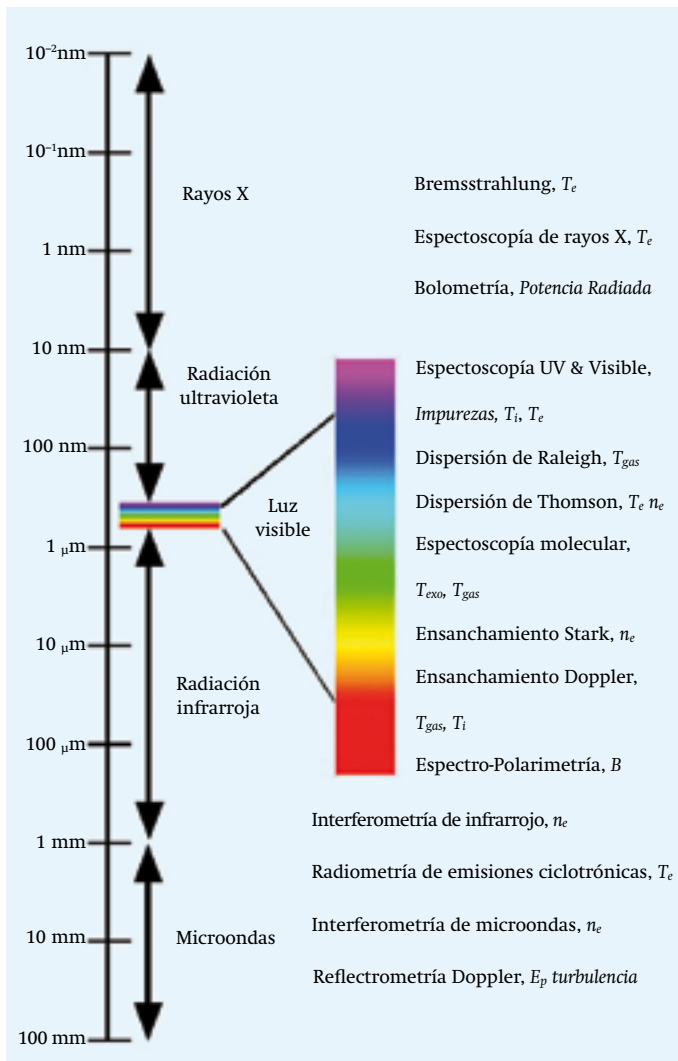


Fig. 2. Una selección de las técnicas estándar empleadas en plasmas, su localización en el espectro electromagnético y los parámetros medidos.

actual de los diagnósticos en centros de investigación españoles, así como dirigir la atención a los desarrollos llevados a cabo en ellos para abrir camino a nueva ciencia, con la esperanza de impulsar la colaboración multidisciplinar entre los numerosos grupos en este campo. En resumen, existe una amplia base de conocimientos y una vasta realidad en el campo de los diagnósticos de plasmas que deben ser de interés mutuo.

1. Una gran variedad de plasmas

Aunque los plasmas involucran distintos intereses científicos, todos se pueden agrupar en varias categorías fácilmente identificables. Son plasmas con aplicaciones industriales para la síntesis o análisis de materiales; plasmas destinados a estudios de física básica y a estudios dentro de la astrofísica y la atmósfera; plasmas con aplicaciones tecnológicas, y plasmas relacionados con la fusión nuclear. Al realizar dicha agrupación es llamativo ver el gran rango de densidades (o presiones), temperaturas y dimensiones, el amplio número de métodos de calentamiento, y la enorme variedad de especies presentes (tabla 1).

En primer lugar varios grupos trabajan con plasmas de interés o aplicación industrial. Por ejemplo, en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM-CSIC) generan plasmas para la síntesis de capas o nanoestructuras de car-

bono, que consisten principalmente en mezclas diluidas de un hidrocarburo (CH_4 o C_2H_2) en Ar o H_2 . Son plasmas producidos por descargas de radiofrecuencia (a 30 kHz y 13.56 MHz) [6], con una densidad electrónica, n_e , entre 10^{10} y 10^{12} cm^{-3} , temperatura electrónica, T_e , entre 1 y 2 eV [7], y presión base, p , entre 13 y 67 Pa; o por microondas (a 2.45 GHz) con $10^9 \leq n_e \leq 10^{12}$ cm^{-3} , $T_e \sim 0.5$ eV, $0.3 \leq p \leq 5$ kPa [8-11]; o por resonancia ciclotrónica de electrones (ECR, a 2.45 GHz y 0.0875 T), con $10^{11} \leq n_e \leq 10^{13}$ cm^{-3} , $2 \leq T_e \leq 5$ eV, $1 \leq p \leq 5$ Pa [12]. Mediante estas técnicas se han preparado fundamentalmente capas delgadas, con espesor ≤ 1 μm , de carbono amorfo con estructura tipo fullereno además de capas de diamante microcristalino y nanocristalino (nanodiamante), todas ellas con aplicación como recubrimientos tribológicos.

En esta misma línea, en el Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (US-CSIC) estudian diferentes procesos en plasmas destinados a la síntesis y/o modificación de películas delgadas con el objetivo de optimizar sus propiedades con vistas a aplicaciones tecnológicas. Disponen para ello de diferentes reactores [que trabajan con fuentes en DC, radiofrecuencia (RF), microondas (μW) y magnetrón DC pulsado] para la síntesis y funcionalización de materiales nanoestructurados [13], donde generan plasmas con n_e entre 10^9 y 10^{12} cm^{-3} , T_e entre 0.5 y 10 eV, y p entre 0.1 y 100 Pa. En todos los casos, las propiedades de los materiales, cuyo espesor es del orden de 100's nm, no sólo dependen de su composición química sino también de la forma en que se estructuran nanoscópicamente (p. ej. en formaciones columnares, nanotubos, fibras, etc.). Como ejemplo, se puede destacar el crecimiento de películas de SiO_2 en un sistema de pulverización catódica, un blanco de silicio, y un plasma reactivo con diferentes proporciones de Ar y O_2 [14].

Los grupos de Espectroscopía, Láseres y Plasmas y Espectrometría Analítica de la Universidad de Oviedo (UO) estudian la composición de materiales innovadores en descargas luminiscentes analíticas. En este caso utilizan descargas luminiscentes, con $p \sim 100$'s Pa, generadas entre dos electrodos entre los que fluye el gas descarga, generalmente Ar, operando en modo anormal. En las descargas de corriente continua las diferencias de potencial típicamente utilizadas están en torno a 0.7-0.9 kV y las intensidades de corriente son del orden de decenas de mA. Estas descargas también suelen generarse mediante radiofrecuencia (13.6 MHz) porque, en este caso, es posible utilizar cátodos no conductores. Además, las descargas pueden establecerse en modo continuo o en modo pulsado (μs -ms) [15]. Los grupos utilizan cámaras de descarga diseñadas por ellos mismos que después se acoplan a espectrómetros de masas u ópticos [16, 17]. El diseño de las cámaras es crítico [16, 18, 19] para producir el arrancado de material del cátodo en una superficie bien delimitada y, además capa a capa. Este modo de introducción de material en el plasma permite hacer análisis con resolución en profundidad, incluso de capas ultradelgadas con espesores del orden de nanómetros [20, 21]. En las descargas creadas con radiofrecuencia la temperatura del gas suele estar entre 300 y 700 K, n_e entre 10^{11} y 10^{14} cm^{-3} y la densidad de partículas neutras alrededor de 10^{16} - 10^{17} cm^{-3} . Las descargas luminiscentes pulsadas dan lugar a un plasma dinámico caracterizado por tres regiones temporales (*pre-peak*, *plateau* y *afterglow*) en los que predominan diferentes

Tabla 1. Resumen de los plasmas estudiados por los grupos españoles que han contribuido a este artículo junto con los parámetros principales, gases de trabajo y técnicas de diagnosis habituales

Grupo	Tipos de plasma	n_e (cm ⁻³)	T_e (eV)	Gases de trabajo	Técnicas
ICMM-CSIC	- RF - μ W - ECR	10 ¹⁰ a 10 ¹² 10 ⁹ a 10 ¹² 10 ¹¹ a 10 ¹³	1 a 2 0.5 2 a 5	H ₂ , Ar (CH ₄ o C ₂ H ₂)	Espectroscopía óptica y de masas
US-CSIC	DC, RF, μ W, magnetrón DC	10 ⁹ a 10 ¹²	0.5 a 10	O ₂ , Ar	Espectroscopía de masas
UO	Luminiscentes - RF pulsado - DC pulsado	10 ¹¹ a 10 ¹⁴	< 0.1	Ar	Espectroscopía óptica y de masas
UVA	- DC pulsado - Arco, llamas, cátodo hueco	0.2 a 2·10 ¹⁷	1 a 3	H ₂ , He y otros elementos de interés	Espectroscopía óptica, interferometría
UCO	DC Antorcha μ W	10 ⁸ a 10 ⁹ ~ 10 ¹⁷ 10 ¹⁰ a 10 ¹⁴	0.1 a 0.5 ~ 2 0.5 a 1	H ₂ , He, N ₂ , O ₂ , Ar y otros elementos de interés	Espectroscopía óptica y de masas, sonda simple y doble, técnicas electromagnéticas
UPV/EHU	Ablación por láser	10 ¹⁵	10 a 50	Metales	Espectroscopía de masas, AEE
IEM-CSIC	Cátodo hueco	~ 10 ¹⁰	2 a 8	H ₂ , D ₂ , Ar, N ₂ , CH ₄ , N _x O _y	Espectroscopía óptica y de masas, sondas simple y dobles
IAC	Atmósfera solar	~ 10 ¹³ ~ 10 ¹¹ ~ 10 ⁹ ~ 10 ⁸	~ 0.5 ~ 1 ~ 10 ~ 100	Fotosfera Cromosfera Transición Corona	Espectroscopía óptica
IAA-CSIC	TLE, <i>sprites</i>	~ 10 ⁵ a 10 ⁷	~ 1 a 10	Alta atmósfera	Espectroscopía óptica (GRASSP)
ETSIA-UPM	Propulsor iónico	10 ⁶ a 10 ¹²	1 a 3	Ar, Xe	Sonda Langmuir
UC	SPLM y SPLM-up μ W	10 ⁹ a 10 ¹²	≤ 30	He, Ne, Ar	Array Langmuir /Mach, interferometría
UCIM	Z-pinch	~ 10 ¹⁹	~ 104	Alambre	Fotografía Schlieren, shadowgraphy
LNF	TJ-II - μ W - NBI	≤ 1.5·10 ¹² ≤ 5·10 ¹³	≤ 10 ³ ≤ 300	H, D, He	Espectroscopía óptica y de masas, sondas, reflectometría, interferometría

procesos colisionales. Finalmente, estudian su dinámica utilizando como herramienta tanto la espectrometría óptica como de masas.

