

¿El cuarto estado de la materia? Introducción al plasma para estudios preuniversitarios

Sandra Pilar Tierno^a, Ezequiel del Río^b, José Manuel Donoso^c

Departamento de Física Aplicada. ETSIAE. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España.

^asp.tierno@upm.es, ^bezequiel.delrio@upm.es, ^cjosemanuel.donoso@upm.es

[Recibido en marzo de 2015, aceptado en agosto de 2015]

El plasma es un gran desconocido en los estudios de física a nivel preuniversitario ya que no se incluye explícitamente en los temarios de ninguna asignatura de ciencias. Sin embargo, su presencia en la naturaleza y en dispositivos de uso cotidiano es habitual, de forma que su estudio puede resultar apropiado para fomentar la motivación del alumnado hacia la física. En el presente artículo se describe una breve propuesta para introducir este concepto a los estudiantes de física de Educación Secundaria y Bachillerato. Este trabajo propone una introducción enmarcada en la perspectiva de las relaciones Ciencia-Tecnología-Sociedad-Ambiente (CTSA), una posterior discusión teórica donde se presentan los conceptos básicos que caracterizan un plasma y, por último, un sencillo experimento que muestra cómo un tubo fluorescente convencional contiene un plasma. Se pretende, con dicha propuesta, introducir el concepto de plasma a los estudiantes, así como fomentar su interés por la tecnología y ciencia que nos rodea en el día a día, de forma que permita al alumno contextualizar sus estudios de física, mediante un primer acercamiento a un campo multidisciplinar como es la física de plasmas.

Palabras clave: Física de plasmas; Ciencia-Tecnología-Sociedad-Ambiente (CTSA); Multidisciplinariedad; Práctica de laboratorio; Unidad didáctica.

The fourth state of matter? Plasma introduction for pre-university studies

Plasma is not a well-known topic in pre-university courses since, in general, it is not included in the syllabus of any science subject. However, plasma is present in nature and in everyday usage devices, being its study appropriate to make the students be more motivated to study physics. This paper presents a short proposal in order to introduce this concept to High-School students of physics. This work begins with an introduction based on a Science-Technology-Society-Environment (STSE) perspective, followed by a theoretical discussion to describe the basic concepts of a plasma. Finally, a simple experiment is described to show that a common fluorescent lamp contains a plasma. In pursuance of this proposal, we wish to introduce the plasma concept to the students as well as to promote their interest on the daily life technology and science, allowing the students to contextualize their physics studies thanks to a first approach to a multidisciplinary subject as the physics of plasma.

Keywords: Plasma physics; Science-Technology-Society-Environment (STSE); Multidisciplinarity; Laboratory experiment; Didactical sequence.

Introducción

Uno de los factores responsables del desinterés de los alumnos de Secundaria y Bachillerato por la física puede estar relacionado con la lejanía que el alumno percibe entre la vida del día a día y los temarios y conceptos abordados en clase de ciencias. Para subsanar esta deficiencia, varias nuevas líneas de investigación se están llevando a cabo, entre las cuales se encuentran las interacciones Ciencia-Tecnología-Sociedad-Ambiente (CTSA), con propuestas que relacionan el conocimiento científico y tecnológico con aspectos sociales, incentivando así el estudio de la física (Solbes y Vilches 1989, Vilches 1994, Acevedo-Díaz *et al.* 2003, Prieto *et al.* 2012).

Resulta habitual el asociar el estado de plasma con un cuarto estado de agregación de la materia, idea simple que lleva a sentenciar frecuentemente que el 99 % de la materia visible conocida en el universo se encuentra en estado de plasma. Resulta inconcebible que tan extendida afirmación no sea apoyada en estudios básicos preuniversitarios, con un tratamiento académico acorde que explique en qué consiste el plasma. La presencia del plasma en

conocidos fenómenos de la naturaleza, como los rayos o las auroras boreales, o en tecnologías de uso cotidiano, como los tubos fluorescentes, así como la aplicación de plasmas para uso médico (Kong *et al.* 2009) o para fusión nuclear (Nuttall 2008) con el proyecto ITER, ambos ejemplos con una fuerte transcendencia social como es la mejora de la salud o la solución del problema energético, convierten al plasma en una materia muy atractiva a desarrollar bajo una perspectiva CTSA.

