

**REAL ACADEMIA DE DOCTORES
DE ESPAÑA**

**EL LASER:
PARADIGMA DE LA FÍSICA CUÁNTICA E
INSTRUMENTO CLAVE PARA EL DESARROLLO
CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO**

DISCURSO
PRONUNCIADO POR EL

EXCMO. SR. DR. D. JOSÉ LUIS OCAÑA MORENO

EN EL ACTO DE SU TOMA DE POSESIÓN
COMO ACADÉMICO DE NÚMERO
EL DÍA 25 DE SEPTIEMBRE DE 2019

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO DE NÚMERO

EXCMO. SR. DR. D. RAFAEL MORALES-ARCE MACÍAS



**MADRID
MMXIX**

**REAL ACADEMIA DE DOCTORES
DE ESPAÑA**

**EL LASER:
PARADIGMA DE LA FÍSICA CUÁNTICA
E INSTRUMENTO CLAVE PARA EL DESARROLLO
CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO**

DISCURSO
PRONUNCIADO POR EL

EXCMO. SR. DR. D. JOSÉ LUIS OCAÑA MORENO

EN EL ACTO DE SU TOMA DE POSESIÓN
COMO ACADÉMICO DE NÚMERO
EL DÍA 25 DE SEPTIEMBRE DE 2019

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO DE NÚMERO

EXCMO. SR. DR. D. RAFAEL MORALES-ARCE MACÍAS



**MADRID
MMXIX**

© *Real Academia de Doctores de España*
© *El autor*

*A María Jesús,
que con su callada abnegación
ha hecho posibles tantas cosas*

DISCURSO
DEL
EXCMO. SR. DR.
D. JOSÉ LUIS OCAÑA MORENO.

**EL LASER: PARADIGMA DE LA FÍSICA CUÁNTICA E
INSTRUMENTO CLAVE PARA EL DESARROLLO
CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO**

José Luis Ocaña Moreno

ÍNDICE:

PROEMIO

I. INTRODUCCIÓN

II. RESUMEN HISTÓRICO Y FUNDAMENTOS DEL LASER

III. PROPIEDADES EXCEPCIONALES DE LA RADIACIÓN LASER

IV. EL LASER, INSTRUMENTO UBICUO DE EXCEPCIONAL
VERSATILIDAD

V. FUENTES LASER DE POTENCIA Y TECNOLOGÍAS DE
FABRICACIÓN INDUSTRIAL

VI. LA INVESTIGACIÓN DE APLICACIONES DEL LASER COMO
MOTOR DEL DESARROLLO CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO
PARA EL FUTURO DE LA HUMANIDAD

RECAPITULACIÓN / EPÍLOGO

**EL LASER: PARADIGMA DE LA FÍSICA CUÁNTICA E
INSTRUMENTO CLAVE PARA EL DESARROLLO
CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO**

PROEMIO:

Excmo. Sr. Presidente,
Excmos. Señores y Señoras Académicos,
Señoras y Señores:

Es para el que les habla un gran honor tomar hoy posesión como Académico de Número de esta ilustre Real Academia de Doctores de España, tanto más cuanto su ingreso ha venido auspiciado por los tres egregios académicos que en su momento avalaron su candidatura.

En efecto, el contar con el apoyo de tan destacados maestros como el Dr. D. Rafael Morales-Arce Macías, de la Sección de Ciencias Políticas y de la Economía, al que deseo agradecer de manera expresa el haber accedido a pronunciar el Discurso de Contestación; el Dr. D. Federico López Mateos, de la Sección de Ciencias Experimentales y el Dr. D. Juan José Scala Estalella, de la Sección de Ingeniería, supone para mí un gran honor y una confianza que jamás espero defraudar.

El caso del Prof. Scala Estalella, excepcional maestro de tantos ingenieros y profesores a lo largo de su dilatada trayectoria en la E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, constituye, además, un caso de relación paterno-filial en el ámbito académico que trasciende el nivel de la pura colaboración profesional y ha marcado para mí una trayectoria ejemplar a seguir, tanto en lo científico como, sobre todo, en lo personal, de la que deseo dejar público testimonio.

En esta línea de agradecimiento¹, deseo asimismo dejar público reconocimiento en este acto al conjunto de personas que en distintas épocas y circunstancias han ido conformando mi trayectoria hasta este momento de intensa satisfacción.

En primer lugar, a mis padres, Pepe y Clara, que con su constante abnegación lograron transformar en posibles unas progresión y trayectoria vital y académica improbables a tenor de las difíciles condiciones iniciales, y que hoy disfrutarían grandemente si hubieran podido asistir conjuntamente a esta sesión.

Asimismo, a mi esposa, María Jesús, y a mi dos hijas, Ana y Marta, con sus respectivas familias (con especial dedicatoria a mis nietos, Santiago y Miguel), que han sido mi verdadero soporte y motivo de superación. La abnegación de María Jesús ofreciendo su dedicación constante en favor de una familia integrada (especialmente en los tiempos más difíciles de ausencia prolongada), y renunciando de antemano y calladamente a una merecida trayectoria profesional en favor de los logros del que ahora les habla, es verdaderamente encomiable y merece ser públicamente reconocida: Gracias, María Jesús.

Sin ánimo de ser exhaustivo, y aun pidiendo perdón de antemano por las posibles omisiones involuntarias, en este momento, en el que se hace necesariamente memoria de una trayectoria académica, deseo reconocer la influencia que determinadas personas han tenido en la misma, conformándola siempre de forma beneficiosa.

Así, deseo reconocer el influjo positivo recibido de distintos profesores que en momentos clave me han orientado y ayudado de manera decisiva en mi progresión académica, en especial el citado Prof. Juan José Scala Estalella, los Profesores Saturnino de la Plaza Pérez y José Ramón Casar Corredera, respectivamente Expresidente y Presidente de la Sección de Ingeniería de esta Academia, que en su momento fueron los responsables de mi nombramiento como Director del Centro LASER de la UPM, institución en la que he desarrollado una parte sustancial de mi labor investigadora, y los Profesores Angel María Sánchez Pérez (UPM), Luis Ortiz Berrocal (UPM), Dieter Schuöcker (Technische Universität Wien), Michel Autric (Université d'Aix-Marseille) y Janez Grum (Univerza v Ljubljani)).

¹ Se retoma aquí la cita del Dr. D. Federico Fernández de Buján en su Discurso de Toma de Posesión en esta Academia evocando las palabras de M.T. Cicerón “*..nihil est quod malim quam me et esse gratum*”.

Desearía citar, asimismo, al Dr. D. Ramón González Ruiz, académico de la RABACHT, recientemente fallecido, que vivió con ilusión la elección del que suscribe y al que le habría gustado sobremanera asistir a esta Sesión, al Profesor D. Eduardo Rodríguez Moreno, siempre entusiasta de mis logros, y recordar a muchos otros, familiares y amigos, que, aún no siendo citados explícitamente, son objeto de semejante gratitud.

No desearía olvidar en este punto a José Luis González Arévalo (también ya fallecido), con el que, lazos familiares aparte, siempre era estimulante discutir (especialmente sobre Termodinámica y Máquinas Térmicas), ni a su hermana Sagrario, ambos de gran apoyo -especialmente en los tiempos de realización de la Tesis Doctoral- y que fueron de los primeros en fotografiarse con el que les habla una vez investido con el traje académico de Doctor.

Y, finalmente, una obligada referencia de reconocimiento a la ilustre figura científica del Excmo. Sr. D. Francisco Michavila Pitarch, actualmente en situación de Académico Supernumerario y anterior Miembro Numerario de la Academia portador de la medalla nº 58 (de la Sección de Ingeniería), que, a partir de este Acto, espero portar dignamente.

