

**UN PROYECTO DE INNOVACIÓN DE LA ENSEÑANZA EN LA
LICENCIATURA DE FÍSICA:
LABORATORIO DE ESPECTROSCOPIA DE PLASMAS**

M. D. Calzada, M.C. García y Manuel Sáez
Departamento de Física,
Edificio C-2, Campus de Rabanales.
14071 Córdoba (España)

RESUMEN

Este trabajo es la presentación de un proyecto de innovación de la enseñanza en la Licenciatura de Física de la Universidad de Córdoba (España). El proyecto se denomina *Laboratorio de Espectroscopía de Plasmas*, y forma parte del programa de *Espectroscopía de Plasmas*, asignatura optativa de 5º curso de la Licenciatura de Física que se impartirá por primera vez en el segundo cuatrimestre de este curso 1999/2000. Se han diseñado cinco prácticas de laboratorio en cuyo desarrollo, los alumnos utilizarán material de investigación. La finalidad de este proyecto es elevar el nivel de cualificación de nuestros estudiantes universitarios al establecer una sintonización entre la enseñanza que reciben y la demanda real del sector empresarial regional y nacional.

ABSTRACT

We present a project for teaching innovation in Physics training at the Universidad de Córdoba (Spain). The project, entitled *Laboratory of Plasma Spectroscopy*, is part of the program of the optional subject called *Plasma Spectroscopy*. This subject is fifth training course and will be imparted for the first time during the second half of the academic year 1999/2000. Five practical lessons, allowing the students to use research equipment during their development, have been designed. The aim of the project is to increase the qualification level of university students, establishing a better tuning between the learning they have received and the actual demands from the local and national industrial sector.

INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos prioritarios de la Universidad es la de ser el lugar donde se formen futuros profesionales que participarán, en su día, en el desarrollo del país. Para ello debe existir una buena sintonización entre la enseñanza que reciben los alumnos universitarios y el sector empresarial. Esta sintonización se consigue confeccionando planes de estudio en los que se introduzcan asignaturas que permitan alcanzar el objetivo mencionado anteriormente.

El tiempo de estudio en la Licenciatura de Física es un periodo de formación y adquisición de conocimientos básicos en esta disciplina. Pero este principio no es incompatible con la oportunidad de adaptar la enseñanza a la realidad de la Física contemporánea. La Física es una actividad viva que, como toda ciencia, tiene como motor la investigación.

Esta reflexión nos llevó en su día a ofertar a los alumnos de 5º curso de la licenciatura de Física de la Universidad de Córdoba una asignatura optativa, *Espectroscopía de Plasmas*, relacionada directamente con la investigación que se realiza en

nuestro departamento (investigación en alta tecnología como es la **Física de Plasmas**). En esta asignatura, que será impartida por primera vez en el segundo cuatrimestre de este curso 1999/2000, se abordará el estudio teórico y experimental de los métodos espectroscópicos, métodos *no invasivos*, utilizados en el estudio de estas descargas y en las aplicaciones de carácter científico y tecnológico que puede hacerse de las mismas. No se planteó en su día, ni se plantea en este momento, como una asignatura puramente teórica o como los alumnos denominan *de pizarra*. En su programa se han incluido cinco prácticas de laboratorio, en cuyo desarrollo los alumnos utilizarán material de investigación. De esta forma, se favorecerá su aprendizaje en el uso de métodos empleados en empresas y centros científicos que abordan, en su trabajo, alguno de los aspectos de la **Física de Plasmas** (fundamental o aplicada).

OBJETIVO GENERAL Y ÁMBITO DE ACTUACIÓN

Objetivo General

Hemos trazado como objetivo general de este proyecto:

Que los alumnos tomen contacto con una de las líneas de la Física experimental de elevado interés para la comunidad científica internacional:

- *adquiriendo conocimiento sobre la aplicación de métodos experimentales empleados en el estudio fundamental de los plasmas y su aplicación práctica en ciencia y tecnología.*

- *aprendiendo a utilizar aparatos e instrumentos de medida existentes en laboratorios de investigación de alto nivel.*

A partir de este momento podemos preguntarnos: *¿Qué es un plasma, para qué sirve, cómo se aborda su estudio, ... ?*.