Con el fin de motivar a los alumnos e incentivar al profesorado para acrecentar el interés hacia cuestiones científicas aparentemente desconexas, proponemos aprovechar la atracción visual, y hasta plástica, del plasma. Por ello, podemos hacer una simple búsqueda en internet con la palabra «plasma», o utilizar juguetes científicos como la bola de plasma (véase la figura 1) y algunos de los posibles experimentos propuestos con ella en (Guilbert 1999) o (Güemez *et al.* 2009). Asimismo, es fácil constatar el carácter multidisciplinar del plasma, al integrar conceptos de termodinámica, electromagnetismo y física moderna, entre otros. Esta multidisciplinariedad puede ser de estimable ayuda a los estudiantes, ya que el estudio del plasma proporciona una imagen integradora de la física por la confluencia de diversos campos, ayudando a los estudiantes a reducir la tendencia a parcelar los conceptos de la física.

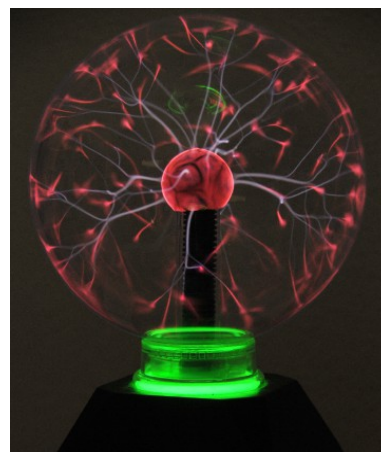


Figura 1. Fotografía de una bola de plasma.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, presentamos en este trabajo una propuesta de unidad didáctica sobre plasmas para alumnos preuniversitarios de las asignaturas de Física o Física y Química, inspirada en el anterior trabajo (Tierno 2013). A su vez, estimamos que esta unidad didáctica se puede enmarcar en la asignatura de Ciencias para el Mundo Contemporáneo o en su equivalente futura.

Nuestra propuesta se compone de dos partes diferenciadas. En primer lugar se presenta una introducción teórica de los conceptos fundamentales del plasma, mientras que en una segunda parte, se propone una práctica (que no requiere un equipamiento especial) para que los estudiantes dispongan de una evidencia experimental de la existencia de plasma en un dispositivo de uso cotidiano como es un tubo fluorescente.

Introducción al concepto de plasma

¿Quién sabe lo que es un plasma? ¿Dónde podemos encontrar la materia en estado de plasma? Estas dos preguntas podrían ser el comienzo de la clase de introducción al llamado «cuarto estado de la materia», algo que, sin duda, algún estudiante mencionará. Comenzar la clase con un debate puede servirnos para captar la atención de los alumnos, de la misma manera que nos permite conocer los preconceptos de los que disponen los estudiantes. Proponemos explicar brevemente que encontramos plasma tanto en objetos cotidianos como un tubo fluorescente o una televisión de plasma, como en cuerpos astrofísicos que todos conocemos, como el sol.

Posteriormente, si se cuenta con material informático en clase, se les puede proponer que en los ordenadores introduzcan en un buscador de internet la palabra «plasma». Se puede abrir un debate en el que se comente qué imágenes encontramos, si ellos ya sabían que eso que están viendo era, en realidad, un plasma. Y se les puede proponer búsquedas alternativas como plasma de astrofísica, plasma de fusión, aurora boreal, proyecto ITER, propulsión por plasma y hasta anillos de Saturno. Esta parte ayudaría al desarrollo de las competencias digitales e informacionales, así como las diferentes imágenes del plasma pueden fomentar el interés hacia

el mismo, mediante el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). En este estudio, consideramos importante proponer al alumnado que encuentre las propiedades comunes en todos los escenarios de plasma observados, de manera que la pregunta clave sería *¿qué les une para ser llamados «plasma» a pesar de sus diferencias?* Es en esta introducción donde las relaciones CTSA se abordarían, de forma que ayude en el fomento del interés de los alumnos por la cuestión que se va a explicar: qué es un plasma.