Atendiendo ya al objeto propiamente académico de este Discurso de Ingreso, deseo presentar ante la audiencia un tema que, a pesar de gozar de un conocimiento extenso a nivel popular, no resulta suficientemente conocido a nivel científico y, de forma consecuente, no es con frecuencia valorado en sus posibilidades reales de aplicación a la resolución de problemas científico-técnicos y a la exploración de nuevas fronteras del conocimiento.

Se trata de una disertación académica sobre el LASER, herramienta omnipresente en nuestra sociedad civilizada y popularizada hasta límites insospechados, que constituye un paradigma del desarrollo de la Física Cuántica en el siglo XX y no es, en general, conocida en sus fundamentos profundos y en el extraordinario carácter de sus propiedades, que lo configuran como la verdadera “solución en busca de problemas” con la que empezó a tratarse de forma muy temprana tras su invención².

² En una entrevista publicada en el New York Times el 6 de mayo de 1964, Theodore H. Maiman, constructor del primer LASER que operó según los principios establecidos en su día por Einstein (ver notas ampliadas posteriores), tras analizar distintas posibilidades de aplicación de la nueva fuente de energía radiante, concluyo con la célebre frase “Un LASER es una solución en busca de un problema”.

Correspondiendo con el nivel científico de esta Academia y su carácter marcadamente multidisciplinar, en la presente disertación se presentarán en primer lugar dichos fundamentos científicos de manera interrelacionada con la progresión histórica de hallazgos que culminaron con la construcción y operación del primer LASER, y en apartados posteriores se revisará, sin ánimo de exhaustividad (pero sí de cobertura del mayor espectro posible), el amplio conjunto de las aplicaciones presentes y previsiblemente futuras, de esta singular herramienta.

Perteneciendo el recipiendario a la Sección de Ingeniería de la Academia, se prestará especial atención a aquellas aplicaciones que suponen una mayor notoriedad en la solución de problemas técnicos, pero se intentará al mismo tiempo no descuidar la referencia a otras aplicaciones brillantes en diversas disciplinas (por lo demás absolutamente superabundantes), de manera que el contenido resulte finalmente equilibrado. Como nota práctica, en la edición impresa del Discurso se ha procurado orientar al estudioso para una consulta posterior de los diversos aspectos tratados, incluyendo el necesario conjunto de citas bibliográficas y notas aclaratorias (tentativamente de la mayor actualidad posible) que permitan una consulta en profundidad de dichos aspectos sin la premura que impone la presente comunicación oral.

Procedamos, pues, sin más demora, a exponer el contenido científico del Discurso, que espero sea de interés para todos Vds.

I. INTRODUCCIÓN

Según apuntaba el Prof. Scala Estalella en su Conferencia Inaugural de la Jornada “El Láser y sus Aplicaciones en el Ámbito Industrial”, celebrada el 5 de junio de 1996 en la Universidad de La Coruña³ (la cual recuerdo con especial cariño), todos los descubrimientos científicos o desarrollos tecnológicos con los que se ha enriquecido la Humanidad desde la lejana aurora de la revolución del Neolítico y hasta el impresionante caudal de saber con que se ha cerrado el segundo milenio de la Era Cristiana se pueden clasificar en dos grupos, el primero constituido por todas aquellas aportaciones que han permitido a los hombres conocer mejor las leyes de la Naturaleza y el segundo constituido por todos aquellos que han permitido a la Humanidad hacer lo que antes no podía hacer, incluyéndose claramente el LASER en el segundo grupo.

En el caso de esta singular tecnología, y aún a pesar de las dificultades tecnológicas a las que en las etapas iniciales de desarrollo hubo de hacerse frente, desde el primer momento en que científicos e ingenieros fueron conscientes de las potencialidades ofrecidas por tan poderosa herramienta, la investigación no cesó de perfeccionarla junto con sus posibilidades de uso, dándose lugar a un sinnúmero de notables avances tanto en las propias fuentes LASER como en nuevos procesos de transformación de la materia y a que un número creciente de profesionales la utilizaran en novedosas aplicaciones totalmente originales que nunca antes habían sido siquiera concebidas. Hoy día, el LASER está en las fábricas, en los hospitales, en los supermercados, en los hogares domésticos, en la banca y en las telecomunicaciones, es lanzado al espacio en busca de mundos lejanos y actúa al nivel microscópico del más diminuto ser vivo.

Pues bien, teniendo en cuenta el conocido aforismo de que “*no se quiere nada si antes no se conoce*”⁴, a lo largo de los siguientes párrafos intentaremos acercar a la audiencia siquiera un mínimo conocimiento de esta singular herramienta que, sin duda, está llamada a integrarse tan estrechamente en el ámbito de nuestras vidas. Acerquémonos al conocimiento de la misma y comprendamos cuánto puede contribuir al desarrollo armonioso de la Humanidad.

³ *El Láser y sus Aplicaciones en el Ámbito Industrial*. Volumen de la Jornada Técnica de la E.P.S. de la Universidad de La Coruña. Ferrol, 5 de junio de 1996. Coord. J.L. Ocaña y A. Yáñez. Colección Cursos, Congresos y Simposios, Vol. 57 (1996).

⁴ Ibid.: “*Nihil volitur, nisi precognitur*”

II. RESUMEN HISTÓRICO Y FUNDAMENTOS DEL LASER

En la Edición de 1964 de los Premios Nobel, el galardón en la disciplina de Física fue otorgado a los científicos Charles H. Townes, Nikolai G. Basov y Aleksandr M. Prokhorov. La nominación por parte de la Real Academia Sueca de Ciencias rezaba textualmente: “*Por su trabajo fundamental en el campo de la electrónica cuántica, que ha conducido a la construcción de osciladores y amplificadores basados en el principio MASER-LASER*”⁵.

Hasta la materialización de este hito fundamental para el devenir de la ciencia y tecnología de nuestros días, el camino había sido largo como consecuencia de la dificultad inherente a la verificación práctica y experimentalmente demostrable de la amplificación de flujos de radiación electromagnética mediante inducción de procesos de emisión estimulada.

La posibilidad de dicho tipo de amplificación, que dio nombre a los dispositivos que la ponían en práctica (la palabra LASER es un acrónimo en lengua inglesa que significa Amplificación de Luz mediante Emisión Estimulada de Radiación, y el término MASER hace referencia a los dispositivos equivalentes amplificadores de radiación en la región espectral de las microondas) fue por primera vez indicada por Albert Einstein en su artículo de 1917 en *Zeitschrift für Physik* “*Sobre la Teoría Cuántica de la Radiación*”⁶.