Un plasma es un gas parcialmente ionizado compuesto principalmente de electrones, iones libres y partículas neutras, distinguiéndose de un gas clásico el cual está compuesto exclusivamente de estas últimas. A veces se habla de un plasma como el cuarto estado de la materia en la secuencia sólido-líquido-gas que corresponde a una energía creciente de los constituyentes, apareciendo este nuevo estado cuando se continúa aportando energía al sistema provocando así la ionización parcial del gas.

Si se observa un plasma a nivel macroscópico da la sensación de que su comportamiento es estático, sin embargo a nivel microscópico existe una notable actividad, sucediendo reacciones de todo tipo como colisiones entre electrones e iones, electrones y partículas neutras, absorción de fotones, etc. Esta actividad hace de un plasma un medio en el que es posible conseguir la realización de determinadas reacciones que no serían posibles o lo suficientemente eficaces, si se utilizan medios convencionales para su producción.

Así, el trabajo de investigación en plasmas abarca tanto la física fundamental como las diferentes aplicaciones de tipo científico e industrial de las mismas.

Algunos ejemplos de temas relacionados con la utilización de plasmas en tecnología son: fusión termonuclear controlada; astrofísica y física del medio ambiente espacial; bombeo de láseres; reacciones químicas en plasmas; tratamiento de superficies; análisis elemental (química analítica); iluminación; fuente de iones y soldadura. De todas ellas nos referiremos solamente a dos de estas aplicaciones como son: *reacciones químicas en plasmas y análisis elemental (química analítica)*.

• Reacciones químicas en plasmas: En una reacción química, son los electrones los que intervienen de una manera fundamental en la formación y rotura de enlaces. En un plasma, la temperatura de los electrones (su energía) es mayor a la del resto de las partículas del mismo. De esta forma, esta mayor energía favorece las reacciones químicas que tendrán un rendimiento superior al de la química convencional. Así, se pueden realizar síntesis de productos o bien, la destrucción de sustancias tóxicas o peligrosas para la capa de ozono que conducen al aumento del efecto invernadero. Después del paso de estas moléculas por una descarga realizada principalmente con otro gas (gas plasmógeno) o creando directamente la descarga con las mismas moléculas a destruir se llega, en ciertos casos, a una eficacia de destrucción del 99.9999%. Las condiciones operativas en las que la eficacia es máxima se estudian utilizando, entre otros, métodos espectroscópicos.

• Análisis elemental (química analítica): Para conocer la composición de una muestra sólida, líquida o gaseosa se pueden excitar los átomos (después de haber sido disociadas las moléculas componentes) con ayuda de un plasma (argón, helio, hidrógeno...) y determinar la concentración de átomos presentes por espectroscopía óptica gracias a su radiación característica o por espectrometría de masas. Dicha concentración se obtiene por referencia a muestras calibradas, preferentemente en una matriz molecular no demasiado diferente de la muestra a analizar. Este método es muy sensible y su utilización permite obtener límites de detección del orden del nanogramo y picogramo (por gramo de muestra).

La aplicación de un plasma con fines científicos y tecnológicos se hace en unas condiciones especiales de la descarga en cuanto a valores de parámetros como la densidad de estados excitados, densidad y energía de los electrones y la energía de las partículas pesadas (iones y neutros). Por ello es necesario conocer cuales son dichos valores en diferentes condiciones operativas, con el fin de encontrar aquella o aquellas en las que se realizan las reacciones deseadas con la mayor eficacia. Los valores de estos parámetros se obtienen utilizando la espectroscopía de emisión.