En el Laboratorio de Espectroscopía de Plasmas de la Universidad de Valladolid (UVA) estudian la calibración de parámetros atómicos tales como el ensanchamiento y el desplazamiento Stark de líneas espectrales emitidas espontáneamente por el plasma. Estos estudios requieren la generación de plasmas donde no sólo n_e alcance valores suficientemente altos como para que las magnitudes medidas tomen valores significativos, sino que presenten evoluciones de n_e y T_e en rangos suficientemente amplios como para que la dependencia temporal de esos parámetros sea medible. Para ello, se generan plasmas mediante una descarga pulsada desde un banco de condensadores sobre dos electrodos conectados a los extremos de una lámpara de Pyrex [22]. Antes, durante y después de cada descarga, una mezcla de los gases circula a través de la lámpara a presión y flujo controlado, estando la primera en el rango de 0.1-5 kPa y el segundo en unos pocos cm³/min. En estas condiciones, la emisión del plasma dura aproximadamente entre 200 y 500 μ s, n_e varía entre 0.2 y 2·10¹⁷ cm⁻³ y T_e entre 1 y 3 eV. En paralelo, otro grupo, dedicado a espectroscopía láser, trabaja con plasmas continuos generados en un arco estabilizado ($p = 10$ kPa, $I = 18$ -63 A, $P = 40$ kW) o en una descarga de cátodo hueco ($p = 0.27$ -1.35 kPa, $I = 50$ -200 mA), y llamas a presión atmosférica [23-28]. En el Departamento de Óptica trabajan con cálculos de simulación numérica de líneas espectrales para la diagnosis espectroscópica de

plasmas [29-31]. Para ello, se reproduce por modelación un cierto recinto de plasma en el que las partículas se mueven en condiciones que representen una cierta configuración de densidad y temperatura. Se calcula entonces el campo eléctrico producido por todas esas partículas sobre uno de los átomos o iones emisores. Conocido este campo —que va cambiando con el tiempo siguiendo el proceso de simulación— se resuelve la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo que describe la evolución del emisor. Una vez resuelta numéricamente esa ecuación, se evalúa el momento dipolar del emisor, lo que nos permite determinar cómo es el proceso de emisión del átomo o ión perturbado y así poder definir las características espectrales de la emisión. Este proceso se repite un enorme número de veces (del orden de las decenas de miles) con condiciones físicas diferentes, elegidas aleatoriamente en una muestra estadísticamente bien controlada, lo que permite evaluar cómo será la línea espectral en las condiciones físicas del plasma reproducido por simulación.

En los departamentos de Física y de Física Aplicada de la Universidad de Córdoba (UCO), varios grupos estudian diversos tipos de plasmas producidos por diferentes fuentes y para distintos propósitos. Por ejemplo, fuentes de alimentación en DC (2-6 kV) tanto continuas como pulsadas en el interior de campanas de vacío han permitido el estudio, mediante sondas de Langmuir, de descargas tipo glow ($p = 2$ a 20 Pa) y caracterizar parámetros como n_e y T_e (10⁸-10⁹ cm⁻³, 0.1-0.5 eV) en distintas zonas de la característica I-V, así como la propia función de distribución de energía de

electrones [32, 33]. En procesos transitorios, estas medidas han permitido seguir con resolución temporal el proceso de variación de dicha función [34]. Por otro lado, con mezclas adecuadas de gases, se han determinado densidades y temperaturas de iones negativos (de 10^7 a 10^8 cm^{-3} , 0.1 eV) [35]. La interacción del plasma con los electrodos y la dinámica de vainas en las zonas de transición plasma-electrodos han sido objeto de estudio tanto experimental como computacional [36, 37]. Otra línea desarrollada por sus grupos es la interacción plasma-cátodo en plasmas térmicos producidos por antorcha de plasma a presión atmosférica ($T_e \approx 2$ eV, $n_e \approx 10^{17}$ cm^{-3}). Se ha investigado el comportamiento de cátodos binarios de emisión termoiónica tanto experimental [38, 39] como numéricamente [40]. Se ha determinado la dinámica en la vaina y prevaina del material catódico evaporado [41] y se ha estudiado la dinámica del spot catódico [42]. También los plasmas producidos por microondas (a 2.45 GHz) en descargas propagativas y descargas de antorcha han sido estudiados tanto teóricamente como experimentalmente en un amplio rango de condiciones de trabajo ($p \approx 7$ Pa a 1 atm) y diversas geometrías cilíndricas ($0.5 \text{ mm} < R < 45 \text{ mm}$), cuya diagnosis se ha realizado tanto por técnicas espectroscópicas como electromagnéticas, en el rango de 10^{10} a 10^{14} cm^{-3} para n_e y de 0.5 a 1 eV para T_e . Estos estudios han sido enfocados desde un punto de vista meramente básico, pero también con vista a sus distintas aplicaciones en distintos campos de la tecnología como son iluminación [43], destrucción de contaminantes gaseosos [44], análisis espectroquímico [45], producción de especies atómicas y moleculares [46] y formación de compuestos hidrocarbonados [47] para diversas aplicaciones en procesos de química de plasma.

Finalmente, en el Departamento de Química Física de la Facultad de Farmacia en la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) estudian la incidencia de pulsos láser de moderada o alta intensidad sobre materiales que produce plasmas ricos en iones de cargas altas, con energías que alcanzan los keV. En particular, los plasmas se generan por incidencia de pulsos láser de 5 ns (FWHM) y 532 nm de longitud de onda sobre metales y la radiación, convenientemente enfocada, produce un plasma que se expande en dirección perpendicular a la muestra. En general, la densidad de los iones generados y el grado de ionización dependen tanto de las características de la radiación como del material utilizado. Los haces de iones así producidos vienen utilizándose para crecer películas o para bombardear e implantar en superficies de diversos materiales, modificando sus propiedades físicas y reactividad química [48]. La determinación de las distribuciones de energía cinética ayuda a comprender y optimizar estas aplicaciones; pero también permite comprobar los mecanismos de formación y aceleración de los iones, que ocurren en tiempos inferiores a los nanosegundos y son inaccesibles para la mayor parte de las técnicas de diagnóstico [49].

En el área de plasmas de interés astrofísico cabe destacar el trabajo del Laboratorio de Plasmas Fríos del Instituto de Estructura de la Materia del CSIC de Madrid (IEM-CSIC), donde estudian experimentalmente y mediante modelado cinético descargas luminiscentes de especies moleculares (puras o en mezcla), con especial atención a las vías de extinción de los precursores y a la formación de nuevos productos [50].

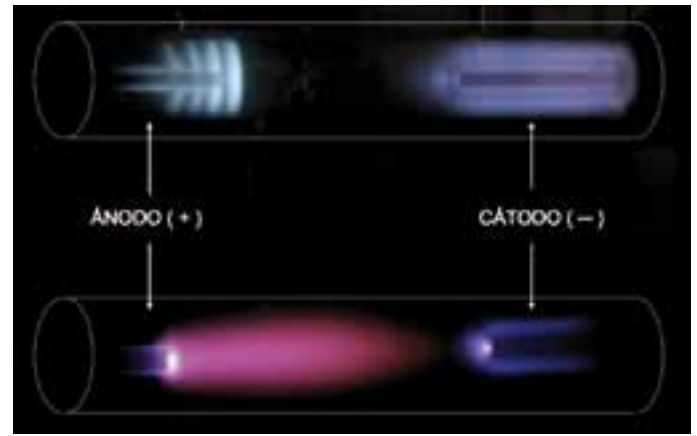


Fig. 3. Aspectos de un plasma de aire a baja presión en un tubo de descarga, con distintas intensidades de corriente (IEM-CSIC).

En particular, sus áreas de interés son la generación de especies exóticas e inestables en condiciones terrestres, pero muy relevantes en la evolución química del universo [51], así como los procesos cinéticos en ionosferas planetarias. También estudian una variedad de temas no astrofísicos, como los procesos de interacción plasma-superficie para formar o eliminar recubrimientos, lo que resulta de interés en reactores de fusión [52] y en microelectrónica [53], y en procesos catalíticos asistidos por plasma [54]. Para estos estudios, se emplean reactores de descarga DC en configuración de cátodo hueco con distintas geometrías, que han sido diseñados y construidos en su laboratorio y que operan en flujo continuo de gas con presiones entre ~ 0.5 y 200 Pa (véase la figura 3). Como resultado, la temperatura del gas, considerando su energía cinética, es de unos 300 K, y lo mismo para los iones, aunque se aceleran hasta 300-500 eV en la vaina. En cuanto a los electrones, T_e está entre 2 y 8 eV, dependiendo de la presión, y n_e es del orden de 10^{10} cm^{-3} .

Por otro lado, uno de los grandes retos de la Astrofísica actual es descifrar el magnetismo de la atmósfera solar y desarrollar las técnicas de diagnóstico necesarias para poder explorar la actividad magnética en otros plasmas astrofísicos (estrellas, medio interestelar, galaxias), los cuales se encuentran demasiado alejados de la Tierra como para poder estudiarlos con el mismo detalle que en el Sol. Un grupo del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) estudia el magnetismo de la atmósfera solar. Este plasma se extiende desde la relativamente delgada (400 km) y densa fotosfera ($T_e \sim 0.5$ eV y $n_e \sim 10^{13}$ cm^{-3}) hasta la tenue corona ($T_e \sim 100$ eV y $n_e \sim 10^8$ cm^{-3}), cuyo plasma está en expansión y llega hasta los confines del sistema solar [55]. Entre ambas se encuentran las que quizás sean las regiones más enigmáticas: la cromosfera ($T_e \sim 1$ eV y $n_e \sim 10^{11}$ cm^{-3}), donde la temperatura aumenta varios miles de grados respecto a la fotosfera, y la región de transición ($T_e \sim 10$ eV y $n_e \sim 10^9$ cm^{-3}), donde en apenas 100 km la temperatura se dispara cientos de miles de grados y el plasma pasa de estar parcialmente a casi totalmente ionizado. Cómo es posible que alejándose unos 3000 km de la relativamente fría ($T \sim 5800$ K) fotosfera, en la base de la corona, la temperatura del plasma aumente hasta 10^6 K es uno de los mayores misterios de la Astrofísica. Lo único que se sabe es que el campo magnético está involucrado y que juega un papel crucial. El campo magnético es, además, el responsable de la multitud de complejas estruc-

turas que se observan en la atmósfera solar y su dinámica (p. ej., las manchas solares, las prominencias coronales, las espículas de la cromosfera, etc.). Por todo ello resulta imprescindible inferir y caracterizar el campo magnético para entender el funcionamiento del Sol.

En el campo de la atmósfera, se puede destacar el trabajo del Instituto de Astrofísica de Andalucía en Granada (IAA-CSIC) que estudia plasmas atmosféricos, en particular, plasmas de aire producidos en descargas eléctricas que tienen lugar en la mesosfera terrestre (entre 40 y 90 km de altura), esto es, a presiones y temperaturas de gas que oscilan entre 1 Pa, 200 K y 1 kPa, 240 K [56, 57]. El estudio de fenómenos luminosos transitorios (*Transient Luminous Events* o TLE), asociados a enormes descargas eléctricas en la mesosfera terrestre, de entre los que los *sprites* y halos son los más frecuentes, comenzó con su descubrimiento en 1989 en una grabación accidental de vídeo que apuntaba sobre grandes tormentas eléctricas [57]. Desde entonces ha habido una serie de campañas anuales de observación en Estados Unidos en las que se empezaron a grabar de forma sistemática imágenes de más calidad de *sprites* a partir de las que se comenzó a estimar propiedades de los TLE tales como su brillo y duración así como su tamaño y la altura aproximada a la que se producen [58-61]. Con el objeto de enriquecer el conocimiento disponible de los TLE, el grupo de IAA-CSIC ha diseñado y construido el GRASSP (GRAnada Sprite Spectrograph and Polarimeter) formado por dos instrumentos para la diagnosis de los plasmas de aire generados por la acción de TLE en la mesosfera. Este instrumento se ha instalado recientemente (mayo de 2013) en el Observatorio de Calar Alto (CAHA) en Almería, a 2168 m sobre el nivel del mar, con el objetivo de realizar de forma sistemática y mantenida en el tiempo estudios espectroscópicos y polarimétricos de los plasmas de aire mesosféricos generados por *sprites* y halos en coordinación con las misiones espaciales ASIM y TARANIS de la ESA y del CNES, respectivamente.