En dicho artículo, y aún sin la existencia de una base cuántica suficientemente establecida⁷, Einstein apuntó por primera vez la necesidad

⁵ The Nobel Prize in Physics 1964. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2018. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1964/summary/>>

⁶ A. Einstein: “*Zur Quantentheorie der Strahlung*”. *Physikalische Zeitschrift*, 18, 121-128 (1917)

⁷ El 14 de diciembre de 1900, Max Planck había presentado su trabajo acerca de la ley de distribución de la energía en la radiación del cuerpo negro en la Sociedad Alemana de Física en Berlin (“*Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum*”, *Annalen der Physik* IV, 4, 553-563 (1901)), artículo que puede considerarse como el iniciador de la Física Cuántica; en 1905 el propio Albert Einstein había publicado su propuesta de modelo de fotón como ente portador independiente de energía cuantizada, responsable del efecto fotoeléctrico (“*Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*”, *Annalen der Physik* IV, 17, 132-148 (1905)); y en 1913 Niels Bohr había publicado su modelo atómico en el que describía los procesos de absorción y emisión de radiación (“*On the Constitution of Atoms and Molecules*”, *Philosophical Magazine* VI, 26, 1-25 (1913)), pero aún no se habían establecido las bases para la predicción del comportamiento cuántico de las partículas con arreglo a leyes de probabilidad y su diferenciación estadística en función de su

de admisión de un proceso de “emisión estimulada”, esto es, influenciado directamente por el flujo de fotones previamente existente, al objeto de poder justificar el notable resultado obtenido años antes por Planck de la distribución de energía en el espectro de radiación del cuerpo negro. El propio Einstein había ya dado los primeros pasos en esta dirección al proponer en su artículo de 1905 sobre la naturaleza corpuscular de la luz (fundamento de su justificación del efecto fotoeléctrico) el hecho de que la cuantización de la energía propuesta por Planck no sólo debía considerarse para los “osciladores” (en esencia, los átomos vibrantes), sino también a las ondas electromagnéticas emitidas por ellos (es decir, la radiación electromagnética), de manera que la energía de dichas ondas debería ser considerada como “cuantizada” en forma de “fotones” o “cuantos de radiación electromagnética”, cada uno portando energía proporcional a su frecuencia y siendo la constante de proporcionalidad la propia constante de Planck.

De forma concreta, Einstein escribió las ecuaciones diferenciales correspondientes a la absorción y emisión de energía por los “osciladores” de Planck considerando que los sistemas excitados podían desexcitarse de forma aleatoria siguiendo una cadencia proporcional al número de sistemas excitados y haciendo figurar de forma explícita el ritmo de absorción de energía por los mismos en función del flujo de energía incidente sobre el sistema. El hallazgo fundamental de Einstein fue darse cuenta de que la obtención del espectro de energía radiada por el cuerpo negro en condiciones de equilibrio (distribución de Planck) sólo se podía lograr mediante la admisión de procesos de emisión inducidos por el propio flujo de radiación existente en competencia con el proceso de absorción. En el momento de este hallazgo no podía justificarse físicamente la forma en la que dichos procesos de emisión “inducida” o “estimulada” podrían tener lugar⁸, pero por primera vez fue puesta de manifiesto la diferencia entre

momento cinético intrínseco (S.N. Bose: “*Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese*”, *Zeitschrift für Physik*, 26, 178-181 (1924); E. Schrödinger: “*Quantisierung als Eigenwertproblem*”; *Annalen der Physik*, 384, 361-376 (1926); W. Heisenberg: “*Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*”, *Zeitschrift für Physik*, 43, 172-198 (1927); W. Pauli: “*The Connection between Spin and Statistics*”, *Physical Review*, 58, 716-722 (1940)).

⁸ Esto sólo se pudo justificar posteriormente una vez que quedaron establecidas las bases de la Teoría Cuántica en términos de probabilidades de transición entre estados y el carácter favorecido de las transiciones que implicaban el nacimiento de fotones en estados cuánticos preexistentes de acuerdo con la estadística cuántica de Bose-Einstein.

procesos de emisión de radiación espontáneos y procesos de emisión de radiación inducidos por el propio campo de radiación preexistente.

Junto con el artículo inicial de Planck, el artículo de Einstein de 1905 significó, ciertamente, el comienzo de la “revolución cuántica”, que transformó nuestra manera de entender la Física a escala microscópica, en particular las leyes de interacción de la radiación con la materia. Estas leyes son el elemento fundamental para la comprensión del proceso de emisión estimulada de radiación y, en definitiva, el funcionamiento del LASER⁹, pero, por las razones que en los próximos párrafos iremos desvelando, la evolución del conocimiento teórico-experimental hasta la puesta en funcionamiento del primer dispositivo fundamentado en los procesos de emisión estimulada no fue una realidad hasta mediados del siglo pasado, específicamente durante la década 1950-1960. En dicha década se pudieron confirmar finalmente las predicciones de Einstein sobre la base de un mayor conocimiento de la estructura de la materia y su interpretación en términos de la Teoría Cuántica.

En la práctica, hasta que no tuvo lugar el desarrollo formal de dicha Teoría¹⁰, no pudo avanzarse en la aplicación de las consecuencias últimas del proceso de emisión estimulada que, además de ser gobernado por la intensidad de la radiación electromagnética incidente sobre el material absorbente y emisor de radiación (flujo de fotones por unidad de tiempo y superficie), presentaba unas propiedades específicas que, a la postre, son las que posibilitan el proceso global de amplificación de dicho flujo.

En efecto, tras dicho desarrollo formal de la Teoría Cuántica, quedó claro que la razón última de que los fotones (cuantos de radiación) pudieran

⁹ A pesar de que la palabra “Láser” se halla hoy día reconocida como término ordinario en el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, a lo largo de todo el presente Discurso se utilizará la forma original del acrónimo en lengua inglesa (“LASER”) para denominar tanto los dispositivos de este tipo como su principio de operación y los haces de radiación con ellos generados.

¹⁰ Basado fundamentalmente en los artículos citados de E. Schrödinger y W. Heisenberg, S.N. Bose, W. Pauli y las contribuciones de A.H. Compton (“*X-Rays and Electrons; An Outline of Recent X-Ray Theory*”, D. Van Nostrand Company, New York (1926)), L. de Broglie (“*The wave nature of the electron*”, Nobel Lecture 1929), W. Pauli (“*Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren*”, *Zeitschrift für Physik*, **31**, 765-783 (1925)), M. Born (“*Zur Quantenmechanik*”, *Zeitschrift für Physik*, **34**, 858-888 (1925), con P. Jordan; “*The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics*”, Nobel Lecture 1954) y P.A.M. Dirac (“*The Principles of Quantum Mechanics*”, Oxford University Press (1930)).

sufrir el fenómeno de emisión estimulada estriba en su comportamiento como “bosones”, partículas cuánticas que siguen un comportamiento estadístico colectivo descrito por la distribución de Bose-Einstein y que se caracterizan por tener un número cuántico de “*spin*” entero (valor modular de momento cinético intrínseco múltiplo entero de la constante reducida de Planck ($\hbar = \frac{h}{2\pi} \cong 1,055 \cdot 10^{-34} J \cdot s$) y, en consecuencia, una función de onda cuántica colectiva simétrica, en contraposición a los “fermiones”, que siguen un comportamiento estadístico colectivo descrito por la distribución de Fermi-Dirac y se caracterizan por tener un número cuántico de “*spin*” semientero (valor modular de momento cinético intrínseco múltiplo semientero de la constante reducida de Planck) y, en consecuencia, una función de onda cuántica colectiva antisimétrica¹¹.

A pesar de parecer un dato puramente ligado a las propiedades físicas de las partículas sin ninguna influencia práctica en su comportamiento estadístico, la naturaleza de los fotones como partículas cuánticas de tipo bosónico resulta fundamental a la hora de interpretar su comportamiento en un colectivo de partículas idénticas pues, a diferencia de las partículas de tipo fermiónico (sometidas al conocido Principio de Exclusión de Pauli), en los procesos en que intervienen, los bosones muestran una probabilidad cuántica de evolución hacia los estados de mayor ocupación por otras partículas de su misma especie (factor de inducción o favorecimiento bosónico).