Las principales ventajas en el uso de esta técnica como método de diagnosis para los plasmas son el carácter no perturbativo del medio y el hecho de permitírnos estudiar las descargas a la vez en el espacio y en el tiempo. De esta forma, la radiación emitida por el plasma se registra en forma de espectro de líneas de emisión. Los parámetros característicos de dichos plasmas (intensidad y perfil) nos permiten obtener información sobre las condiciones físicas (densidad y temperatura electrónicas) del plasma y de su actividad microscópica.

Ámbito de actuación

El **Laboratorio de Espectroscopía de Plasmas** está dirigido a los estudiantes cuya orientación investigadora vaya hacia la física de plasmas, física de láseres, astrofísica y también a la química analítica y al tratamiento de superficies; estas dos últimas actividades en la medida en que ellas utilizan especies excitadas de un plasma. Aunque este laboratorio se encuentra formando parte de una asignatura optativa ofertada a los alumnos de 5º curso de la licenciatura de *Física*, creemos que, en base a la formación que ofrece, es posible ampliar esta oferta a los alumnos de 2º ciclo de alguna otra licenciatura como *Química y Ciencias Ambientales*, si atendemos a algunas de las aplicaciones prácticas de los plasmas, y que ya hemos comentado anteriormente, como son: la determinación de la concentración de elementos en muestras y la destrucción de sustancias nocivas para el medio ambiente.

Esto obligaría a que el departamento se planteara ofertar la asignatura de libre configuración lo que exigiría una **importante coordinación y colaboración** con profesores de otros departamentos que imparten docencia en *Química* y en *Ciencias Ambientales*. Esta colaboración permitiría organizar prácticas de laboratorio en las que se realicen aplicaciones de estos plasmas relacionadas directamente con estas dos licenciaturas. Esta última propuesta establecería una estrecha relación entre la docencia y la investigación, dando a nuestros alumnos una formación acorde con las ofertas reales del mercado de trabajo, tal y como demanda la sociedad hoy día.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Lo expuesto anteriormente hace que nos fijemos los siguientes objetivos específicos:

1. *Que los alumnos identifiquen líneas espectrales y sus parámetros característicos: probabilidad de transición espontánea, peso estadístico, energía de excitación..., a partir de espectros reales registrados en el laboratorio, apoyándose en las tablas existentes para cada elemento y publicadas por NSRDS-NBS-4 (The superintendent of Documents, Whashington, D.C. 1966).*
2. *Que los alumnos aprendan a utilizar una lámpara calibrada para la medida de intensidades absolutas de las líneas espectrales.*
3. *Que los alumnos aprendan a interpretar un espectro, obteniendo información de los parámetros fundamentales de un plasma:*
 - *densidad electrónica.*
 - *temperatura de excitación, electrónica y del gas.*
 - *función de distribución de estados atómicos excitados del gas plasmógeno.*
4. *Que los alumnos aprendan a extraer conclusiones acerca de los procesos microscópicos que tienen lugar en el plasma.*
5. *Que los alumnos sean capaces de elegir las condiciones físicas de la descarga más adecuadas para una determinada aplicación de la misma.*

Estos objetivos son realistas y alcanzables ya que los alumnos adquieren previamente los conocimientos que les son necesarios a través del programa teórico de la asignatura *Espectroscopía de Plasmas*.

ACTIVIDADES A DESARROLLAR Y METODOLOGÍA

Actividades a desarrollar

Estas actividades consisten en la realización de 5 prácticas de laboratorio como son:

Práctica 1. Identificación de líneas espectrales

Práctica 2. Medida de intensidades absolutas (calibración del dispositivo experimental)

Práctica 3. Medida de temperaturas en un plasma: temperatura de excitación, electrónica y del gas.

Práctica 4. Medida de la densidad electrónica: ensanchamiento Stark de la línea H_{β} del hidrógeno y líneas del ArI .

Práctica 5. Función de distribución de estados atómicos excitados del ArI (grado de equilibrio termodinámico).