En otro campo importante de los plasmas, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSIA-UPM) estudian plasmas emitidos por propulsores iónicos de baja potencia con aplicaciones como motores de empuje en misiones espaciales [62]. Los plasmas que resultan tienen una composición química muy variada, tanto como la naturaleza del gas empleado, y pueden formarse plasmas de compuestos químicamente complejos, tanto con iones positivos como negativos. La densidad de carga suele estar entre 10^6 y 10^{12} cm⁻³ con T_e en el rango de 1-3 eV. Para presiones del gas por encima de 10 Pa, los plasmas generados producen luz visible debido a las colisiones entre los electrones y átomos neutros, que tienen densidades elevadas, lo que ha dado lugar a aplicaciones prácticas y de tipo comercial. Los plasmas producidos a baja presión son empleados para la propulsión de satélites, pues los iones del plasma pueden ser acelerados a elevadas velocidades empleando campos eléctricos intensos. Aunque en este caso el empuje es pequeño, tienen la ventaja de consumir muy poco combustible (iones) por lo que son apropiados para misiones de larga duración.

Finalmente, varios grupos trabajan con plasmas de relevancia para la fusión nuclear. En primer lugar, en la máquina lineal de plasma de Santander (SPLM) del Departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Cantabria (UC), se

realizan estudios de fluctuaciones y turbulencia enfocados desde una descripción estadística y su comparación con los resultados que se obtienen en plasmas de fusión. El plasma se genera en una cámara de vidrio cilíndrica, de diámetro de 7 cm y longitud de 1 m, que se aloja dentro de una guía de onda circular de 8 cm de diámetro [63]. La generación del plasma se produce incidiendo longitudinalmente con ondas electromagnéticas de 2.45 GHz con diversas polarizaciones obtenidas por medio de una unión *turnstile*. La potencia incidente varía en el rango 0.6 a 6 kW y el dispositivo puede operar en régimen continuo. El plasma está longitudinalmente magnetizado por medio de seis bobinas que generan un campo magnético axial de entre 0.05 y 0.15 T. La máquina dispone de un sistema de distribución de gases que permite elegir el tipo de gas base (He, Ne y Ar) con $0.1 \leq p \leq 10$ kPa, densidad electrónica media, \bar{n}_e , entre 10^9 y 10^{12} cm⁻³ y T_e que puede llegar hasta 30 eV en algunas configuraciones. Las fluctuaciones de densidad electrónica varían entre el 20 % en el centro de la descarga y el 50 % en el exterior, siendo las fluctuaciones de potencial inferiores al 5 %. En la actualidad se ha realizado una mejora de la máquina pasando la cámara de vacío a ser de acero inoxidable y aumentando el diámetro de la misma a 15 cm, con lo que el volumen de ésta aumenta en más de un factor 4 respecto al de la máquina anterior.

El grupo de Fluidos y Plasmas de la Escuela Técnica de Ingeniería Industrial de Ciudad Real, de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCIM), trabaja con un sistema de generación de plasmas mediante descargas eléctricas intensas del tipo *Z-Pinch* [64, 65]. En estudios preliminares sobre la dinámica del plasma generado, se pudo observar la dinámica de la implosión de la lámina de corriente (una cáscara cilíndrica de plasma) con una cámara ultrarrápida que permite observar el fenómeno en las longitudes de onda de la radiación visible [66]. En ella se puede apreciar un *Z-pinch* cuando se inicia su compresión, a los 400 ns de iniciarse la descarga eléctrica que lo genera y cerca del momento de máxima compresión, 200 ns más tarde, cuando se forma la columna de plasma o *pinch* con un radio diez veces menor que el radio original de la lámina de corriente [67]. Para formar el plasma, que suele durar entre 1 o 2 μ s, descarga un banco de condensadores, cargados a 40 kV, en una cámara de experimentación llena con gas de deuterio a una presión del orden de 130 Pa. Como resultado llegan a alcanzar valores de n_e y T_e del orden de 10^{19} cm⁻³ y 10 keV, respectivamente. También se cuenta con un sistema de generación de plasma de metales del tipo conocido como alambre explosivo [68], en el que se descarga un banco compuesto por dos condensadores, sobre un alambre fino con diámetros variando entre los 100 y los 250 μ m. De esta manera se genera un plasma del que forman parte el metal vaporizado y la atmósfera que lo rodea. Este plasma se comprime por efecto de la presión creada por el campo magnético inducido por la corriente que circula por el propio plasma, de manera similar a lo sucede en el *Z-Pinch*.

El TJ-II es un *stellarator* del tipo *heliac* con un radio mayor de 1.5 m, un radio menor medio de 0.22 m y un campo magnético toroidal de 1 T [69] ubicado en el Laboratorio Nacional de Fusión (LNF), Ciemat. Los plasmas de hidrógeno, de deuterio o de helio se crean y se calientan empleando una potencia de microondas hasta 500 kW, sintonizada al

segundo armónico (53.2 GHz) de la resonancia ciclotrónica de los electrones. Los plasmas conseguidos duran unos 250 μs , siendo la T_e máxima alcanzada en el centro de 2 keV, la \bar{n}_e próxima a 10^{13} cm^{-3} y la temperatura iónica del orden de 0.1 keV. Además, con 1 MW de calentamiento adicional, proporcionado por la inyección de haces de átomos neutros, se alcanzan densidades más elevadas ($\leq 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$). Finalmente, aunque la geometría de su cámara de vacío es complicada, y la estructura del plasma formado es tridimensional, el TJ-II está dotado con 96 puertos de acceso para una amplia variedad de diagnósticos que, en muchos casos, son fruto de colaboraciones nacionales o internacionales.

En el epígrafe 2 se revisan las técnicas de diagnosis estándar que se han estado utilizando para estudiar o controlar los plasmas descritos en esta sección. Al objeto de agrupar técnicas basadas en fenómenos de física relacionados entre sí, se ha dividido el epígrafe en tres subepígrafes en los que se revisan brevemente los parámetros que se pueden medir y la física asociada a los diagnósticos antes de presentar ejemplos concretos de las técnicas utilizadas.

2. Diagnosis de plasmas

Las magnitudes características del plasma que fundamentalmente nos interesan podrían agruparse en 4 categorías: a) *densidades de especies*: se trata de la n_e , la densidad iónica n_i , la densidad de especies excitadas en cualquier nivel excitado, o en cualquier estado de ionización; b) *temperaturas de especies*: son la T_e , la temperatura iónica T_i , la de neutros (gas plasmógeno), pero también otras temperaturas no cinéticas como la de excitación e ionización, o la de radiación, rotacional y vibracional. Muy importante también resulta la determinación de las funciones de distribución de energías de las partículas; c) *potenciales, campos y corrientes*: potencial del plasma, potencial flotante, campo eléctrico de mantenimiento, campo magnético, corrientes de calentamiento; d) *inhomogeneidades e inestabilidades*: son también características por determinar de fundamental interés sobre todo en plasmas astrofísicos y en plasmas de fusión.

Las técnicas de diagnosis se basan en fenómenos físicos que se dan dentro del plasma de forma natural o mediante su interacción desde el exterior con el mismo. Caracterizan el plasma y su estado mediante magnitudes medibles y/o computables. Con independencia del tipo de plasma al que se apliquen, existen distintas clasificaciones de las técnicas. Históricamente se desarrollaron técnicas de: a) *diagnosis por sondas*, donde se incluyen sondas eléctricas estáticas y dinámicas (simples y múltiples), y sondas magnéticas; b) *diagnosis espectroscópica* basada en el análisis espectral de la radiación continua o de líneas emitida de forma espontánea o inducida por el plasma, y/o absorbida por éste; c) *diagnosis electromagnética* determinada por la interacción del plasma con ondas electromagnéticas que se propagan o son reflejadas por éste, lo hacen oscilar de forma resonante en el interior de cavidades, o mediante guías de onda y antenas, o sufren interferencias en su seno; d) *otras técnicas de diagnosis*: donde pueden incluirse las que claramente no respondan a las anteriores categorías. De forma no excluyente, las técnicas pueden ser *experimentales* o *computacionales*, según se use instrumentación experimental, o, por el contrario, se trate de modelos de física computacional; *directas* o *indirectas*, si determinan valores independientemente de hipótesis

y modelos, o estos valores están precisamente condicionados o influidos por estas hipótesis, a veces fuertemente; *activas* o *pasivas*, dependiendo de que se estimule de alguna manera al plasma para analizar su respuesta y así realizar la diagnosis, o que sólo se analice lo que el plasma expulsa de forma natural (partículas, fotones...); *simples* o *múltiples*, según se determine una sola magnitud en la diagnosis, o varias al mismo tiempo (de forma simultánea). La mayoría de los diagnósticos gozan de más de una de estas características a la vez y en lo que sigue los analizamos con algo más de detalle.

2.1. Diagnosis por sondas

La diagnosis de plasmas por sondas permite la determinación de las principales características de los mismos como n_e o T_e , potenciales de plasma, V_p , y flotante, V_f , función de distribución de energía electrónica, corrientes eléctricas así como campos eléctricos y magnéticos. Las sondas son finísimos conductores de diversa geometría que se introducen en el plasma y que capturan partículas cargadas, o detectan campos eléctricos y magnéticos para su diagnosis. Existen distintos tipos de sondas que podemos agrupar en eléctricas y magnéticas, simples y dobles, estáticas y dinámicas. Para sondas eléctricas, mediante la curva característica $I-V$ de la sonda, puede diagnosticarse tanto en situaciones estacionarias como transitorias n_e , T_e , y los potenciales V_p y V_f . Para ello, se utilizan las distintas regiones de dicha curva, en cada una de las cuales dominan o compiten las corrientes electrónicas e iónicas captadas por la sonda. Dicha discriminación se consigue polarizando positiva o negativamente la sonda simple respecto al plasma. En doble sonda, la polarización se realiza en una de ellas respecto a la otra. Las sondas eléctricas dinámicas superponen una señal de RF a una sonda estática o a una doble sonda, pudiéndose analizar las resonancias del sistema sonda-plasma. Dada la rapidísima respuesta de los electrones del plasma a cualquier perturbación, la diagnosis por sondas también resulta útil en situaciones no estacionarias del plasma, en particular en los procesos de creación y de extinción de los mismos.

Dado los múltiples parámetros que se pueden medir, muchos de los grupos que aparecen en el apartado 1 utilizan sondas como diagnóstico básico. Además, dada su flexibilidad, cada grupo ha adaptado las sondas a sus condiciones de trabajo. Así, por ejemplo, el grupo IEM-CSIC utiliza fundamentalmente sondas dobles para determinar densidades de carga y T_e . La particular configuración de sus reactores, con el cátodo conectado a tierra, ha impedido utilizar anteriormente sondas simples referidas a dicha tierra, dados los altos potenciales positivos del plasma. Recientemente se ha comenzado a usar sondas simples polarizadas respecto al ánodo, gracias a amplificadores opto-acoplados diseñados especialmente para resistir los voltajes necesarios. Otro ejemplo son las sondas de Langmuir emisoras y colectoras que se emplean en la ETSIA-UPM para determinar las propiedades espaciales del plasma emitido por los propulsores. En este caso, las primeras permiten medir el potencial local del plasma y las segundas la temperatura y densidad del mismo. Las sondas emisoras son de fino hilo metálico (de 8 mm de diámetro) calentado a temperaturas por encima de los 2000 K por corriente continua que emite al plasma electrones por emisión termoiónica. Las sondas colectoras son

esferas (de unos 0.5 cm de diámetro) o cilindros (1.5 cm de largo) eléctricamente polarizados que colectan corriente del plasma. Otro ejemplo más son las descargas luminiscentes, como las que utiliza el grupo UO, que emplean una sonda de Langmuir [70, 71] para medir la densidad de electrones e iones, el potencial del plasma, la temperatura electrónica y la distribución en energía de los electrones. También un grupo de la UCO utiliza sondas simples y dobles para la caracterización de descargas *glow* en DC tanto en régimen de descarga continua como pulsada, pudiéndose en este último caso seguir la rápida evolución temporal durante transitorios hasta determinar la función de distribución de energía de las partículas dependiente del tiempo [32, 33].