Y esta propiedad, que es directamente predicha por la Teoría Cuántica en su análisis del comportamiento de colectivos de partículas idénticas de número cuántico de spin entero, resulta, a su vez, definitiva a la hora de evaluar la probabilidad de nacimiento de fotones en procesos de emisión atómica en los posibles estados cuánticos (determinados por su energía, dirección, fase y dirección de polarización). De acuerdo con la Teoría Cuántica y con la experiencia, el proceso de emisión estimulada no sólo está gobernado por el flujo de fotones incidentes sobre el medio a punto de desexcitarse (como predijo Einstein), sino que la emisión del nuevo fotón tendrá probabilidad máxima de realizarse con las características del fotón

¹¹ Para un seguimiento comprensible y a la vez riguroso de todos los aspectos ligados al comportamiento de los fotones como entes cuánticos por parte de los no versados en la descripción cuántica de los fenómenos físicos, pueden seguirse los libros de texto:
R. Eisberg, R. Resnick: *Física Cuántica*, Limusa (2002).
F.L. Pedrotti, y otros: *Introduction to Optics*. 3rd Edition. Pearson (2006).
O. Svelto: *Principles of Lasers*. 2nd Edition. Plenum Press (1982).

inductor de la transición, es decir, con su misma energía, su misma dirección, su misma fase y su misma dirección de polarización.

Este hecho resulta fundamental a la hora de interpretar el mecanismo del proceso de emisión estimulada de radiación y, como consecuencia de la tardanza en la interpretación de los resultados predichos por la Teoría Cuántica, permaneció inexplorado hasta el desarrollo de los trabajos de Townes y Schwallow por una parte y Basov y Prokhorov por otra¹².

En 1955, Charles H. Townes, un experto en espectroscopía molecular de la Universidad de Columbia en Nueva York y sus colaboradores mostraron, a partir de los trabajos previos de J. Weber y E.M. Purcell y R.V. Pound¹³, la forma de utilizar la emisión estimulada para la construcción de un dispositivo capaz de amplificar señales de microondas al que denominaron MASER (amplificador de microondas mediante emisión estimulada de radiación)¹⁴. Simultáneamente y de forma independiente, Nikolai G. Basov y Alexander M. Prokhorov en el Instituto P.N. Lebedev de Moscú¹⁵ condujeron investigaciones semejantes, y a lo largo de los siguientes años fueron construidos diversos dispositivos tipo MASER por parte de ambos equipos. Tres años más tarde, el propio Townes, Arthur L. Schwalow y los investigadores del Instituto P.N. Lebedev¹⁶ explicaron la forma de extender

¹² En 1924, R.C. Tolman, del Instituto de Tecnología de California, publicó un artículo (R.C. Tolman: “*Duration of Molecules in Upper Quantum States*”, *Physical Review*, 23, 693-709 (1924)) en el que discutía la definición de Einstein de “emisión estimulada” en términos de “absorción negativa” (claramente de forma nada consistente con los en aquel momento emergentes resultados de la Teoría Cuántica) y en 1950, W.E. Lamb y R.C. Retherford (W.E. Lamb, R.C. Retherford: “*Fine Structure of the Hydrogen Atom. Part I*”, *Physical Review*, 79, 549-572 (1950)), seguían utilizando el mismo concepto.

¹³ J. Weber (J. Weber: “*Amplification of microwave radiation by substance not in thermal equilibrium*”, *Transactions of the IRE, PGED 3*: 1-4 (1953)) y E.M. Purcell y R.V. Pound (E.M. Purcell, R.V. Pound: “*A Nuclear Spin System at Negative Temperature*”, *Physical Review*, 81, 279-280 (1951)).

¹⁴ J. P. Gordon, H. J. Zeiger, and C. H. Townes: “*Molecular Microwave Oscillator and New Hyperfine Structure in the Microwave Spectrum of NH₃*”, *Physical Review*, 95, 282-284 (1954). J.P. Gordon, H.J. Zeiger, C.H. Townes: “*The Maser - New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer*”, *Physical Review*, 99, 1264-1274 (1955).

¹⁵ N. G. Basov, A. M. Prokhorov: “*Application of molecular beams for radiospectroscopic investigation of rotational spectra in molecules*”. *J. Exper. Theoret. Phys. (U.S.S.R.)*, 27, 431-438 (1954).

¹⁶ A.L. Schwalow, C.H. Townes: “*Infrared and Optical Masers*”, *Physical Review*, 112, 1940-1949 (1958). A.M. Prokhorov: “*Molecular Amplifier and Generator for Submillimeter Waves*”, *J. Exper. Theoret. Phys. (U.S.S.R.)*, 34, 1658-1659 (1958).

la idea de la emisión estimulada al dominio visible e infrarrojo del espectro electromagnético para construir un “MASER óptico”, es decir un LASER.

Para el funcionamiento de este dispositivo como un verdadero amplificador, propusieron la utilización de luz ordinaria al objeto de excitar ópticamente los átomos, obteniendo lo que se conoce como “inversión de población”, una condición estrictamente necesaria ya apuntada en los trabajos de Weber y Purcell y Pound que permitía el que los fotones resultantes del proceso de desexcitación de los átomos pudieran emitirse con características semejantes a los de otros fotones presentes en el medio. Sin embargo, resultaba aún necesario concebir un esquema cuántico de amplificación (conjunto de niveles atómicos de energía en los que las probabilidades de transición entre niveles fueran adecuadas al fomento de la emisión estimulada entre dos niveles dados) que evitara el fenómeno de saturación¹⁷ y permitiera aprovechar la excitación externa para producir un flujo amplificado de fotones en una dirección preestablecida, de manera que fuera aprovechable externamente.

Dichas mejoras fueron materializadas en 1960 por Theodore H. Maiman, de los laboratorios Hughes, en California (E.U.A.), en un diseño original basado en un cristal de rubí como medio activo iluminado por una lámpara de destellos en forma helicoidal dispuesta a su alrededor y colocado entre dos espejos, uno de ellos semitransparente¹⁸.

En definitiva, el LASER de rubí quedó constituido por un medio activo que actuaría como amplificador siguiendo al principio de emisión estimulada, pero sólo gracias a la existencia de un sistema de excitación suficientemente selectivo y energéticamente eficiente (bombeo por lámpara de destellos) y una cavidad resonante capaz de amplificar en la dirección elegida como privilegiada el incipiente flujo de fotones generado por dicha emisión (cavidad con espejo de salida semitransparente y extremo esmerilado para reflexión total).

¹⁷ Descrito inicialmente por R. Karplus y J. Schwinger (R. Karplus, J. Schwinger: “*A Note on Saturation in Microwave Spectroscopy*”, *Physical Review*, **73**, 1020-1026 (1948)) y abordado por N.G. Basov y A.M. Prokhorov mediante su propuesta de medios activos para la amplificación basados sistemas cuánticos de más de dos niveles energéticos (N.G. Basov, A.M. Prokhorov: “*Possible Methods of Obtaining Active Molecules for a Molecular Oscillator*”. *J. Exper. Theoret. Phys. (U.S.S.R.)*, **28**, 249-250 (1955)).

¹⁸ T.H. Maiman: “*Stimulated Optical Radiation in Ruby*”, *Nature*, **187**, 494 (1960). T.H. Maiman: “*Ruby LASER Systems*”. Patente US3353115A (1967; Depositada en 1961).

III. PROPIEDADES EXCEPCIONALES DE LA RADIACIÓN LASER

De acuerdo con lo expuesto en el apartado anterior, las propiedades de la radiación LASER que le confieren sus potencialidades altamente diferenciadas sobre las cuales se basa su empleo en las distintas aplicaciones son su finura espectral (monocromaticidad), su direccionalidad (bajísima divergencia del haz, que hace posible su propagación hasta grandes distancias conservando una gran parte de su densidad de energía inicial) y, sobre todo, su coherencia (flujo de fotones monoenergéticos, paralelos, en fase y en idéntico estado de polarización).