A continuación, se pasaría a explicar qué es un plasma. Básicamente, el alumnado habría percibido el estado gaseoso, pero «con estructura» ajena a un gas neutro. El plasma consiste en un gas total o parcialmente ionizado (puede usarse el vocablo «electrizado» en cursos inferiores), donde las cargas (electrones e iones) presentan un comportamiento colectivo, véase el movimiento de una aurora boreal para introducir esto. Para hacer entender esto a los alumnos, consideramos apropiado utilizar la teoría cinético-molecular cualitativa con la que los alumnos están previamente familiarizados, o pueden familiarizarse fácilmente (en referencia a los alumnos de Ciencias para el Mundo Contemporáneo). Realmente, cabe destacar que la generación del plasma no se debe estrictamente a esta teoría, sino que se debe a fenómenos complejos de física atómica y estadística. Sin embargo, la teoría cinético-molecular es una manera sencilla de introducir el concepto de plasma: si seguimos aumentando la energía térmica de un gas formado por átomos neutros, estos átomos pueden llegar a disgregarse en partículas cargadas de iones y electrones. Este «mar» de electrones, iones y átomos neutros que no se han ionizado, forman el plasma.

Estas partículas cargadas se moverán debido a las fuerzas de los campos eléctricos y magnéticos. Estos campos pueden ser generados desde el exterior, pero los generados por las propias partículas del plasma son inevitables. El resultado es que habrá un comportamiento colectivo del plasma en presencia de campos eléctricos y/o magnéticos.

Como vemos, el concepto de plasma es interesante para que los alumnos interioricen que las diferentes partes de la física suelen unirse e interactuar, dando lugar a ramas más complejas, como puede ser la física de plasmas. Así, podemos decir que ésta es la interacción de muchas ramas de la física, tales como la física

atómica, el electromagnetismo o la termodinámica. Aquí, los modelos atómicos que los alumnos conocen se relacionan con aspectos de la termodinámica como la energía térmica, y una vez las cargas se han separado, campos eléctricos, corrientes y cargas eléctricas del temario de electromagnetismo entran en juego. En la figura 2 se ve un ejemplo de cómo el plasma se puede presentar a los alumnos como conjunto de algunas de las ramas de la física que se han estudiado en Secundaria y Bachillerato. Así, gracias a esta conjunción de varias partes de la física, se consigue una visión unificada de la física apropiada evitando problemas de parcelación del conocimiento, como los comentados anteriormente.

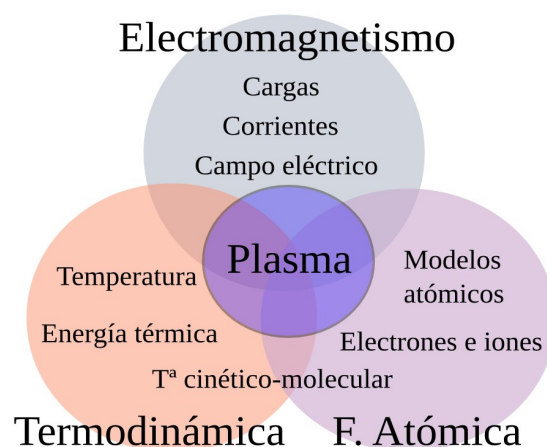


Figura 2. Ejemplo de la interdisciplinariedad del plasma como conjunto de aquellas ramas de la física que se estudian en secundaria.