Por otro lado, en el SPLM se usa un *array* Langmuir/Mach de 6 *pins* o sondas de tungsteno de 0.5 mm de diámetro y 2 mm de longitud cada uno. En este caso, las 4 sondas centrales pueden funcionar en configuración o disposición de doble sonda proporcionando n_e y T_e , o bien en disposición de triple sonda que, junto con la cuarta sonda flotante, suministra información de densidad, temperatura y potenciales así como sus fluctuaciones. También es posible, si se muestra con una frecuencia suficientemente alta, determinar el flujo turbulento inducido por las fluctuaciones [72]. Asimismo, la cerámica que atraviesan las cuatro sondas centrales en esta configuración de sondas sirve como muro entre las dos externas para lograr una disposición tipo sonda Mach, en la que a partir de las corrientes de saturación de dichas sondas, y conforme al modelo de Hutchinson [73], se determina el número de Mach. Típicamente se encuentran flujos subsónicos ($0 < M < 0.5$) en sus plasmas, en los que una velocidad de adquisición ≥ 200 kHz/canal permite realizar estudios de fluctuaciones de las magnitudes mencionadas con estadísticas adecuadas.

Finalmente el TJ-II está dotado de dos sistemas de desplazamiento rápido con sondas de Langmuir/Mach con cabezas distintas [74]. Dichas sondas proporcionan medidas locales de densidad, potencial y temperatura, junto con sus fluctuaciones, en el borde de los plasmas. Además, conociendo estos parámetros se puede deducir el flujo de partículas y la velocidad poloidal del plasma, así como estudiarse el nivel de transporte turbulento en el borde del mismo, que es de interés para entender las propiedades globales de confinamiento de las partículas.

2.2. Diagnóstico espectroscópico

El estudio de la radiación emitida o absorbida por el plasma es el fundamento de la diagnosis espectroscópica. De forma genérica se trata de obtener la intensidad radiante absoluta o relativa de emisión o absorción. El rango de trabajo va desde el infrarrojo hasta la radiación X, pasando por el visible, el ultravioleta, etc. Existen técnicas espectroscópicas de emisión o absorción, atómica o molecular, discreta o continua, absoluta o relativa, para la determinación de n_e , T_e , la temperatura de neutros (gas) T_{gas} , y la densidad de especies excitadas. Entre ellas destacamos la *dispersión Thomson* (TS) con el que se determinan n_e y T_e ; el *ensanchamiento Stark* que permite la determinación de n_e si se conoce T_e ; la espectroscopía atómica de emisión y el estudio de la separación del equilibrio en el plasma como el diagrama de Boltzmann o el salto de Saha para la determinación de la densidad de especies excitadas y de las temperaturas de excitación y de

ionización indicativas de T_e ; las *bandas vibro-rotacionales* para la determinación de la temperatura rotacional y vibracional indicativas de T_{gas} en presencia de especies moleculares; el *ensanchamiento Doppler* para medir T_{gas} o T_e ; la *radiación de continuo* que tiene su origen en los procesos de recombinación radiativa y/o de frenado (*Bremsstrahlung*) para la medida de n_e y T_e ; la *dispersión de Rayleigh* y la *dispersión de Raman* en los que la dispersión elástica e inelástica de fotones por los electrones ligados de átomos permite la determinación de la temperatura T_{gas} , entre las más importantes. También existen las técnicas espectroscópicas de interrupción que determinan distintas características del plasma basándose en el comportamiento del mismo al romper bruscamente los balances estacionarios, y la *espectroscopía de masas* que determina importantes propiedades de las partículas como su naturaleza, identificación y energías.

Dado el gran número de técnicas y la gran variedad de información que de ellas puede obtenerse, no es extraño que se hayan implementado numerosas técnicas espectroscópicas. Así, por ejemplo, con respecto a plasmas de interés o aplicación industrial, el grupo ICMM-CSIC utiliza la espectroscopía de emisión óptica con el fin de identificar las especies presentes en su plasma durante el proceso de deposición, y en algunos casos se ha utilizado la actinometría para cuantificar la intensidad de las líneas de emisión. Además (en colaboración con F. J. Gordillo Vázquez, ahora en el IAA-CSIC en Granada), han estudiado diferentes tipos de plasmas de hidrocarburos [7, 12, 75, 76], en los que se han determinado T_e [75] y la función de distribución de energía electrónica (EEDF) en plasmas de Ar/H₂/C₂H₂ generados por RF a baja presión (13.3 Pa) [75] de la concentración de C₂H₂ que determina los diámetros de las partículas de nanocarbono. Otro ejemplo es el grupo UO. La muestra a analizar en su cámara está sometida a la descarga que a su vez contiene átomos extraídos que se difunden en el plasma [77, 78]. Han estudiado el efecto de la adición de pequeñas cantidades de gas molecular (H₂, N₂, O₂) al gas de descarga con técnicas espectroscópicas, en combinación con espectroscopía de masas, para determinar los mecanismos de excitación e ionización de las especies presentes.

Otro grupo que trabaja con plasmas de interés o aplicación industrial es el grupo US-CSIC. En su caso analizan los diferentes flujos de partículas que llegan al material con la espectroscopía de masas, partículas que, o bien se depositan en dicho material llegando a formar parte de él, o bien desencadenan procesos físico-químicos que alteran su nanoestructura. Por ejemplo, han visto que uno de los flujos energéticos que puede condicionar el fenómeno fuertemente es el correspondiente a los iones altamente energéticos, y se investigan estos flujos energéticos y su influencia en la nanoestructura de los materiales durante su crecimiento [13]. El cambio nanoestructural se ha estudiado usando un espectrómetro de masas de última generación y se ha concluido que el constante bombardeo de iones negativos de oxígeno atómico de alta energía (entre 20 y 500 eV) durante el crecimiento causa la desaparición de los motivos verticales. Estos iones rápidos, a diferencia de los que se producen en el volumen de plasma cuya energía cinética está definida por el potencial de plasma (en torno a 10 eV), se producen debido a la fuerte interacción entre el plasma y el blanco de silicio, parcialmente oxidado.

En el campo de investigación básica, en la UVA estudian la evolución temporal de plasmas a partir de la emisión de la luz emitida a varias longitudes de onda. Por ejemplo, mediante la realización de un diagrama de Boltzmann se determina en el instante deseado la temperatura de excitación de los niveles de partida involucrados en las transiciones consideradas en dicho diagrama, temperatura que para los plasmas considerados usualmente se asimila a T_e . También en la UCO, los diversos grupos utilizan tanto la espectroscopía óptica de emisión y absorción en el visible como la espectroscopía de masas. En estos años, a veces en colaboración con otros grupos, se han usado de forma sistemática: diagramas de Boltzmann y de Saha para el estudio de la separación del equilibrio de plasmas producidos por microondas en distintos regímenes de baja, media y alta presión; la diagnosis de temperaturas de excitación, rotacional y cinéticas de electrones, iones y especies neutras; técnicas combinadas de ensanchamiento Stark así como TS para la diagnosis de n_e y T_e ; la aplicación de modelos computacionales colisional-radiativos complementarios a las técnicas experimentales para el estudio de procesos de sobrepoblación y subpoblación de especies excitadas fuera del equilibrio o LTE; el cociente línea-continuo adyacente para la determinación de temperatura electrónica; y la espectrometría de masas para la diagnosis de plasmas en DC a baja presión, complementaria a las técnicas de sondas electrostáticas que permite la identificación de especies en el plasma así como sus funciones de distribución de energía, como técnicas más destacables.

Finalmente, en el caso de los plasmas creados por el grupo de la UPV/EHU se produce el análisis de las energías cinéticas de los iones a una distancia de 350 mm del material en un sistema experimental que utiliza un espectrómetro de masas en tiempo de vuelo y un analizador electrostático (AEE) que actúa como filtro de energías. El AEE consiste en dos sectores esféricos concéntricos de 160° , y la aplicación de una diferencia de potencial (ΔV) entre ambos sectores permite que iones de una energía seleccionada sean enfocados hacia un detector de placas multicanal colocado al final de un tubo de vuelo. Mediante un escaneado de ΔV se recogen todas las energías cinéticas de los iones en función de su carga y energía [79]. Simultáneamente, una serie de rejillas y un colector de cobre colocados entre la muestra y la entrada del AEE hacen posible diagnosticar la corriente total de iones y su tiempo de vuelo en una dirección perpendicular a la muestra. Las distribuciones obtenidas a bajas fluencias del láser son sencillas; pero, para la mayoría de los metales estudiados (Al, Cu, Co, Sn, Pb y W), fluencias mayores de unos 5 J/cm^2 producen distribuciones estructuradas. Mediante un análisis de los resultados también se obtienen valores medios para algunos parámetros del plasma como n_e y T_e . En algunos casos, la distribución muestra una estructura con dos máximos para cada ión. Variaciones de la fluencia láser han demostrado que, para las cargas más bajas, el máximo que aparece a bajas energías mantiene la misma energía cinética, mientras que el de altas energías muestra una importante variación.

En el área de plasmas de interés astrofísico, el grupo IEM-CSIC, que trabaja con descargas luminiscentes de especies moleculares en reactores de laboratorio, puede identificar las distintas especies involucradas en el plasma y obtener además datos sobre T_{exc} o T_{gas} , así como el grado de disocia-

ción de algunos de los precursores, mediante el análisis de espectros de emisión molecular en el visible obtenidos mediante espectroscopía dispersiva y espectroscopía de emisión y absorción en el infrarrojo mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier. Estas técnicas se usan de forma complementaria a la espectrometría de masas dado que su cámara está dotada con dos espectrómetros de masas cuadrupolares que les permite medir por separado las concentraciones de las especies neutras o iónicas del plasma. En el primer sistema, la detección de los neutros se realiza tras ionización por impacto electrónico, discriminando su relación masa/carga en un filtro cuadrupolar. En algunos casos, se han podido detectar radicales por "ionización en el umbral" (referido a la de energía de impacto de los electrones). En el segundo sistema, los iones procedentes del plasma se detectan sin necesidad de ionización posterior en el espectrómetro. En este último caso, un analizador de energía incorporado al mismo permite obtener las distribuciones de energías iónicas. Con este sistema se ha desarrollado recientemente una técnica que permite identificar iones de igual relación carga/masa pero distinta composición, así como distinguir algunos procesos particulares en el interior del plasma y en la vaina [80].