A pesar de enumerarse como independientes, y de que pudiera parecer que la construcción de una fuente de radiación de tales propiedades podría realizarse por aproximaciones sucesivas sobre cada una de las mismas, los propiedades de monocromaticidad, direccionalidad y, en último término, de coherencia, no son sino una consecuencia conjunta del proceso de generación de radiación por emisión estimulada.

En efecto, el reiterado hecho de que los fotones integrantes de un haz de radiación LASER son en su práctica totalidad (de acuerdo con lo indicado) procedentes de transiciones cuánticas estimuladas con muy pequeñas anchuras espectrales merced a los diferentes mecanismos de selección de longitud de onda, motiva el que dichos fotones tengan todas energías (y, por tanto, frecuencias) en un muy estrecho intervalo y tengan todas la misma dirección de propagación, la misma fase y la misma dirección de polarización, hecho consustancial con su carácter bosónico.

El hecho de que estas propiedades características de los fotones se repliquen de forma unívoca en cada transición estimulada es, realmente, lo que confiere a la radiación LASER su carácter único y excepcional, al no tratarse ya de una radiación a la que se han aplicado una serie de filtros o medidas correctoras para alcanzar unas propiedades de monocromaticidad y direccionalidad independientes (caso, por ejemplo, de una radiación filtrada en cuanto a longitud de onda y posteriormente colimada), sino que la propia naturaleza de la emisión estimulada de partículas bosónicas en el caso de las transiciones LASER confiere la propiedad diferencial de la coherencia, lograda a través de la concordancia de fase entre todos los fotones (estimulantes y nacidos de emisión estimulada) que viajan en la cavidad.

La propiedad de coherencia es, efectivamente, la estrictamente característica de la radiación LASER y no puede ser conseguida por ningún otro tipo de mecanismo de emisión de radiación que no sea el citado de emisión estimulada, motivo por el cual la consustancialidad de monocromaticidad, direccionalidad y coherencia y su conjunción para dar lugar a una fuente de un elevadísimo “brillo”¹⁹ es realmente la propiedad definitoria de este singular tipo de radiación.

Considerada en un marco estrictamente físico, esta propiedad es realmente sobresaliente, pues supone en la práctica el hecho de que, tras el proceso de amplificación en una cavidad LASER, un colectivo ingente de fotones²⁰ viaja en el espacio mostrando su naturaleza dual, corpuscular y ondulatoria, de forma coherente (paralela y en fase) y, por tanto, sin mutua interferencia destructiva, pudiendo alcanzar enormes distancias con una mínima dispersión y, lo que es más importante, pudiendo atravesar distintos tipos de elementos ópticos sin perder dicho carácter.

Esto tiene, indudablemente, una notable importancia desde un punto de vista práctico, pues el hecho de que un haz LASER pueda enfocarse a través de un sistema óptico manteniendo su propiedad fundamental de coherencia permite, por una parte, la utilización de una fuente de radiación electromagnética con unas especialísimas propiedades de finura espectral, direccionalidad y propagación en fase (materializando el concepto físico de onda plana monocromática a la longitud de onda prefijada, con todas las posibles aplicaciones espectroscópicas, analíticas y metrológicas que en párrafos posteriores se analizarán) y, por otra, la materialización de concentraciones de energía dirigida a niveles imposibles de lograr mediante otras fuentes. Sólo los haces de electrones se pueden comparar con la radiación LASER a este respecto, dado que la potencia total de una

¹⁹ En términos de nomenclatura radiométrica, se denomina “Brillo” de una fuente luminosa a su Radiancia, definida como la energía que dicha fuente proporciona por unidad de superficie y ángulo sólido y siendo sus unidades en el Sistema Internacional $W/(m^2 \cdot sr)$. De aún más profundo significado en relación con la propiedades consustanciales de monocromaticidad, direccionalidad y coherencia es el llamado “Brillo Espectral”, correspondiente a la magnitud Radiancia Espectral, cuyas unidades en el Sistema Internacional son $W/(m^2 \cdot sr \cdot m)$, definida como potencia proporcionada por unidad de superficie, ángulo sólido y anchura espectral de longitud de onda y que incluye la propiedad de monocromaticidad al referir su valor a dicha anchura.

²⁰ Para una fuente LASER de longitud de onda en el dominio visible (tomemos, por ejemplo, $\lambda=500$ nm) y de una potencia moderada (como puede ser 1 kW), se tienen aproximadamente $2,5 \cdot 10^{21}$ fotones todos paralelos y en fase atravesando la sección del material sobre el que se aplique el haz.

fuerza energética no es necesariamente tan importante como la capacidad de que dicha potencia pueda quedar enfocada sobre una pequeña región del espacio, dando lugar a una elevada densidad de energía depositada.

Como quedará puesto de manifiesto a lo largo de los epígrafes posteriores, merced a los elevadísimos niveles de densidad de energía susceptibles de ser depositados localmente sobre pequeñísimas superficies de los materiales mediante un haz LASER enfocado²¹, dichos materiales pueden ser no solamente calentados, sino también fundidos, vaporizados y hasta ionizados para pasar a un estado de plasma.

Utilizadas de una u otra forma, las propiedades descritas dan lugar a las distintas posibilidades de aplicación específica en las que, con generalidad, el LASER es capaz de sustituir con gran ventaja a herramientas convencionales en la realización de sus respectivos cometidos y posibilita la consideración de nuevos usos ni siquiera concebibles con dichas herramientas.

Así, la finura espectral de la luz LASER resulta de especial interés en aplicaciones típicas como espectroscopía y excitación selectiva de materiales y la direccionalidad y la coherencia resultan fundamentales en aplicaciones metrológicas y comunicaciones y, fundamentalmente, permiten la concentración de grandes flujos de energía en pequeñas regiones del espacio, proporcionando la base para el desarrollo de las aplicaciones industriales de tratamiento de materiales y otras avanzadas como, por ejemplo, la obtención de energía por fusión nuclear.

²¹ A título orientativo en este sentido, merece la pena comparar el efecto de una misma cantidad de energía proporcionada a un determinado material de forma térmica y de forma óptica coherente (como es capaz de hacerlo una fuente LASER). Considérese, por ejemplo, el efecto que puede inducir en un determinado material una estufa o radiador típico doméstico de una potencia de 1 kW. Dicho efecto, aún siendo apreciable, se limita al puro calentamiento y elevación del nivel térmico del material receptor en una medida muy baja, tanto menor cuanto mayor sea la conductividad del medio. Por el contrario, si dicha potencia se suministra sobre una pequeña región de dicho medio material con la ayuda de una fuente LASER y el correspondiente sistema óptico de enfoque, el área de la superficie afectada se puede hacer tremendamente pequeña, estando los diámetros de interacción característicos utilizados en las aplicaciones industriales alrededor de las pocas décimas de milímetro. Al depositar la energía del haz LASER sobre esta pequeña superficie se pueden lograr valores de densidad de potencia en el orden de magnitud de varios GW/m², lo cual, en términos comparativos, equivaldría a depositar de forma instantánea sobre la pequeña zona de material afectada la densidad de potencia equivalente a depositar toda la potencia generada, por ejemplo, por una central nuclear de 1 GW sobre una superficie de 1 m².

Por su parte, la capacidad de las fuentes LASER para producir pulsos ultraintensos de radiación implica la posibilidad de instrumentación de muchas aplicaciones basadas en el suministro de las referidas muy elevadas densidades de potencia en puntos muy localizados del material y con elevadísimas cadencias temporales. La referida elevada capacidad de enfoque da, además, como resultado (altamente deseable) una minimización de la zona térmicamente afectada por el proceso, que confiere a esta herramienta un especial interés como herramienta para el tratamiento de materiales.