Introducción de conceptos teóricos

Una vez presentado a los alumnos la idea de plasma, proponemos introducir algunos conceptos básicos de su física como son el grado de ionización, la condición de cuasi-neutralidad, la longitud de Debye y la frecuencia de plasma. Para una mayor profundización en

estos conceptos, se aconseja al profesorado monográficos como el tercer número del volumen 25 de la *Revista Española de Física*, dedicado íntegramente a la Física de Plasmas, o libros como Chen (1984), entre otros.

Esta propuesta de introducción de conceptos teóricos debería dividirse en dos partes: una primera parte con conceptos más básicos (adecuados para alumnado de secundaria) y una segunda parte, de ampliación, con conceptos más avanzados adecuados para estudiantes de bachillerato. En el caso de alumnos de la asignatura de Ciencias para el Mundo Contemporáneo (o equivalente), esta parte sería opcional.

En la primera sección hablaríamos de los dos primeros conceptos. El grado de ionización tiene en cuenta la relación entre átomos ionizados y átomos neutros que tenemos en el plasma. Así, a mayor número de átomos ionizados para un mismo número de átomos neutros, mayor su grado de ionización. En presencia de campos eléctricos o magnéticos externos, las partículas cargadas modifican su trayectoria. Ante un campo magnético suficientemente intenso, las partículas más ligeras (electrones) describen trayectorias curvas alrededor de una línea de campo con radio relativamente pequeño, aumentando la posibilidad de impacto en su avance contra átomos neutros y, por lo tanto, elevando el grado de ionización. Las partículas más masivas (iones) tienen un radio de giro mayor y pueden no experimentar el efecto del campo magnético con tanta intensidad como las partículas más livianas y de mayor velocidad (electrones). El grado de ionización es importante para explicar el comportamiento general de un plasma, y a los alumnos les puede servir para entender cómo los campos electromagnéticos que se tratan en la parte de electromagnetismo de la asignatura explican la dinámica del plasma por acción de dichos campos sobre las cargas que lo componen.

Podemos enriquecer la explicación haciendo referencia a diversos escenarios de plasma tanto de laboratorio como naturales, como por ejemplo, los motores iónicos por plasma para la propulsión espacial (Charles 2009), o los espectaculares efectos en la corona y en la cromosfera solar. La introducción de conceptos relacionados con la astronomía y astronáutica puede ser adecuada y atractiva aquí.

Esta primera parte pensada para los estudios más elementales incluiría también la condición de cuasi-neutralidad. Las densidades de carga positiva y negativa del plasma tienden a igualarse de manera que el campo eléctrico total producido por dichas partículas es prácticamente nulo. Este concepto ayuda a los alumnos a entender que el plasma tiene, en conjunto, un campo nulo, debido a que al estar constituido por partículas cargadas con distinto signo, éstas crean campos que son compensados por las otras partículas del sistema, resultando finalmente un campo nulo.

Para los alumnos de Bachillerato, se podría profundizar con una segunda parte donde se introduzcan la longitud de Debye y la frecuencia del plasma (Chen 1984), conceptos relacionados con la respuesta en espacio y en tiempo de las cargas del plasma, que justifican su comportamiento colectivo como sistema. La frecuencia de plasma es la frecuencia a la que oscilan las cargas al desplazarse de su posición de equilibrio cuando es introducida una pequeña carga (perturbación) en un plasma en equilibrio, caracterizando así un estado de equilibrio que en realidad es dinámico visto microscópicamente. Este concepto puede relacionarse con el temario de ondas, ya que la frecuencia de una onda puede relacionarse aquí con la frecuencia del plasma.

Por su parte, la longitud de Debye es la distancia a partir de la cual la perturbación debida al campo producido por una carga, o la penetración de un campo exterior en las inmediaciones de ésta, es contrarrestado por el resto de cargas, debido a un efecto de apantallamiento. Este parámetro y el concepto de apantallamiento se puede relacionar con los temas de

electromagnetismo que aparecen en el temario de física. En particular, también puede hablarse del plasma como medio conductor de la electricidad y del calor, y compararse con otros sistemas como semiconductores o metales.