Las prácticas de laboratorio están estrechamente relacionadas con el temario teórico de la asignatura. De esta forma:

- Prácticas 1 y 2 se realizarán tras los cuatro primeros temas teóricos del programa:
 - Tema 1. Primeras nociones de espectroscopía.
 - Tema 2. Notación espectroscópica.
 - Tema 3. Estudio del perfil de una raya espectral.
 - Tema 4. Interacción radiación-materia.
- Prácticas 3, 4 y 5 se realizarán tras los dos últimos temas teóricos del programa:
 - Tema 5. El equilibrio termodinámico.
 - Tema 6. Diagnóstico espectroscópico.

Instrumentación a utilizar en las prácticas

La figura 1 muestra el esquema del dispositivo experimental que utilizarán los alumnos. El desglose de la instrumentación es el siguiente:

- Generador de microondas Microtron 200 de E.M.S. para una frecuencia de 2.45 GHz con salida coaxial (tipo N) que puede suministrar una potencia de hasta 200 W en modo continuo.
- Dispositivo tipo *surfatrón* [1] productor y sostén de un plasma de alta frecuencia (HF) denominado de *onda de superficie*.
- Tubos de descarga de cuarzo fundido de diámetros interior y exterior 1.5-2.5 y 4-6 mm, respectivamente.
- Gas argón tipo industrial suministrado por la empresa Carburos Metálicos.
- Medidor de flujo Wallace & Tiernay NPXG-143 para un intervalo de medida de 0 a 2.5 l/min.
- Monocromador Jobin-Yvon THR 1000S de distancia focal 1m, tipo Czerny-Turner, con red de difracción holográfica de 1200 líneas/mm.
- Fotomultiplicador Hamamatsu R636 con un intervalo de respuesta espectral de 200-930 nm.
- Fibra óptica PCS 1000 con corazón de silicio de diámetro $1000 \pm 40 \mu\text{m}$ y con una vaina de silicona de espesor $80 \mu\text{m}$.

Material informático.

- Programa de adquisición de datos MONO.BAS desarrollado por Manuel Sáez Cano, integrante de nuestro grupo de investigación y participante en el proyecto de innovación.
- Programas de tratamiento de datos: Peak-fit.exe, Excell.exe y Origin.exe.

Actividad complementaria: Visita al *Laboratorio Nacional de Fusión por Confinamiento Magnético* (CIEMAT) en Madrid. Esta visita sería coordinada conjuntamente con el Dr. Bernardo Zurro, investigador del CSIC en dicho centro y cuyo trabajo consiste, fundamentalmente, en utilizar la espectroscopía como método de diagnóstico de los plasmas de fusión confinados por campos magnéticos.

Pensamos que esta actividad dará a los alumnos la oportunidad de conocer una de las denominadas "*Grandes Instalaciones*" en España dedicada a la aplicación de los plasmas con fines tecnológicos. De esta forma, nuestros alumnos tomarán contacto con una parte de la *investigación de alto nivel* que se hace en nuestro país.

Metodología

Estos trabajos prácticos en el laboratorio son una iniciación a las diferentes técnicas de medida utilizadas en la diagnosis de plasmas y en las diferentes aplicaciones de tipo científico y tecnológico de los mismos.

Los alumnos recibirán al inicio del periodo de las sesiones prácticas un dossier completo sobre las actividades a desarrollar y que comprenden los siguientes puntos:

- Objetivos generales que se desean conseguir con la realización de las prácticas propuestas.
- Reglas de seguridad que toda persona debe seguir cuando trabaje en el laboratorio.
- Esquema del dispositivo experimental que se va a utilizar.
- Un boletín por cada práctica que comprende:
 - Objetivo específico.
 - Resumen de la teoría física en la que se basa la experiencia (con referencias de trabajos publicados en revistas científicas).
 - Realización práctica, donde se indican de forma clara los pasos a seguir, así como los resultados que se desean obtener en cada de ellas.

Al finalizar el periodo de prácticas, los alumnos presentarán una memoria por cada una de las experiencias realizadas. Pensamos que esta presentación conjunta de resultados permitirá al alumno obtener una visión global del estudio espectroscópico de un plasma, al estar todas las prácticas relacionadas entre si.