IV. EL LASER, INSTRUMENTO UBICUO DE EXCEPCIONAL VERSATILIDAD

Se pasará revista a continuación a un conjunto (no exhaustivo) de aplicaciones de las fuentes de radiación LASER que son exponente claro de las potencialidades y versatilidad de esta tecnología.

Aparte de las aplicaciones específicas al procesado industrial de materiales con fuentes LASER de potencia y las aplicaciones del LASER a muy elevada intensidad (que serán tratadas de forma específica en apartados posteriores), merecen ser destacadas, bien por su importancia desde el punto de vista científico o bien por su significación tecnológica, un conjunto de aplicaciones que ponen de manifiesto las peculiaridades de los distintos tipos de sistemas de amplificación de radiación y sus propiedades de uso que les hacen especialmente útiles en cada caso.

Se ha de advertir que, a pesar de ser presentadas como aplicaciones independientes al objeto de guardar un orden en la exposición, las aplicaciones que se citan en los apartados siguientes se hallan, muy frecuentemente, interrelacionadas formando parte de un desarrollo específico que hace uso de la tecnología desde un punto de vista integrado, lo cual es una de las características fundamentales definitorias de la misma.

Se escogerán cuatro áreas consideradas como suficientemente representativas y relacionadas con temáticas presentes en la Academia como paso previo a la propia del tratamiento de materiales con vistas a su transformación, objeto de tratamiento más detallado en un punto posterior, y se piden excusas de antemano por no tratar de forma específica, sino sólo ocasional, las aplicaciones de la tecnología LASER en disciplinas en las cuales la misma ha alcanzado un uso y aprovechamiento espectaculares (en

particular la Medicina y Cirugía junto con sus técnicas diagnósticas asociadas), constituyendo un cuerpo de doctrina tan amplio y tan perfectamente integrado en el que, a diferencia de los Sres. Académicos de las Secciones de Medicina, Veterinaria y Ciencias Experimentales, ampliamente conocedores del mismo²², este ponente no es suficientemente experto.

a) Espectroscopía y otras aplicaciones en el campo de las ciencias fundamentales a escala de laboratorio

La disponibilidad del LASER en la investigación en el campo físico-químico ha introducido modificaciones sustanciales con relación a la época anterior a su descubrimiento.

En efecto, la sintonizabilidad asociada a la finura espectral de la emisión LASER ha permitido el desarrollo en toda su potencialidad de una disciplina fundamental como la espectroscopía y diferentes técnicas asociadas²³: Las diferencias existentes entre los espectros de absorción de los distintos átomos y moléculas, que permiten su excitación selectiva mediante longitudes de onda de radiación concretas, constituyen la base para la detección selectiva, la reacción química selectiva y la separación física selectiva de especies atómicas y moleculares con LASER.

Aparte de otras técnicas con diferentes niveles de sofisticación²⁴, entre las aplicaciones puramente analíticas puede citarse, por ejemplo, la espectroscopía “Raman”²⁵, técnica de análisis molecular no destructiva

²² Se puede consultar, por ejemplo, a este respecto, la documentación de las cinco Jornadas organizadas por esta Real Academia de Doctores de España dentro del ciclo conmemorativo del Año Internacional de la Luz en 2015.

²³ En su edición de 1981, el Premio Nobel de Física fue otorgado de forma compartida a los científicos N. Bloembergen y A.L. Schwalow (colaborador de C.H. Townes en el desarrollo del LASER) por su contribución al desarrollo de la Espectroscopía LASER y a K.M. Siegman por su contribución al desarrollo de la Espectroscopía electrónica de alta resolución. Por su parte, el Premio Nobel de Química de 1999 fue otorgado a A.H. Zewail por sus estudios sobre los estados intermedios de vida muy corta formados en las reacciones químicas mediante espectroscopía LASER en el dominio de los femtosegundos ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$).

²⁴ Ver, por ejemplo, la obra de referencia W. Demtröder: “*Laser Spectroscopy*”. Springer. 2nd Enlarged Edition (1996).

²⁵ Llamada así en honor de Chandrasekhara Venkata Raman (1888-1970), que recibió por el descubrimiento del efecto que lleva su nombre y en el que está basado este tipo de espectroscopía el Premio Nobel de Física en 1930.

basada en el empleo del LASER que, con la simple observación del espectro de radiación retrodispersada por la muestra analizada permite la identificación directa de los materiales que la integran y que, como puede comprenderse, tiene un interés fundamental desde el punto de vista del análisis de posibles contaminantes, de caracterización de la calidad de procesos de fabricación y, de forma muy actual, en la investigación criminalística y en la autenticación de pigmentos originales de capas depositadas en obras de arte, fundamentalmente pictóricas.

Este campo, de gran desarrollo en la actualidad, constituye la base para otras aplicaciones en diversos campos tecnológicos como, por ejemplo, la separación de isótopos, la detección de elementos contaminantes en la atmósfera, la detección, cuantificación y destrucción de productos químicos de gran toxicidad mediante fotólisis, el desarrollo de procesos fotobiológicos y otras, algunas de las cuales revisten especial interés científico, técnico y económico.

Sin embargo, las aplicaciones más importantes ligadas a las propiedades únicas de la radiación LASER que se desarrollan hoy en día en el campo estrictamente científico tienen que ver con la observación y manipulación de átomos en escala espacial nanométrica y en escalas temporales ultracortas²⁶.

Así, en su edición de 2018 (la última edición hasta el momento), el Premio Nobel de Física ha sido otorgado a los investigadores Arthur Ashkin, Gérard Mourou y Donna Strickland por sus “*invenciones revolucionarias en el campo de la física del LASER*”²⁷. En concreto, una mitad del galardón fue otorgada a Arthur Ashkin “*por las pinzas ópticas y su aplicación en los sistemas biológicos*”, siendo la otra mitad otorgada a Gérard Mourou y

²⁶ De femtosegundos y aún más cortas, posibilitadas por la creciente capacidad de las fuentes LASER de proporcionar haces en forma pulsada con estas duraciones. A pesar de que con dichas duraciones de pulso la coherencia de los haces de radiación queda sensiblemente limitada, de forma reciente se han publicado resultados de investigación que describen la obtención de pulsos LASER de duración inferior al femtosegundo, en la frontera de los pocos attosegundos ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$). Ver, por ejemplo: G. Mourou, T. Tajima: “*Exploring fundamental physics at the highest-intensity-laser frontier*”. SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.1201207.004221 (2012). V.V. Strelkov y otros: “*Attosecond electromagnetic pulses: generation, measurement, and application. Generation of high-order harmonics of an intense laser field for attosecond pulse production*”. Physics Uspekhi, 59, 425-445 (2016).

²⁷ The Nobel Prize in Physics 2018. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2019. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/summary/>>

Donna Strickland "*por su método de generar pulsos ópticos ultracortos de alta intensidad*".

Arthur Ashkin, desarrolló unas “pinzas ópticas” que, mediante haces LASER, son capaces de manipular partículas, átomos, virus y otras células vivas, logrando mover objetos físicos mediante la presión de radiación de la luz y que un haz LASER empujara partículas pequeñas hacia su zona de mayor intensidad y las retuviera en la misma. En 1987, Ashkin utilizó las pinzas para capturar bacterias vivas sin dañarlas, lo que en su momento supuso un gran avance científico.