Para el estudio del magnetismo de la atmósfera solar, las técnicas espectro-polarimétricas son fundamentales porque los campos magnéticos del plasma solar dejan la huella de su presencia en la polarización de las líneas espectrales del espectro solar, lo que ocurre fundamentalmente por efecto Zeeman y efecto Hanle [81]. El grupo IAC estudia los campos magnéticos solares en un rango de intensidades que va desde ~ 0.001 gauss hasta los miles de gauss característicos de las manchas solares. Algunas de las técnicas de diagnóstico utilizadas se basan en las señales de polarización circular (perfil de Stokes V) y lineal (perfiles de Stokes Q y U) producidas por el efecto Zeeman, las cuales son especialmente útiles para estudiar regiones significativamente magnetizadas ($B > 100$ gauss) y relativamente frías ($T < 10^4 \text{ K}$) de la atmósfera solar [82-84]. Además, utilizan el efecto Hanle o modificación de la polarización lineal producida por procesos de dispersión en una línea espectral debida a la presencia de un campo magnético inclinado con respecto al eje de simetría de la radiación anisótropa incidente, la cual produce bombeo óptico en el sistema atómico. Este efecto es especialmente sensible entre 0.1 y $10 B_H$, donde B_H es el campo magnético crítico para el cual la separación de las componentes π y σ es igual a la anchura natural (mucho menor que la anchura térmica de la línea espectral solar considerada). Este grupo ha desarrollado técnicas de diagnóstico basadas en los efectos Hanle y Zeeman, demostrando que son especialmente útiles para estudiar regiones moderadamente y débilmente magnetizadas de la atmósfera solar ($B \leq 100$ gauss), como las que se encuentran en la cromosfera, región de transición y corona [85-87]. Además, el efecto Hanle permite detectar la presencia de campos magnéticos aleatoriamente orientados por debajo del límite de resolución de los telescopios actuales, lo que ha permitido demostrar que las regiones aparentemente no magnetizadas de la fotosfera solar sí lo están, con una muy importante densidad de energía magnética [88].

Finalmente, en el campo de plasmas de fusión nuclear, las técnicas espectroscópicas juegan un papel importante

para determinar los parámetros básicos así como para investigar fenómenos de interés. Por ejemplo, en el TJ-II se usa una amplia gama de técnicas tanto pasivas como activas para diagnosticar el plasma desde su borde frío hasta su centro caliente [69]. De hecho, se aprovecha todo su espectro electromagnético de emisión, desde los rayos X hasta las microondas. Con respecto a los diagnósticos pasivos, se pueden destacar los conjuntos de bolómetros multicanales localizados en distintas localizaciones toroidales del toro que miden la potencia radiada por el plasma [89]; los monitores de la línea $H\alpha$, para estudiar la física del borde; la espectroscopía óptica, para identificar impurezas y seguir su evolución temporal [4]; la radiometría de emisiones ciclotrónicas por electrones para obtener T_e en distintas posiciones radiales [90]; los monitores de rayos X para medir T_e cuando $n_e \geq 1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ y para estudiar las poblaciones de electrones supratérmicos [91]; y los analizadores de partículas neutras (espectrómetros de masa) para crear un perfil de la temperatura de los protones mediante el intercambio de carga entre protones y átomos neutros [92]. Con respecto a los sistemas activos se pueden destacar el TS para obtener perfiles radiales de n_e y T_e [93] o la inyección de materia mediante ablación por láser [94] y su seguimiento con espectroscopía para estimar los tiempos de confinamiento y la acumulación de las partículas. Por otra parte, existen otros sistemas activos instalados como son, por ejemplo, la inyección de gas para estimular emisiones espectrales en el borde para el estudio de la turbulencia con cámaras rápidas [95]; un haz de átomos rápidos de hidrógeno acelerados a 30 keV para obtener T_e , la velocidad de las impurezas y el campo eléctrico radial mediante la espectroscopía de recombinación por intercambio de carga [96]; o un haz supersónico de helio para reconstruir perfiles de n_e y T_e en el borde del plasma mediante el método de los cocientes de intensidades de línea [97].

2.3. Diagnóstico electromagnético

El estudio de la interacción de ondas electromagnéticas de baja intensidad con plasmas constituye una forma de obtener información sobre éstos. Durante esta interacción, las ondas electromagnéticas viajan por el plasma usándolo como medio de propagación de tal manera que las características propagativas de los campos electromagnéticos (n.º de ondas β , atenuación α) quedan ligadas o determinadas por las características constitutivas de dicho medio (las técnicas puramente propagativas). Durante esta propagación, las ondas pueden sufrir interferencias entre ellas, reflejarse y/o refractarse en sus contornos así como dispersarse, todo lo cual posibilita la diagnosis al estar los anteriores fenómenos ondulatorios determinados por las condiciones del plasma (las técnicas de *interferometría* y *reflectometría*). Pero estas ondas también pueden inducir oscilaciones forzadas en los plasmas excitando sus frecuencias de resonancias, relacionadas de una forma u otra con la frecuencia del plasma ω_p , lo que se consigue con cavidades resonantes que contienen plasma, guías de onda rectangulares atravesadas por tubos de plasma y antenas emisoras/receptoras colocadas en las cercanías de éstos (las *técnicas resonantes*). El modelo dieléctrico del plasma en interacción con campos electromagnéticos constituye una aproximación exitosa que resulta necesaria para relacionar las propiedades plasma/onda. En el modelo,

la permitividad ϵ_p y la conductividad σ del plasma son complejas y función de tres frecuencias de interés: ω_p frecuencia del plasma, ν_e frecuencia de colisión para electrones y ω frecuencia de excitación de la onda electromagnética.

Como con las técnicas anteriores, también los diferentes grupos han desarrollado diagnósticos basados en técnicas electromagnéticas. Por ejemplo, en la UVA estudian la evolución temporal de n_e , del orden de 10^{17} cm^{-3} , mediante interferometría láser a dos longitudes de onda (543.0 y 632.8 nm) a partir de las variaciones de refractividad producidas en el plasma durante una descarga. Otro ejemplo, en el SPLM se determina n_e entre 10^9 y 10^{12} cm^{-3} por medio de un interferómetro de 8 mm. También, el grupo UCLM estudia la evolución de la dinámica de los plasmas generados en el *Z-pinch* y en el alambre explosivo, que se están desarrollando, con fotografías *Schlieren* y *shadowgraphy* que permiten estudiar las variaciones y gradientes de densidad respectivamente. Ambos sistemas están basados en la interferencia de ondas luminosas provocada por las diferencias en el índice de refracción del medio que atraviesa, que en el caso de plasmas se pueden correlacionar con su densidad. Finalmente, en el TJ-II se utiliza la reflectometría Doppler de microondas para medir la velocidad perpendicular de las fluctuaciones de densidad y el campo eléctrico cerca del borde [98] y la interferometría de dos colores para seguir la evolución de densidad media de línea a lo largo de una descarga [99].

También un grupo de la UCO utiliza diagnósticos electromagnéticos para estudiar la propagación de ondas electromagnéticas a lo largo de columnas cilíndricas de plasma producidas por microondas (una onda electromagnética a 2.45 GHz crea y se propaga por el plasma al mismo tiempo) de radio entre 1.5 y 4.5 mm. Mediante esta técnica puramente propagativa, se determinaron las constantes β y α de la onda electromagnética, y su relación con las características del plasma dadas por las frecuencias ω_p y ν_e . Bajo condiciones del modelo dieléctrico del plasma en interacción con ondas electromagnéticas, estas dos frecuencias permiten la determinación de n_e y T_e [100]. Asimismo, estudiando el transitorio en los primeros instantes de la extinción, pudieron determinarse coeficientes y frecuencias efectivas de difusión ambipolar y de recombinación en las columnas de plasma [101]. Por otro lado, mediante técnicas resonantes, utilizando la resonancia dipolar de la columna cilíndrica de plasma (o resonancia principal de Tonk-Dattner) se determinó n_e durante el proceso transitorio de extinción del plasma y su coeficiente de difusión ambipolar D_a [102].

3. Diagnósticos en desarrollo

En esta sección se destacan nuevos diagnósticos, o modificaciones de otros, que se están llevando a cabo en las distintas áreas de investigación de interés aquí. Estos desarrollos se presentan con una descripción de cada uno de ellos y de la nueva física investigada.

1. En la actualidad, el grupo ICMM-CSIC está estudiando plasmas ECR de mezclas CH_4/Ar para la formación de capas de carbono amorfo hidrogenadas con estructura tipo fullerenos. Durante el proceso de deposición, se aplica un voltaje negativo al portasustratos que afecta a la distribución del plasma en su cámara de reacción. De esa manera, el valor del potencial medido en el entorno del sustrato, que depen-

de de sus características eléctricas, suministra información sobre las características de la vaina generada en la superficie de dicho sustrato, de manera que variando el valor de la tensión aplicada y el tipo de sustrato se espera determinar, al menos cualitativamente, el valor del potencial en sus proximidades.

2. En el US-CSIC usan la espectrometría de masas para caracterizar la interacción plasma/superficie, y, en particular, la llegada de diferentes especies tanto neutras como cargadas eléctricamente. De esta forma, analizan los diferentes flujos de partículas que llegan al material que, o se depositan, llegando a formar parte de él, o inducen procesos físicos y químicos que alteran su nanoestructura. En particular, les interesan los flujos energéticos de iones altamente energéticos, que miden con un espectrómetro de masas de última generación, para conocer su influencia en la nanoestructura de los materiales durante su crecimiento [13]. Así, se ha concluido que el constante bombardeo de iones negativos de oxígeno atómico de alta energía (entre 20 y 500 eV) durante el crecimiento causa la desaparición de los motivos verticales. Además, se ha concluido que estos iones, a diferencia de los que se producen en el volumen de plasma, y cuya energía cinética está definida por el potencial de plasma (en torno a 10 eV en los casos estudiados), se producen debido a la interacción entre el plasma y el blanco, parcialmente oxidado, de silicio.

3. En la actualidad, el grupo de la UO está estudiando la dinámica de los plasmas generados por descargas luminiscentes de radiofrecuencia pulsada. Mediante espectrometría óptica están estudiando los procesos de transporte en la región del *afterglow* espacial, y la distribución espacial y temporal de especies atómicas e iónicas. En particular, es de especial interés la distribución de los átomos metaestables de Ar que, mediante procesos Penning, darán lugar a la ionización de otros átomos presentes en la descarga. Además, utilizando la espectrometría de masas están investigando la influencia que el diseño de la cámara de descarga tiene en la respuesta temporal de las señales iónicas, en la recombinación de las distintas especies presentes y en la ionización resultante en el plasma. Todos estos estudios tienen como objetivo optimizar las prestaciones de los instrumentos de descarga luminiscente acoplados a espectrómetros de masas de tiempo de vuelo que se utilizan con fines analíticos.

4. En la UVA han desarrollado y aplicado la técnica de espectroscopía de polarización por absorción de dos fotones en plasmas de hidrógeno a la transición 1S-2S. Consiste en la detección del ligero cambio en la polarización de un haz de medida linealmente polarizado cuando se superpone en el plasma con un haz de bombeo circularmente polarizado. Sus ventajas son que presenta alta resolución temporal (ns) y espacial (200 μm) y sólo se produce señal en la región de superposición de ambos haces convenientemente focalizados. Además, como la absorción de dos fotones ocurre en la escala de fs, la señal no se ve perturbada por ningún tipo de colisiones, y por ello se puede aplicar a presiones elevadas y no se ve afectada por la radiación del plasma. Por otra parte, la señal está libre de ensanchamiento Doppler si se toman ambos haces propagándose en sentidos opuestos pero si se propagan en el mismo sentido se puede medir este ensanchamiento y por tanto la temperatura cinética. Además, la técnica permite la medida de absorciones pequeñas, sola-

mente se ve limitada por la transmitancia residual experimental de los dos polarizadores cruzados, que debe ser del orden de 10^{-8} , valor de fondo sobre el que se detecta la señal. Se ha aplicado la técnica a distintos medios (epígrafe 1) y se han obtenido diferentes parámetros de especial relevancia: la densidad absoluta de átomos en el estado fundamental, la temperatura cinética, el ensanchamiento Stark y la caída del campo eléctrico en la zona oscura de cátodo en la descarga de cátodo hueco.