Propuesta de una experiencia en el laboratorio

Una vez que se ha introducido a los alumnos en qué consiste el plasma y después de haber tratado con ellos dónde puede encontrarse, pasamos a demostrarles que el tubo fluorescente común contiene un tipo de plasma. Para ello proponemos una sencilla práctica de laboratorio para la cual necesitamos el material indicado en la figura 3: un tubo fluorescente, dos bobinas (de diámetro interior mayor que el diámetro del tubo fluorescente), un amperímetro, un fotodiodo y una fuente de alimentación sencilla. El fotodiodo consiste en un dispositivo que produce corriente eléctrica según la energía luminosa que recibe.

Además de la facilidad para reunir los elementos necesarios, el hecho de utilizar un tubo fluorescente intenta reforzar el acercamiento de la física a la cotidianidad de los alumnos.

El fundamento de la práctica se basa en la ley de Lorentz (realmente sólo por la componente de dicha fuerza debida al campo magnético). Si el tubo fluorescente está realmente formado por plasma, al introducirlo en un campo magnético (el creado por las bobinas), las trayectorias de los electrones que conforman el plasma se curvarán ante el efecto del campo magnético, incrementando el grado de ionización del plasma, que producirá más luminosidad. La figura 4 muestra esquemáticamente cómo se sitúan las bobinas 1 y 2 y el sentido de las corrientes que las atraviesan. En ella, se han incluido colores diferentes para identificar cada una de las corrientes que circulan por las bobinas y sus correspondientes líneas de campo.

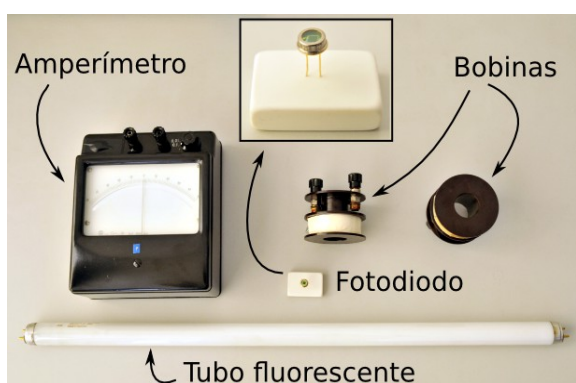


Figura 3. Material necesario para la demostración experimental.

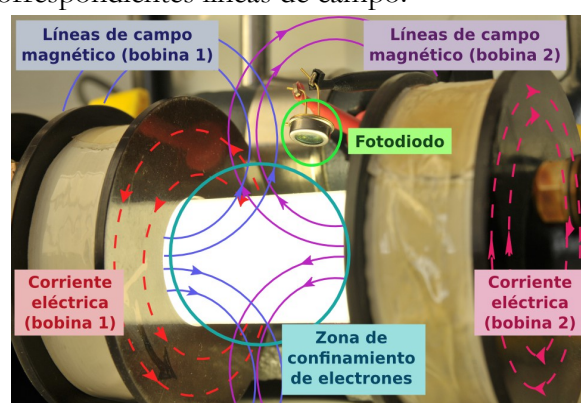


Figura 4. Esquema de las líneas de campo de las bobinas e identificación de la zona de confinamiento de electrones en el tubo fluorescente.

La configuración elegida para las bobinas es la indicada en la figura 4. Como se puede apreciar, las corrientes en las bobinas circulan en sentido opuesto. De esta manera, el campo magnético total inducido por ellas en la sección del tubo entre las dos bobinas tiene componentes transversales a la velocidad neta de los electrones (que siguen el eje del tubo). Esto hace que, cuando se induce el campo magnético, los electrones aumenten la longitud de sus trayectorias y, por lo tanto, colisionen con un mayor número de átomos neutros. Esto supone un aumento en la luminosidad del tubo.