Por su parte, Gérard Mourou y Donna Strickland allanaron, mediante sus desarrollos experimentales, el camino hacia los pulsos LASER más cortos e intensos creados por la Humanidad, alcanzando el éxito al generar pulsos LASER ultracortos de alta intensidad sin destruir el material amplificado. La nueva técnica desarrollada por Strickland y Mourou, denominada amplificación de pulso ensanchado en frecuencia (“*chirped pulse amplification*”), ha sido la base firme sobre la que se han desarrollado y siguen haciéndolo dichas fuentes con un amplísimo espectro de aplicaciones de todo tipo sobre las que volveremos en la parte final de este Discurso.

b) Aplicaciones en el campo de la instrumentación: Metrología, detección remota, inspección y control

Un área que, asimismo, está sufriendo una fuerte transformación como consecuencia de la disponibilidad de las fuentes LASER, con sus propiedades características de monocromaticidad y coherencia, es el de la metrología y técnicas asociadas: En efecto, todas aquellas aplicaciones que puedan utilizar procesos de tipo interferométrico o basados en la dispersión de la luz LASER como elementos de apreciación de magnitudes físicas (longitudes, deformaciones, velocidades, etc.), han visto mejorada de forma significativa su precisión con relación a la obtenida mediante el empleo de instrumentos ópticos convencionales gracias a la finura espectral y direccionalidad de dicha luz (ello cuando no se haya tratado de la definición de aplicaciones y patrones totalmente novedosos basados en dichas propiedades).

Tal tipo de aplicaciones, de las cuales son, sin duda, las más importantes la metrología dimensional, el análisis de tensiones internas y deformaciones

mediante interferometría holográfica²⁸, la velocimetría y las más avanzadas técnicas de microscopía óptica de alta resolución, ha visto incrementada su aplicación de forma sensible en los últimos años, de manera que los métodos ópticos de diagnosis de propiedades y comportamientos mecánicos revisten un indudable interés con vistas a potenciar diversos desarrollos científico-tecnológicos en el futuro.

Un ejemplo característico es el empleo de fuentes LASER para el análisis e inspección de superficies por métodos interferométricos (interferometrías holográfica y de moteado (“*Speckle*”)), capaces de proporcionar resoluciones espaciales muy superiores a las de otros procedimientos ópticos de inspección convencionales. Asimismo, los métodos basados en la generación con fuentes LASER de ondas acústicas y ultrasónicas están permitiendo el desarrollo de técnicas avanzadas de inspección de materiales con capacidad de detección automatizada de defectos en grandes componentes de todo tipo de materiales, siendo la aeronáutica una de las grandes beneficiadas del desarrollo de tales métodos²⁹.

²⁸ En su edición de 1971, el Premio Nobel de Física fue otorgado al científico de origen húngaro Dennis Gabor por su “*invención y desarrollo del método holográfico*”. La holografía, o visión gráfica integral (neologismo etimológicamente derivado del griego ὅλος (todo) y γράφειν (escribir)), es una técnica avanzada de registro fotográfico consistente en la generación de imágenes tridimensionales y espacialmente integradas de un objeto basada en el empleo de la luz coherente. Para la generación de un holograma se utiliza un haz LASER que impresiona un material (normalmente una película fotosensible) a nivel microscópico con la luz dispersada por el objeto observado de forma simultánea a la impresión de dicha película por la luz directa recibida de una parte de dicho haz, de manera que sobre la misma se registra la figura de interferencia luminosa que, observada posteriormente bajo la referencia del haz LASER utilizado, permite la reconstrucción tridimensional y espacialmente integrada del objeto holografiado. Hoy día se han desarrollado técnicas que permiten la generación de hologramas estables sin necesidad de la propiedad de monocromaticidad que aporta el LASER (hologramas de luz blanca), pero el principio de registro interferométrico es semejante. Las ventajas de las técnicas de caracterización de materiales basadas en holografía estriban en que permiten visualizar la integridad estructural de la pieza observada a partir de las deformaciones que experimenta en respuesta a las variaciones de las condiciones ambientales que se producen en su entorno. En particular la interferometría holográfica permite localizar de forma precisa alteraciones estructurales invisibles (grietas, desprendimientos, etc.) que ocurren a nivel microscópico y cuyo estudio requiere una resolución en la detección de los desplazamientos de la superficie del orden de pocas micras. Su gran sensibilidad, unida a su carácter no destructivo, la hacen, asimismo, muy atractiva en el campo del análisis y conservación del elementos delicados, como, por ejemplo, objetos integrantes del patrimonio histórico-artístico.

²⁹ Consultar a este respecto C.B. Scruby, L.E. Drain: “*Laser Ultrasonics: Techniques and Applications*”. Taylor and Francis. New York (1990).

Otras aplicaciones notables de la tecnología LASER en el campo de la metrología dimensional y la calibración industrial son el control dimensional de piezas mecanizadas y el propio control interferométrico de la precisión de las máquinas-herramienta, campo en el que dicha tecnología está suponiendo avances significativos desde el punto de vista de los modernos patrones de calidad exigidos en el ámbito de la producción industrial.

De hecho, a lo largo de los últimos años, la herramienta LASER se ha consolidado como el instrumento metrológico por excelencia, siendo capaz de ser utilizada tanto en aplicaciones que implican grandes dimensiones (como por ejemplo, la automoción y, sobre todo, la aeronáutica y astronáutica, a través de los sistemas de triangulación LASER (“*laser trackers*”³⁰)), como a niveles nanométricos, en los que se requiere la máxima precisión dimensional disponible (precisiones semejantes a las proporcionadas por los microscopios electrónicos, pero logradas con instrumentos basados en fuentes LASER de muy corta longitud de onda, en el dominio de los rayos X). De especial interés en este campo se considera el desarrollo de verdaderos microscopios de radiación ultravioleta extrema (XUV) obtenidos a partir de un plasma excitado con LASER para la observación tridimensional de células y material genético (a nivel de cromosomas) con resolución submicrométrica (de pocos cientos de nanómetros)³¹.

Por su parte, la utilización de técnicas de velocimetría Doppler para la caracterización de flujos fluidos a través de la captación de la radiación LASER dispersada por las partículas de los mismos proporciona, en el momento presente, un elemento preciso de diagnóstico de dichos flujos de

³⁰ Los dispositivos de triangulación óptica basados en LASER (“*Laser trackers*”) son instrumentos que, mediante un sistema de detección a distancia y almacenamiento de coordenadas de puntos son capaces de reconstruir con precisión la geometría de componentes mecánicos (generalmente de grandes dimensiones) y de las posibles desviaciones de su posición real con relación a la de referencia, estando su uso principal en las industrias de montaje automovilístico y aeronáutico. Sobre la base de un sistema mecánico de posicionamiento de varios ejes, incorporan un sistema emisor/detector capaz de medir con precisión dimensional micrométrica distancias relativas entre puntos, permitiendo la reconstrucción tridimensional digital del objeto analizado.

³¹ Ver, por ejemplo, J Rothhardt y otros: “*Table-top nanoscale coherent imaging with XUV light*”. *Journal of Optics*, 20, 113001:1-15 (2018).

gran ayuda para su estudio desde el punto de vista de computacional³². Así, por ejemplo, se puede diagnosticar con la ayuda de la apropiada fuente LASER el flujo turbulento desarrollado en las proximidades de turbinas de turbopropulsores ensayados en túneles aerodinámicos, las distribuciones de velocidades del flujo de gases a través de conducciones, el movimiento gaseoso desarrollado como consecuencia de procesos de combustión en cilindros de motores de combustión interna, etc.