5. Utilizando técnicas de doble pulso, el grupo de la UPV/EHU ha estudiado el acoplamiento entre un pulso láser y el plasma. El estudio de este acoplamiento ha permitido desarrollar técnicas para modificar la energía y el grado de ionización en los plasmas. Se ha observado que el pulso láser de sondeo, convenientemente retrasado tras el pulso generador del plasma, modifica el número de iones de carga +1 y la distribución energética de los mismos [79], permaneciendo invariables los de carga superior. Los resultados que se vienen obteniendo confirman la importancia de la interacción láser-plasma en los plasmas producidos con láseres de nanosegundos, y posibilitan estudiar su variación temporal: transmisión y absorción de radiación por el plasma, variación temporal de la densidad del plasma, etc. [103]. La consideración de esta interacción resulta fundamental para explicar las energías cinéticas que se observan en nuestros experimentos. En la actualidad el grupo está realizando estudios de las distribuciones energéticas en los plasmas producidos con láseres de femtosegundos, así como del acoplamiento con pulsos láser de diferente anchura temporal. Paralelamente analizan el proceso de aceleración por formación de doble capa eléctrica mediante un modelo PIC (*particle-in-cell*).

6. Recientemente, en el IEM-CSIC, se ha comenzado a usar sondas simples polarizadas respecto al ánodo. La particular configuración de sus reactores, con el cátodo conectado a tierra, ha impedido utilizar anteriormente sondas simples referidas a dicha tierra, dados los altos potenciales positivos del plasma. Además, han desarrollado una técnica que permite identificar iones de igual relación carga/masa pero distinta composición con el espectrómetro de masas cuadrupolar que usan para medir las concentraciones de las especies iónicas del plasma. Con esta mejora han podido distinguir algunos procesos particulares en el interior del plasma y en la vaina [80]. Por otra parte, el conjunto de diagnósticos disponibles, apoyados por la comparación entre los datos experimentales y las predicciones teóricas de modelos cinéticos desarrollados por el grupo, les ha permitido una caracterización bastante exhaustiva de los plasmas fríos a bajas presiones generados a partir de diferentes precursores, demostrando que la química de estos plasmas está dominada por reacciones bimoleculares sin barrera entre iones y neutros, y reacciones en superficie de átomos, iones y radicales.

7. La aplicación de las técnicas de diagnóstico desarrolladas por el grupo IAC, las cuales permiten inferir el campo magnético a partir de observaciones espectro-polarimétricas obtenidas con telescopios terrestres y espaciales, así como los modelos numéricos obtenidos mediante supercomputación [55], ha mejorado considerablemente el conocimiento del magnetismo de la atmósfera solar. Sin embargo, aún queda mucho por investigar. De hecho, dada la enorme in-

homogeneidad y dinamismo del plasma de la atmósfera solar, es muy importante lograr el desarrollo de telescopios de gran apertura, optimizados para facilitar medidas espectro-polarimétricas, tales como el Telescopio Solar Europeo [104] o el telescopio espacial SOLAR-C de la Agencia Espacial Japonesa [105]. Asimismo, es necesario desarrollar polarímetros para telescopios espaciales con vistas a poder medir la polarización de la luz solar en la zona ultravioleta del espectro, pues las líneas resonantes UV contienen mucha información sobre el campo magnético en la región de transición y corona del Sol [106]. Por este motivo, en colaboración con Japón y Estados Unidos, se ha iniciado el desarrollo de un experimento financiado por la NASA para observar la polarización de la línea Ly- α del hidrógeno (121.57 nm) desde un cohete. La observación y análisis de la radiación solar con novedosos telescopios y polarímetros, su interpretación mediante técnicas de diagnóstico cada vez más sofisticadas y la experimentación numérica utilizando instalaciones de supercomputación permiten a los astrofísicos explorar un dominio de la física de plasmas que no es posible recrear en un laboratorio en la Tierra. Esta física es necesaria para poder llegar a entender el origen y los mecanismos del magnetismo en astrofísica. Pero además, esto es crucial porque el “clima” del espacio que rodea a la Tierra está modulado y se ve afectado por la propia actividad magnética del Sol.

8. Con el objeto de enriquecer el conocimiento de los TLE, el grupo de Plasmas Transitorios en Atmósferas Planetarias del IAA-CSIC ha diseñado y construido el GRASSP, un instrumento formado por un espectrógrafo y un polarímetro. El espectrógrafo, que sigue un diseño clásico colimador-red-cámara, cubre 110 nm de rango espectral variable (fijado entre 655 y 765 nm) con una resolución espectral de 0.4 nm, esto es, entre 5 y 10 veces mayor que la de los espectrógrafos usados hasta la fecha para espectroscopía de TLE. Esta mayor resolución espectral les permitirá estimar por primera vez la temperatura rotacional (o del gas) en los plasmas TLE. La rendija, cuya imagen determina la resolución además del campo observable, se ilumina con un telescopio de 170 mm de focal. Tras la rendija, una lente de campo de 50 mm modifica la posición de la pupila para evitar viñeteo del colimador a la vez que acorta la envolvente del instrumento haciéndolo más corto. En paralelo, el polarímetro (con seis pupilas de entrada) se ha diseñado con idea de determinar, a partir de una única imagen (exposición) de un TLE, los cuatro parámetros de Stokes que permitirán determinar si las emisiones ópticas del mismo están polarizadas y, en caso de estarlo, cuantificar su grado y tipo de polarización (lineal o circular). Hasta la fecha no se han realizado estudios de polarimetría de los plasmas de aire generados por los TLE en la mesosfera terrestre. Finalmente, el instrumento se compone de diferentes subsistemas controlables remotamente lo que ha permitido su instalación en el CAHA.

9. Recientemente el grupo UCIM ha adquirido un sistema de cámara de barrido ultrarrápida o Streak que les permitirá observar en una misma imagen la evolución temporal del plasma tipo *Z-pinch* en una posición espacial determinada. El equipo adquirido permite observar escalas temporales desde el medio nanosegundo hasta los milisegundos, permitiendo el estudio tanto de periodos concretos dentro de

la dinámica del plasma como observar toda la dinámica del fenómeno en un solo experimento. Tales experimentos pueden ayudarles a entender, por ejemplo, la relación entre las ondas de choque que generan los plasmas en la atmósfera y las condiciones iniciales del plasma que se forma.

10. En la actualidad varios grupos están implementando nuevas técnicas, o mejoras a técnicas ya existentes, con el objetivo de sacar el mayor provecho científico del TJ-II [107]. Por ejemplo, se han realizado con éxito varias pruebas de principio de la técnica de doble pulso en el sistema de TS que demuestra la viabilidad de realizar dos medidas durante una sola descarga [92]. El sistema está basado en un intensificador de imagen principal y 2 cámaras ICCD cuyos tiempos de disparo se pueden programar independientemente, lo que permite estudiar procesos rápidos (entre μ s y 100's μ s). La limitación de la técnica estriba en la necesidad de dividir la energía del láser entre ambos pulsos, por lo que se está estudiando la viabilidad de introducir un tercer amplificador (energía máxima 20 J). Esto, junto con la renovación de las actuales ICCD, conduciría a un sistema aún más fiable y con más capacidades para explorar la física de estructuras y procesos rápidos.

Por otra parte, el reflectómetro Doppler actual consta de dos canales radiales y desde su instalación ha permitido caracterizar el comportamiento de la turbulencia y campo eléctrico en la transición L-H de bajo a alto confinamiento [108]. Próximamente está previsto instalar un tercer canal en una banda de frecuencias más alta (50-75 GHz) para poder abordar estudios de propagación radial de eventos de turbulencia y campo eléctrico desde y/o hacia posiciones más internas en el plasma.

Siendo T_e un parámetro fundamental, es imprescindible tener información temporal y espacial sobre ella para realizar estudios de transporte y confinamiento. Con ese objetivo se ha implementado un diagnóstico de T_e en plasmas donde $n_e > 10^{13}$ cm $^{-3}$, con resolución espacial y temporal, que emplea una técnica conocida como el método de dos filtros [109]. Asumiendo una distribución de energía maxwelliana, esta técnica permite estimar T_e a partir del ratio de flujo de rayos X blandos (< 10 keV) transmitidos por filtros de distintos espesores [110]. Los filtros minimizan la contribución de la radiación de línea debida a impurezas en el plasma. El diagnóstico está compuesto por 4 fotodiodos de silicio (16 detectores cada uno) y 4 filtros de berilio de distintos espesores.

Actualmente, el TJ-II está dotado con 2 espectrómetros de intercambio de carga, de 6 canales cada uno, que observan el plasma poloidalmente y otros 2 espectrómetros, que observan el plasma toroidalmente, de 12 y de 16 canales respectivamente para analizar iones de alta energía provenientes del haz de calentamiento [92]. Todos miden la energía de las partículas neutras (H^0) que escapan del plasma y el análisis de su espectro proporciona la temperatura de los iones mayoritarios (H^+). En el futuro se prevé aumentar el número de canales de los espectrómetros poloidales a 12 cada uno para estudiar con mayor facilidad la física de iones supratérmicos.

Finalmente, se está desarrollando un sistema, basado en el actual interferómetro de infrarrojo medio, para obtener una señal provechosa para el control de la máquina. El actual interferómetro IR es de dos colores con láseres de CO $_2$

y NdYAG [99, 111] con un error de la integral de línea de la densidad de $\pm 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. El procesado adecuado de la señal permitirá determinar las fuentes de ruido/error al objeto de poder reducir su valor. Además, su eliminación para obtener una señal de control fiable obliga a realizar el procesado de la señal en tiempo real ($\leq 1 \text{ ms}$). Con este objetivo, se está implementando un sistema basado en conversores A/D y *Field Programmable Gate Arrays* [112].

Conclusión

Como es evidente, existe una amplia base de experiencia y conocimientos en el campo de los diagnósticos de plasmas en las universidades e institutos de investigación españoles. Además, hay un fuerte solapamiento de técnicas en las distintas áreas de investigación donde los grupos han adaptado las técnicas a sus condiciones experimentales. Por otra parte, es un área muy dinámica con numerosos desarrollos y adaptaciones de actuales o nuevas técnicas, y donde el fin no es sólo medir parámetros del plasma sino mejorar el entendimiento de los procesos físicos involucrados y abrir caminos a nueva física. Sin embargo, aunque las actuales reducciones en recursos y financiación disponibles pueden frenar el progreso en los distintos campos resumidos aquí, existen oportunidades de interacción activa entre los distintos grupos colaboradores, y con otros grupos distintos interesados en ella, para promover colaboraciones, transferencias de conocimientos, foros de discusión, así como cuantas iniciativas tendentes a impulsar la investigación en plasmas y su aplicación tecnológica.

Agradecimientos

A Carlos Hidalgo por su apoyo en este trabajo y a todos aquellos grupos y laboratorios referenciados en el texto que han contribuido con su generosidad enviando la información que ha permitido la elaboración del mismo.