TEMPORALIZACIÓN

La asignatura **Espectroscopía de Plasmas** tiene un total de 6 créditos, siendo 2 créditos (20 horas) las dedicadas a actividades prácticas.

Cada sesión constará de 4 horas en el laboratorio que por 5 prácticas harán un total de 20 horas (2 créditos prácticos).

Los alumnos matriculados son 18, formándose 6 grupos de 3 alumnos cada uno. Tres alumnos nos parece un número adecuado ya que estas prácticas son de un nivel muy superior a las realizadas en el primer ciclo y la colaboración entre los alumnos es vital para conseguir los objetivos de formación y aprendizaje marcados.

EVALUACIÓN

La calificación de las prácticas constituirá un 40% de la calificación total de la asignatura de *Espectroscopía de plasmas*. Dicha calificación dependerá de la calidad de las memorias presentadas, y de la actitud, interés y rigor científico que el alumno muestre durante su trabajo en el laboratorio.

EXPERIENCIA DEL EQUIPO DE PROFESORES

Nuestro equipo posee suficiente experiencia en espectroscopía de plasmas para abordar los objetivos planteados en este proyecto, tal y como lo demuestran las tesis doctorales realizadas [2], los trabajos publicados en revistas científicas [3] y comunicaciones a congresos nacionales e internacionales [4] y las estancias en centros de investigación de Canadá y Francia [5].

En particular, esta experiencia se centra en la diagnosis de descargas producidas por onda de superficie en columnas capilares, llamas y torch, utilizando Ar y He como gases plasmógenos. En las experiencias que hemos realizado se han utilizado métodos espectroscópicos de determinación de densidad electrónica mediante ensanchamiento Stark de las líneas H_{α} y H_{β} del hidrógeno; temperatura electrónica con la puesta a punto de un método de diagnosis basado en el cociente de intensidades línea/continuo; la temperatura de excitación a partir de la función de distribución de los estados atómicos excitados y la temperatura del gas a partir de los espectros de rotación-vibración de las especies moleculares OH y N_2^+ . Estas experiencias han permitido evaluar el tipo y grado de equilibrio termodinámico de las descargas estudiadas.

En cuanto a la aplicación de los plasmas hemos realizado la determinación de concentración de no metales Cl, Br y I en disoluciones acuosas, implementando el sistema de introducción de muestras necesario en casa caso. Se utilizaron muestras reales como productos farmacéuticos y mezclas sintéticas de los tres elementos. Uno de estos trabajos se hizo en colaboración con la Dra. Mercedes Gallego del Departamento de Química Analítica de la Facultad de Ciencias.

CONCLUSIONES

En esta comunicación presentamos el proyecto de innovación de la enseñanza: Laboratorio de Espectroscopía de Plasmas ligado a la asignatura Espectroscopía de Plasmas de 5º curso de la Licenciatura de Física. Este proyecto fue presentado el pasado mes de diciembre a la convocatoria que realizó la Unidad de Calidad de la Universidad de Córdoba para proyectos de innovación de la enseñanza siendo informado favorablemente por la Junta de Gobierno de nuestra Universidad.

Con este proyecto pretendemos introducir a los alumnos de 5º curso de la licenciatura de Física en la línea de investigación experimental en Física de Plasmas.

Se han diseñado, con este fin, cinco prácticas de laboratorio mediante las cuales los alumnos aprenderán a:

- utilizar aparatos e instrumentos existentes en los laboratorios en los que se realizan estudios fundamentales y aplicaciones prácticas de los plasmas (centros públicos de investigación y empresas).

- utilizar herramientas informáticas para el tratamiento de espectros e interpretación de resultados.

No podemos presentar conclusiones sobre el trabajo realizado por los alumnos dado que se pondrá en marcha a finales de este mes de marzo.

Finalmente, consideramos que proyectos como éste permiten establecer una mayor sintonización entre la enseñanza que reciben nuestros estudiantes universitarios y la demanda empresarial, favoreciendo el desarrollo tecnológico de nuestra región, en particular, y de nuestro país en general.