La demostración consiste en lo siguiente. Primero introduciremos el tubo fluorescente entre las dos bobinas como indica la figura 4. Como se puede observar en esta figura, colocaremos el fotodiodo cerca del tubo, pudiéndose fijar con una pinza y conectaremos un amperímetro en serie con el fotodiodo, que utilizamos como generador. Se les pedirá a los estudiantes que apunten el valor de la corriente que atraviesa el fotodiodo con las bobinas desconectadas, es

decir, sin circulación de corriente. Esta situación es la correspondiente a la figura 5 (izquierda). Seguidamente, se les preguntará qué esperan que suceda cuando se haga pasar corriente por las bobinas. Se discutirá qué puede pasar y por qué, y se anticipará la respuesta, utilizando la ley de Lorentz, en el caso de los alumnos de Bachillerato. Para el caso de los alumnos de Secundaria o de la asignatura de Ciencias para el Mundo Contemporáneo, la ley se les puede introducir brevemente, o se les puede dar una sucinta explicación sobre la modificación de la trayectoria de los electrones debida al campo.

Para verificar experimentalmente las hipótesis, hacemos pasar la corriente por las bobinas y vemos que, efectivamente, la corriente del fotodiodo cambia debido a que ahora hay más colisiones entre los electrones y los átomos neutros, de forma que aumenta la luminosidad. Esto se debe a la modificación de la trayectoria de los electrones (que se ve aumentada) debido al campo magnético introducido por las bobinas, tal y como se comentó en la sección anterior. Esta situación corresponde a la figura 5 (derecha). Como se ve, el amperímetro pasa de 40 a 42 μA . Hemos utilizado un amperímetro analógico para ilustrar mejor el experimento. Naturalmente, se puede utilizar un amperímetro digital. En este caso, sería mejor seleccionar manualmente el rango de medida, por ejemplo, de 100 μA .

Finalmente, se promoverá que el alumno investigue sobre otros dispositivos que alberguen plasma en su interior, atendiendo al uso que reciben, como, por ejemplo, la llamada televisión por plasma, o que realicen trabajos monográficos sencillos sobre aquellos aspectos que más hayan atraído su atención sobre el plasma. Conviene invitar a que los alumnos realicen exposiciones orales de sus trabajos, ya que es un aspecto importante en relación con la convergencia al espacio EEES.

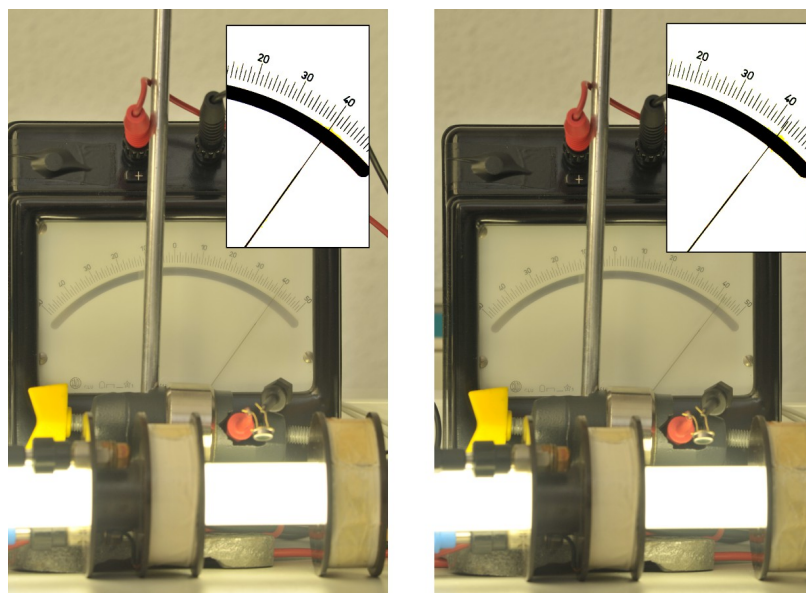


Figura 5. Dispositivo experimental con las bobinas desconectadas (izquierda) y conectadas (derecha). Se puede apreciar un zoom del dial del amperímetro donde se observa la variación de la corriente medida por el fotodiodo.