Referencias

- [1] R. J. GOLDSTON y P. H. RUTHERFORD, *Introduction to Plasma Physics* (IOP Publishing, 1995).
- [2] J. REECE ROTH, *Industrial Plasma Engineering*, vol. 1: *Principles* (IOP Publishing, 1995).
- [3] K. MIYAMOTO, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion* (Springer, 2005).
- [4] K. J. MCCARTHY et ál., "Results of an experiment relating apparent Doppler ion temperatures with non-thermal velocities in hot fusion plasmas". *Europhysics Letters* **63**, 49 (2003).
- [5] I. H. HUTCHINSON, *Principles of Plasma Diagnostics* (Cambridge University Press, 2002).
- [6] C. GÓMEZ-ALEIXANDRE, O. SÁNCHEZ y J. M. ALBELLA, "Influence of the discharge frequency (35 kHz and 13.56 MHz) on the composition of plasma enhanced chemical vapor deposition a-C:H films". *Journal of Vacuum Science & Technology A* **11**, 143 (1993).
- [7] M. CAMERO HERNANZ, *Capas de carbono y nitruro de carbono nanoestructuradas. Estudio de los procesos de síntesis asistidos por plasma*, tesis doctoral (Universidad Autónoma de Madrid, 2006).
- [8] C. GÓMEZ-ALEIXANDRE, O. SÁNCHEZ, A. CASTRO y J. M. ALBELLA, "Optical emission characterization of $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ discharges for diamond deposition". *Journal of Applied Physics* **74**, 3752 (1993).
- [9] O. SÁNCHEZ, C. GÓMEZ-ALEIXANDRE y J. M. ALBELLA, "Study of the plasma discharges in diamond deposition with different O_2 concentrations". *Diamond and Related Materials* **3**, 1183 (1994).
- [10] C. GÓMEZ-ALEIXANDRE, M. M. GARCÍA, O. SÁNCHEZ y J. M. ALBELLA, "Influence of oxygen in the nucleation and growth processes of diamond films". *Thin Solid Films* **303**, 34 (1997).
- [11] F. J. GORDILLO-VÁZQUEZ, C. GÓMEZ-ALEIXANDRE y J. M. ALBELLA, "Influence of the excitation frequency on $\text{CH}_4/\text{H}/\text{H}_2$ plasmas for diamond film deposition: electron energy distribution function and atomic hydrogen concentration". *Plasma Sources Science and Technology* **10**, 99 (2001).
- [12] M. CAMERO, F. J. GORDILLO, J. ORTIZ y C. GÓMEZ-ALEIXANDRE, "Influence of the power on the processes controlling the formation of ECR-CVD carbon nitride films from $\text{CH}_4/\text{Ar}/\text{N}_2$ plasmas". *Plasma Sources Science and Technology* **13**, 121 (2004).
- [13] <http://www.sincaf-icmse.es>
- [14] M. MACÍAS-MONTERO et ál., "Influence of plasma-generated negative oxygen ion impingement on magnetron sputtered SiO_2 thin films during growth at low temperatures". *Journal of Applied Physics* **111**, 054312 (2012).
- [15] L. LOBO, L. et ál., "A comparison of non-pulsed radiofrequency and pulsed radiofrequency glow discharge orthogonal time-of-flight mass spectrometry for analytical purposes". *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* **24**, 1373 (2009).
- [16] J. PISONERO et ál., "A simple glow discharge ion source for direct solid analysis by on-axis time-of-flight mass spectrometry". *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* **16**, 1253 (2001).
- [17] R. VALLEDOR, R. et ál., "Direct chemical in-depth profile analysis and thickness quantification of nanometer multilayers using pulsed-RF-GD-TOFMS". *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **396**, 2881 (2010).
- [18] W. GRIMM, "New glow discharge lamp for optical emission spectral analysis". *Spectrochimica Acta B* **23**, 443 (1968).
- [19] C. BEYER et ál., "Development and analytical characterization of a Grimm-type glow discharge ion source operated with high gas flow rates and coupled to a mass spectrometer with high mass resolution". *Spectrochimica Acta B* **57**, 1521 (2002).
- [20] A. C. MUÑIZ et ál., "Pulsed radiofrequency glow discharge time of flight mass spectrometer for the direct analysis of bulk and thin coated glasses". *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* **23**, 1239 (2008).
- [21] J. PISONERO et ál., "Glow-discharge spectrometry for direct analysis of thin and ultra-thin solid films". *Trends in Analytical Chemistry* **25**, 11 (2006).
- [22] S. DJUROVIĆ, S. MAR, R. J. PELÁEZ y J. A. APARICIO, "Stark broadening of ultraviolet Ar III spectral lines". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **414**, 1389 (2011).
- [23] K. GRÜTZMACHER et ál., "Two photon polarization spectroscopy applied for quantitative measurements of atomic hydrogen in atmospheric pressure flames". *Journal of Applied Physics B* **76**, 775 (2003).
- [24] A. B. GONZALO et ál., "Absolute atomic hydrogen density distribution in a hollow cathode discharge by two-photon polarization spectroscopy". *Plasma Sources Science and Technology* **13**, 150 (2004).
- [25] M. I. DE LA ROSA et ál., "Electric field measurements in a hollow cathode discharge by two-photon polarization spectroscopy of atomic deuterium". *Plasma Sources Science and Technology* **15**, 105 (2006).
- [26] M. I. DE LA ROSA, C. PÉREZ, K. GRÜTZMACHER y L. M. FUENTES, "Electric field strengths in a hollow cathode measured by Doppler-free two-photon optogalvanic spectroscopy via Stark

- splitting of the 2S level of deuterium". *Plasma Sources Science and Technology* **18**, 015012 (2009).
- [27] C. PEREZ, M. I. DE LA ROSA y K. GRÜTZMACHER, "Hollow cathode fall field strength measured by Doppler-free two-photon optogalvanic spectroscopy via Stark splitting of the 2S level of hydrogen". *European Physical Journal D* **56**, 369 (2010).
- [28] A. STEIGER et ál., "Measurements of hydrogen isotope densities by two-photon induced Lyman- α fluorescence as a proof for tokamak diagnostics". *Proceeding of Spectral Line Shapes Conference*, AIP 467, 155 (1999).
- [29] M. A. GIGOSOS, J. FRAILE y F. TORRES, "Hydrogen Stark profiles: A simulation-oriented mathematical simplification". *Physical Review A* **31**, 3509 (1985).
- [30] M. A. GIGOSOS y V. CARDEÑOSO, "New plasma diagnosis tables of hydrogen Stark broadening including ion dynamics". *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **29**, 4795 (1996).
- [31] M. A. GIGOSOS y M. A. GONZÁLEZ, "Stark broadening tables for the helium I 447.1 line. Application to weakly coupled plasmas diagnostics". *Astronomy & Astrophysics* **503**, 293 (2009).
- [32] J. I. FERNÁNDEZ-PALOP, J. BALLESTEROS, V. COLOMER y M. A. HERNÁNDEZ, "A new smoothing method for obtaining the electron energy distribution function in plasmas by the numerical differentiation of the I-V probe characteristic". *Review of Scientific Instruments* **66**, 4625 (1995).
- [33] J. BALLESTEROS, J. I. FERNÁNDEZ-PALOP, M. A. HERNÁNDEZ y R. MORALES CRESPO, "LabView virtual instrument for automatic plasma diagnostic". *Review of Scientific Instruments* **75**, 90 (2004).
- [34] A. DENGRA, J. BALLESTEROS, M. A. HERNÁNDEZ y V. COLOMER, "Investigation of the creation process in dc pulsed discharges". *Journal of Applied Physics* **68**, 5507 (1990).
- [35] J. I. FERNÁNDEZ-PALOP, J. BALLESTEROS, V. COLOMER y M. A. HERNÁNDEZ, "Transient processes in an Ar+I₂ DC discharge". *Journal of Applied Physics* **80**, 4282 (1996).
- [36] R. MORALES CRESPO et ál., "Analytical fit of the I-V characteristic for cylindrical and spherical probes in electronegative plasmas". *Journal of Applied Physics* **96**, 4777 (2004).
- [37] J. BALLESTEROS, J. I. FERNÁNDEZ-PALOP, M. A. HERNÁNDEZ y R. MORALES CRESPO, "Influence of the positive ion temperature in cold plasma diagnosis". *Applied Physics Letters* **89**, 101501 (2006).
- [38] E. CASADO, V. COLOMER, E. MUÑOZ-SERRANO y R. SICILIA, "An experimental comparison of the erosion in tungsten cathodes doped with different rare-earth elements". *Journal of Physics D: Applied Physics* **35**, 992 (2002).
- [39] J. A. SILLERO, D. ORTEGA, E. MUÑOZ-SERRANO y E. CASADO, "An experimental study of thoriated tungsten cathodes operating at different current intensities in an atmospheric-pressure plasma torch". *Journal of Physics D: Applied Physics* **43**, 185204 (2010).
- [40] E. CASADO y V. COLOMER, "The numerical modelling of Joule heating effects in thoriated tungsten cathodes of high-current plasma arcs". *Journal of Physics D: Applied Physics* **33**, 1342 (2000).
- [41] D. ORTEGA, J. A. SILLERO MARIN, E. MUÑOZ-SERRANO y E. CASADO, "Simulation of the atomic and ionic densities in the ionization layer of a plasma arc with a binary cathode". *Journal of Physics D: Applied Physics* **42**, 085202 (2009).
- [42] E. MUÑOZ-SERRANO, V. COLOMER y E. CASADO, "A study of the spot evolution in hot refractory cathodes of high-pressure arcs". *Journal of Applied Physics* **98**, 093303 (2005).
- [43] J. M. FERNÁNDEZ et ál., "Preliminary spectroscopic measurements on a low-pressure argon, 2.45 GHz microwave-fed QL-lamp". *Journal of Physics D: Applied Physics* **37**, 1228 (2004).
- [44] S. RUBIO, M. C. QUINTERO y A. RODERO, "Distribution of excited species in a helium plasma flame during the destruction of carbon tetrachloride at atmospheric pressure". *IEEE Transactions on Plasma Science* **36**, 984 (2008).
- [45] M. C. QUINTERO ORTEGA et ál., "Determination of iodide by low power surfatron microwave induced plasma after iodine continuous generation". *Spectrochimica Acta B* **47**, 79 (1992).
- [46] M. JIMÉNEZ, C. YUBERO y M. D. CALZADA, "Study of the reforming of alcohols in a surface wave discharge (SWD) at atmospheric pressure". *Journal of Physics D: Applied Physics* **41**, 175201 (2008).
- [47] M. MORA, M. DEL CARMEN GARCÍA, C. JIMÉNEZ-SANCHIDRIÁN y F. J. ROMERO-SALGUERO, "Transformation of light paraffins in a microwave-induced plasma based reactor at reduced pressure". *Plasma Processes and Polymers* **8**, 709 (2011); *International Journal of Hydrogen Energy* **35**, 4111 (2010).
- [48] C. R. PHIPPS, *2007 Laser Ablation and its Applications* (Springer, 2007).
- [49] J. I. APIÑANIZ y R. MARTÍNEZ, "Theoretical study of ion acceleration by double-layer formation in multicharged laser-produced plasmas". *IEEE Transactions on Plasma Science* **39**, 2928 (2011).
- [50] <http://www.iem.cfmac.csic.es/departamentos/fismol/fmap/plasmas.htm>
- [51] M. JIMÉNEZ-REDONDO, E. CARRASCO, V. J. HERRERO y I. TANARRO, "Isotopic exchange processes in cold plasmas of H₂/D₂ mixtures". *Physical Chemistry Chemical Physics* **13**, 9655 (2011).
- [52] F. L. TABARÉS et ál., "Suppression of hydrogenated carbon film deposition by scavenger techniques and their application to tritium inventory control of fusion devices". *Plasma Physics and Controlled Fusion* **44**, L37 (2002).
- [53] M. F. ROMERO et ál., "Plasma diagnostics and device properties of AlGaIn/GaN HEMT passivated with SiN deposited by plasma-enhanced chemical vapour deposition". *Journal of Physics D: Applied Physics* **43**, 495202 (2010).
- [54] E. CARRASCO, M. JIMÉNEZ-REDONDO, I. TANARRO y V. J. HERRERO, "Neutral and ion chemistry in low pressure DC plasmas of H₂/N₂ mixtures: routes for the efficient production of NH₃ and NH₄⁺". *Physical Chemistry Chemical Physics* **13**, 19561 (2011).
- [55] F. MORENO-INSERTIS, "Plasmas en Física Solar". *Revista Española de Física* **25**(3), 37 (2011).
- [56] F. J. GORDILLO-VÁZQUEZ, A. LUQUE, F. C. PARRA, y M. PASSAS, "Plasmas en atmósferas planetarias". *Revista Española de Física* **25**(3), 29 (2011).
- [57] R. C. FRANZ, R. J. NEMZEK y J. R. WINCKLER, "Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system". *Science* **249**, 48 (1990).
- [58] D. D. SENTMAN y E. M. WESCOTT, "Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft". *Geophysical Research Letters* **20**, 2857 (1993).
- [59] D. D. SENTMAN et ál., "Preliminary results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 1. Red sprites". *Geophysical Research Letters* **22**, 1205 (1995).
- [60] S. B. MENDE, R. L. RAIRDEN, G. R. SWENSON y W. A. LYONS, "Sprite spectra; N₂ 1 PG band identification". *Geophysical Research Letters* **22**, 2633 (1995).
- [61] D. L. HAMPTON, M. J. HEAVNER, E. M. WESCOTT y D. D. SENTMAN, "Optical spectral characteristics of sprites". *Geophysical Research Letters* **23**, 89 (1996).
- [62] E. CRIADO et ál., "Ion beam neutralization and properties of plasmas from low power ring cusp ion thrusters". *Physics of Plasmas* **19**, 023505 (2012).