REFERENCIAS

M. MOISAN, P. LEPRINCE, C. BEAUDRY AND E. BLOYET (1974). *Perfectionnements appotés aus dispositifs des ondes HF d'une colonne de gaz enfermée dans une enveloppe*. Brevet France

Tesis doctorales:

Contribución al estudio de plasmas producidos por microondas (MIP) en el régimen de alta presión. M^a Dolores Calzada. Universidad de Sevilla, 1994

Estudio de un plasma de argon mantenido por onda de superficie a presión atmosférica. M^a Carmen García. Universidad de Córdoba, 1999

] Artículos:

- A. Sola, M.D. Calzada and A. Gamero, J. Phys. D: Appl. Phys., 28 (1995) 1099
- A. Rodero, M.C. García, M.C. Quintero, A. Sola and A. Gamero, J. Phys. D: Appl. Phys., 29 (1995) 681
- M. D. Calzada, M. Moisan, A. Gamero and A. Sola, J. Appl. Phys., 80 (1996) 46
- M. D. Calzada, A. Rodero, A. Sola and A. Gamero, J. Phys. Soc. Jpn, 65 (1996) 948
- M. D. Calzada, M. Sáez and M. C. García, J. Appl. Phys (aceptado en Nov. 1999)
- M. C. García, A. Rodero, A. Sola and A. Gamero, J. Appl. Phys (aceptado en Nov. 1999)
- M. D. Calzada, Y. Kabouzi, M. Moisan, I. Santiago, K. C. Tran and C. Trassy, Le vide: science, technique et applications, supplément n° 291 (1999) 197 (ISBN 1266-0167)

Comunicaciones a congresos:

- M. D. Calzada, A. Gamero, A. Sola and A. Rodero, ICPIG XII, Hoboken (USA) (1995) 129
- A. Rodero, M. C. García, A. Gamero, A. Sola and M. C. Quintero, ICPIG XII, Hoboken (USA) (1995) 109
- A. Rodero, M. C. García, M. C. Quintero, A. Gamero, A. Sola, C. Lao and M. D. Calzada, XIII ESCAMPIG'96, Propad (Slovakia) (1996) 39
- C. Lao, A. Gamero, J. Cotrino, A. Sola, A. Rodero, M. C. García, M. C. Quintero and M. D. Calzada, 3rd Workshop MIP, Fontevraud (Francia) (1997)
- M. C. García, A. Rodero, A. Gamero and A. Sola, XIV ESCAMPIG'98, Malahide (Irlanda) (1998) 540
- M. C. García, A. Rodero, A. Sola and A. Gamero, XIV ESCAMPIG'98, Malahide (Irlanda) (1998) 630
- A. Rodero, M. C. García, A. Gamero and A. Sola, XIV ESCAMPIG'98, Malahide (Irlanda) (1998) 125
- Y. Kabouzi, M. D. Calzada, M. Moisan, I. Santiago, K. C. Tran and C. Trassy, ICPIG XIV, Varsovia (Polonia) (1999) 199
- Y. Kabouzi, M. D. Calzada, M. Moisan, K. C. Tran and C. Trassy, 2nd seminario sobre plasmas térmicos, Cracovia (Polonia) (1999) 38
- M. D. Calzada, Y. Kabouzi, M. Moisan, I. Santiago, K. C. Tran and C. Trassy, XXVII Bienal de Física, Valencia (España) (1999) 642
- M. D. Calzada, Y. Kabouzi, M. Moisan, I. Santiago, K. C. Tran and C. Trassy, XXVII Bienal de Física, Valencia (España) (1999) 819
- Y. Kabouzi, M. D. Calzada, M. Moisan, K. C. Tran and C. Trassy, 52th AGECE, Norfolk (USA) (1999) 26

Figura 1. Dispositivo experimental.

Desarrollo de Planes de Calidad para la Universidad