Conclusiones

En el presente trabajo, se ha presentado una propuesta para introducir un concepto nuevo de física a los alumnos de niveles preuniversitarios: el plasma. En esta propuesta se pretende motivar a los alumnos, así como fomentar su interés por la tecnología y la aplicación de la física que les rodea. Para ello, se hace uso de objetos cotidianos como los tubos fluorescentes, y de las TIC en el aula, así como se aborda la introducción del concepto desde una perspectiva CTSA. Asimismo, la introducción teórica del concepto de plasma les permite adquirir una visión conjunta de las diferentes partes de la física que estudian, de forma que se les presenta la multidisciplinariedad del plasma como suma de diferentes ramas de la física como el electromagnetismo, la física atómica o la termodinámica. Así, se pretende que el alumnado interiorice conceptos fundamentales como la carga eléctrica, la energía térmica o los campos eléctricos/magnéticos. Por último, la demostración experimental de que un tubo fluorescente

está compuesto de plasma le da solidez a la propuesta, creando debate y viendo la presencia real del plasma en objetos cercanos. Estamos preparando la presentación de esta propuesta con alumnos de secundaria y bachillerato. El estudio de los resultados y la evaluación de dichas experiencias serán objeto de futuros trabajos.

Agradecimientos

S.P.T. agradece al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte su ayuda de Formación de Profesorado Universitario (FPU). E.D.R. y J.M.D. agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad la financiación parcial mediante el proyecto ESP2013-41078-R.

Referencias

- Acevedo-Díaz J.A., Vázquez-Alonso A., Manassero-Mas M. A. (2003) Papel de la educación CTS en una alfabetización científica y tecnológica para todas las personas. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias* 2 (2), 80-111.
- Charles C. (2009) Plasmas for spacecraft propulsion. *Journal of Physics D: Applied Physics* 42, 163001 (18pp).
- Chen F. F. (1984) *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion. Vol 1: Plasma Physics*. New York. Plenum Press.
- Güemez J., Fiolhais C., Fiolhais M. (2009) Toys in physics lectures and demonstrations – a brief review. *Physics Education* 44 (1), 53-64.
- Guilbert N. R. (1999) Deconstructing a Plasma Globe. *The Physics Teacher* 37, 11-13.
- Kong M.G., Kroesen G., Morfill G., Nosenko T., Shimizu T., van Dijk J., Zimmermann J. L. (2009) Plasma medicine: an introductory review. *New Journal of Physics* 11, 115012 (35pp).
- Nuttall W. J. (2008) Fusion as an energy source: Challenges and Opportunities. *Institute of Physics Report*. London. Institute of Physics.
- Prieto T., España E., Martín C. (2012) Algunas cuestiones relevantes en la enseñanza de las ciencias desde una perspectiva Ciencia-Tecnología-Sociedad. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 9 (1), 71-77.
- Solbes J., Vilches A. (1989) Interacciones Ciencia/Técnica/Sociedad: un instrumento de cambio actitudinal. *Enseñanza de las Ciencias* 7 (1), 14-20.
- Tierno S. P., Conde L., Donoso J. M., Domenech-Garret J. L. (2013) Introducción teórica y experimental del concepto de plasma para alumnos de Secundaria y Bachillerato, póster en XXXIV Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física y 23^{er} Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física. Valencia.
- Vilches A. (1994). La introducción de las interacciones ciencia, tecnología y sociedad (CTS). *Revista Aula de Innovación Educativa* 27, 32-36.