- [63] O. F. CASTELLANOS et ál., “Parallel flows and turbulence in a linear plasma machine”. *Plasma Physics and Controlled Fusion* **47**, 2067 (2005).
- [64] D. D. RYUTOV, M. S. DERZON y M. K. MATZEN, “The physics of fast Z pinches”. *Reviews of Modern Physics* **72**, 167 (2000).
- [65] O. D. CORTÁZAR et ál., “Preliminary results of a 10 kJ Z-pinch”. Proc. 17th IAEA Technical Meeting on Research using Small Fusion Devices, P3 (Lisboa, 2007).
- [66] H. BLUHM, *Pulsed Power Systems* (Springler and Verlag, 2006).
- [67] G. S. SETTLES, *Schlieren and shadowgraph techniques*, (Springer and Verlag, 2001).
- [68] F. D. BENNET, *Progress in High Temperature Physics and Chemistry*, C. A. Rouse (ed.) (Pergamon, 1968), 2, 1.
- [69] C. CASTEJÓN, E. ASCASÍBAR y EL GRUPO TJ-II, “El stellarator TJ-II: Ciencia básica y desarrollo tecnológico en plasmas de fusión nuclear”. *Revista Española de Física* **25**(3), 11 (2011).
- [70] D. FANG y R. K. MARCUS, “Use of a cylindrical Langmuir probe for the characterization of charged particle populations in a planar, diode glow discharge device”. *Spectrochimica Acta B* **45**, 1053 (1990).
- [71] M. J. HEINTZ y G. M. HIEFTJE, “Langmuir-probe measurements of a pulsed and steady-state RF glow-discharge source and of an RF planar-magnetron source”. *Spectrochimica Acta B* **51**, 1629 (1996).
- [72] E. J. POWERS, “Spectral technique for experimental investigation of plasma diffusion due to polychromatic fluctuations”. *Nuclear Fusion* **44** (1974) 749.
- [73] I. H. HUTCHINSON, “Ion collection by probes in strong magnetic fields with plasma flow”. *Physical Review A* **37**, 4358 (1988).
- [74] M. A. PEDROSA et ál., “Fast movable remotely controlled Langmuir probe system”. *Review of Scientific Instruments* **70**, 415 (1999).
- [75] F. J. GORDILLO-VÁZQUEZ, M. CAMERO y C. GÓMEZ-ALEIXANDRE, “Spectroscopic measurements of the electron temperature in low pressure radiofrequency Ar/H₂/C₂H₂ and Ar/H₂/CH₄ plasmas used for the synthesis of nanocarbon structures”. *Plasma Sources Science and Technology* **15**, 42 (2006).
- [76] M. CAMERO, F. J. GORDILLO-VÁZQUEZ y C. GÓMEZ-ALEIXANDRE, “Low pressure PECVD of nanoparticles in carbon thin films from Ar/H₂/C₂H₂ plasmas: Synthesis of films and analysis of the electron energy distribution function”. *Chemical Vapor Deposition* **13**, 326 (2007).
- [77] R. VALLEDOR et ál., “Further insights into prepeak emission in pulsed radiofrequency glow discharge”. *Spectrochimica Acta B* **85**, 45 (2013).
- [78] C. GONZÁLEZ GAGO, N. BORDEL, R. PEREIRO y A. SANZ-MEDEL, A., “Investigation of the afterglow time regime in pulsed radiofrequency glow discharge time-of-flight mass spectrometry”. *Journal of Mass Spectrometry* **46**, 757 (2011).
- [79] J. I. APIÑANIZ, F. J. GORDILLO-VÁZQUEZ y R. MARTÍNEZ, R., “Ion energy distributions in laser-produced plasmas with two collinear pulses”. *Plasma Sources Science and Technology* **21**, 015016 (2012).
- [80] I. TANARRO y V. J. HERRERO, “Ion energy distributions for the identification of active species and processes in low pressure hollow cathode discharges”. *Plasma Sources Science and Technology* **18**, 034007 (2009).
- [81] E. LANDI DEGL’INNOCENTI y M. LANDOLFI, *Polarization in Spectral Lines* (Kluwer Academic Publishers, 2004).
- [82] B. RUIZ COBO y J. C. DEL TORO INIESTA, “Inversion of Stokes profiles”. *The Astrophysical Journal* **398**, 375 (1992).
- [83] H. SOCAS-NAVARRO, J. TRUJILLO BUENO y B. RUIZ COBO, “Non-LTE inversion of Stokes profiles induced by the Zeeman effect”. *The Astrophysical Journal* **530**, 977 (2000).
- [84] J. SÁNCHEZ ALMEIDA, “Physical properties of the solar magnetic photosphere under the MISMA hypothesis. I. Description of the inversion procedure”. *The Astrophysical Journal* **491**, 993 (1997).
- [85] J. TRUJILLO BUENO et ál., “Selective absorption processes as the origin of puzzling spectral line radiation from the Sun”. *Nature* **415**, 403 (2002).
- [86] A. ASENSIO RAMOS, J. TRUJILLO BUENO y E. LANDI DEGL’INNOCENTI, “Advanced forward modeling and inversion of Stokes profiles resulting from the joint action of Hanle and Zeeman effects”. *The Astrophysical Journal* **683**, 542 (2008).
- [87] R. CENTENO, J. TRUJILLO BUENO y A. ASENSIO RAMOS, “On the magnetic field of off-limb spicules”. *The Astrophysical Journal* **708**, 1579 (2010).
- [88] J. TRUJILLO BUENO, N. SHCHUKINA y A. ASENSIO RAMOS, “A substantial amount of hidden magnetic energy in the quiet Sun”. *Nature* **430**, 326 (2004).
- [89] M. A. OCHANDO, F. MEDINA y THE TJ-II TEAM, “Emissivity toroidal asymmetries induced by ECRH driven convective fluxes in the TJ-II stellarator”. *Plasma Physics and Controlled Fusion* **45**, 221 (2003).
- [90] E. DE LA LUNA, J. SÁNCHEZ, V. TRIBALDOS y T. ESTRADA, “Multi-channel electron cyclotron emission radiometry in TJ-II stellarator”. *Review of Scientific Instruments* **72**, 379 (2001).
- [91] F. MEDINA et ál., “X-ray diagnostic systems for the TJ-II flexible heliac”. *Review of Scientific Instruments* **70**, 642 (1999).
- [92] J. M. FONTDECABA et ál., “Comparisons of electron temperature and density, and ion temperature profiles in the TJ-II stellarator”. *Plasma and Fusion Research* **5**, S2085 (2010).
- [93] C. J. BARTH et ál., “High-resolution multiposition Thomson scattering for the TJ-II stellarator”. *Review of Scientific Instruments* **70**, 763 (1999).
- [94] B. ZURRO et ál., “Method to induce impurity transport quantities from the evolution of tomographically reconstructed bolometer signals during tracer injection at TJ-II”. *Review of Scientific Instruments* **75**, 4231 (2004).
- [95] J. A. ALONSO et ál., “Two-dimensional turbulence analysis using high-speed visible imaging in TJ-II edge plasmas”. *Fusion Science and Technology* **50**, 301 (2006).
- [96] J. M. CARMONA, K. J. MCCARTHY, V. TRIBALDOS y R. BALBÍN, “Density dependence of ion temperature measured by active charge-exchange spectroscopy in ECRH plasmas of the TJ-II stellarator”. *Fusion Science and Technology* **54**, 962 (2008).
- [97] GUZMÁN, F. et ál., “On the determination of edge Ti profiles by a supersonic He beam in TJ-II”. *Journal of Nuclear Materials* **390-391**, 1127 (2009).
- [98] T. HAPPEL et ál., “Doppler reflectometer system in the stellarator TJ-II”. *Review of Scientific Instruments* **80**, 073502 (2009).
- [99] M. SÁNCHEZ et ál., “High resolution CO₂ interferometry on the TJ-II stellarator by using an ADC-based phase meter”. *Review of Scientific Instruments* **75**, 3414 (2004).
- [100] A. SOLA, *Estudio teórico y experimental de plasmas creados por onda de superficie*, tesis doctoral (Universidad Complutense de Madrid, 1986).
- [101] J. COTRINO, A. GAMERO, A. SOLA y V. COLOMER, “Effective recombination coefficients in argon surface-wave-produced plasmas”. *Journal of Physics D: Applied Physics* **21**, 1377 (1988).
- [102] M. LLAMAS et ál., “Estudio de la variación de la densidad electrónica en los procesos de estabilización y extinción de plasmas creados por ondas de superficie pulsantes”. *Anales de Física B* **78**, 251 (1982).
- [103] G. CRISTOFORETTI et ál., “Effect of laser parameters on plasma shielding in single and double pulse configurations du-

- ring the ablation of an aluminium target". *Journal of Physics D: Applied Physics* **42**, 225207 (2009).
- [104] <http://www.iac.es/proyecto/EST>
- [105] http://hinode.nao.ac.jp/SOLAR-C/index_e.html
- [106] J. TRUJILLO BUENO, J. STEPÁN y L. BELLUZZI, "The Lya lines of H I and He II: A differential Hanle effect for exploring the magnetism of the solar transition region". *The Astrophysical Journal Letters* **746**, L9 (2012).
- [107] K. J. MCCARTHY, "Diagnostic tools for probing hot magnetically confined plasmas", XXXIII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física, 4, 65 (Santander, 2011).
- [108] T. ESTRADA et ál., "Sheared flows and transition to improved confinement regime in the TJ-II stellarator". *Plasma Physics and Controlled Fusion* **51**, 124015 (2009).
- [109] D. BAIÃO et ál., "Implementation of a multichannel soft x-ray diagnostic for electron measurements in TJ-II high-density plasmas". *Review of Scientific Instruments* **83**, 053501 (2012).
- [110] D. BAIÃO, D. et ál., "Implementation of multifilter based twin-prototypes for core electron temperature measurements in the TJ-II stellarator". *Review of Scientific Instruments* **81**, 10D711 (2010).
- [111] M. SÁNCHEZ, L. ESTEBAN, P. KORNEJEV y M. HIRSCH, "Admissible crosstalk limits in a two colour interferometer for plasma density diagnostics. A reduction algorithm". *AIP Conference Proceedings* **993**, 187 (2008).
- [112] L. ESTEBAN et ál. "Development of efficient FPGA-based multichannel phase meters for IR-interferometers". *IEEE Transactions on Nuclear Science* **58**, 1562 (2011).