De igual manera, el empleo de técnicas de fotoelasticidad para la caracterización de las propiedades de resistencia de elementos mecánicos a través de la observación de las distribuciones de tensiones bajo carga en modelos a escala constituye una novedosa técnica de caracterización de dichos elementos que se ha visto fuertemente potenciada por la posibilidad de empleo de fuentes LASER³³.

Íntimamente ligadas a las aplicaciones fundamentales de espectroscopía y comunicaciones ópticas, pero con entidad propia para ser citadas de forma explícita, se hallan las aplicaciones de detección y control medioambiental con LASER. En efecto, con ayuda de las propiedades de monocromaticidad y direccionalidad ofrecidas por los haces LASER, ha sido posible el desarrollo de un conjunto de aplicaciones conocidas como de detección remota y control medioambiental que, en la práctica, constituyen, por una parte, un importante método de análisis espectroquímico de la composición del entorno circundante y, por otra, una importante herramienta de detección diferenciada de elementos y formaciones geológicas, biológicos y climáticos, tanto a nivel atmosférico como de la superficie terrestre y los océanos³⁴.

Así, el empleo del LASER con funciones de detección remota en sistemas LiDAR (semejantes a los sistemas RADAR³⁵, pero en el dominio óptico³⁶)

³² Ver, por ejemplo, B. Haddadi y otros: “*Simultaneous Laser Doppler Velocimetry and stand-off Raman spectroscopy as a novel tool to assess flow characteristics of process streams*”. Chemical Engineering Journal, 334,123-133 (2018).

³³ Ver, por ejemplo, C. S. Narayanamurthy y otros: “*Digital holographic photoelasticity*”. Applied Optics, 56, F213-F217 (2017).

³⁴ Ver, por ejemplo, R.J. Simonson, B.G. Hance: “*Method for remote detection of trace contaminants*”, Patente E.U.A. US 6 617 591 (2003) y el libro monográfico R.M. Measures: “*Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*”, Wiley Interscience (1984).

³⁵ Acrónimo en lengua inglesa para la denominación de “*Radio Detection and Ranging*”.

³⁶ Acrónimo en lengua inglesa para la denominación de “*Light Detection and Ranging*”. El LiDAR es, esencialmente, un instrumento que permite determinar la distancia desde

viene permitiendo desde hace algún tiempo (y con una precisión muy mejorada con relación a la de dicho tipo de sistemas) la exploración de la superficie terrestre y la biosfera, proporcionando datos sobre accidentes geográficos, niveles de contaminación atmosférica, posición de bancos de pesca, etc. Como dato representativo de la precisión con la que puede operar este tipo de sistemas, la distancia entre la Tierra y la Luna (variable entre 356 500 km y 406 700 km según los datos de la misión APOLLO de la NASA estadounidense³⁷) puede ser estimada actualmente con una precisión en el entorno de pocos milímetros³⁸.

Bajo principios semejantes, los sistemas de este tipo dedicados a análisis y control medioambiental utilizan los principios de la espectroscopía LASER para detectar, tanto de forma cualitativa como cuantitativa, la presencia de determinados contaminantes indeseables en emisiones a la atmósfera a partir de sus trazas espectrales de absorción de radiación electromagnética, constituyendo elementos óptimos de monitorización y control de la contaminación ambiental, factor importante desde el punto de vista de un desarrollo tecnológico sostenible.

c) Comunicaciones ópticas, procesado y almacenamiento de información

Otro campo en el que el LASER se ha mostrado como un elemento clave ha sido en el desarrollo de las comunicaciones: En efecto, la disponibilidad de emisores de luz coherente y monocromática estimuló, a raíz de la disponibilidad del primer LASER en 1960, la exploración del espectro óptico como soporte de altos flujos de información, de manera que tuvo lugar el comienzo del desarrollo del empleo de las señales ópticas como medio de transmisión de información, hoy floreciente debido al empleo de fibras ópticas como medio para el guiado de dichas señales con

un emisor a un objeto o superficie utilizando un haz LASER de forma continua o pulsada. La distancia al objeto se determina mediante la evaluación del tiempo de demora entre la emisión del pulso y la detección de la señal reflejada en el mismo o bien la diferencia de fase entre las señales emitida y recibida en el caso de sistemas de emisión continua.

³⁷ J.B.R Battat, y otros: "*The Apache Point Observatory Lunar Laser-ranging Operation (APOLLO): Two Years of Millimeter-Precision Measurements of the Earth-Moon Range*". *Astronomical Society of the Pacific*. 121, 29-40 (2009).

³⁸ Ver la propia referencia de la NASA y C. Munghemezulu, L. Combrinck y J.O. Botai: "*A review of the lunar laser ranging technique and contribution of timing systems*". *South African Journal of Science*, 112, Art. #2015-0400 1-9 (2016).

importantes ventajas sobre los dispositivos transmisores de radiofrecuencia convencionales³⁹⁻⁴⁰.

En su edición de 2009, el Premio Nobel de Física fue otorgado a los investigadores Charles K. Kao por sus “*desarrollos fundamentales en relación con la transmisión de luz por fibra óptica para aplicaciones de comunicación ópticas*” y a los investigadores Willard S. Boyle and George E. Smith por su invención de los dispositivos de carga acoplada (detectores CCD) como herramientas de registro de imágenes⁴¹. De forma semejante, en la edición de 2017, el galardón fue otorgado a Rainer Weiss, Barry C. Barish y Kip S. Thorne por sus “*decisivas contribuciones al detector LIGO y la detección de ondas gravitacionales*”⁴².

Por si ello no hubiera quedado suficientemente claro con el sinnúmero de aplicaciones desarrolladas hasta dicho momento sobre la base del empleo del LASER, la concesión de este nuevo galardón puso aún más de manifiesto la importancia del mismo como instrumento científico al servicio de los avances de mayor trascendencia.

³⁹ A este respecto hay que tener en cuenta que, al ser un instrumento basado en radiación electromagnética, y aún a pesar de que la franja estrictamente visible del espectro electromagnético es comparativamente estrecha (400-790 THz), la riqueza espectral del LASER, medida como capacidad de discriminación selectiva de frecuencia frente a la frecuencia base es muy superior a la correspondiente a las señales acústicas, en una relación de varios órdenes de magnitud. En palabras del citado Prof. Scala Estalella, sólo una hipotética suerte de hecatónquiro sería capaz de tocar un “piano electromagnético” (con más de 800 teclas y 66 octavas, unos 9 teclados de piano) de forma semejante a un piano convencional.

⁴⁰ Según la Teogonía de Hesíodo, los Hecatónquiros o Hecatónqueros (en griego, Ἑκατόνχειρες ο Ἑκατόνταχειρας: ‘los de cien manos’), conocidos también como Centimanos (del latín *Centimani*), y de nombres Briareo, Giges y Coto, eran gigantes con 100 brazos y 50 caras, hijos de Gea y Urano. Durante la Guerra de los Titanes, arrojaban hacia éstos rocas de cien en cien. En la Iliada se cuenta que los dioses intentaron derrocar a Zeus, y éste llegó a ser encadenado por Hera, Atenea y Poseidón, pero fracasaron cuando Tetis invocó a Briareo y a los otros Hecatónquiros y éstos acudieron en su ayuda.

⁴¹ The Nobel Prize in Physics 2009. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2019. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2009/summary/>>.

⁴² The Nobel Prize in Physics 2017. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2019. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/summary/>>.

LIGO es el acrónimo en lengua inglesa de Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (Observatorio de ondas gravitatorias por interferometría LASER), descrito en B.C. Barish, R. Weiss: “*LIGO and the Detection of Gravitational Waves*”. *Physics Today*, 52, 44-50 (2009) y que observó por primera vez de forma directa una onda gravitacional (de acuerdo con lo predicho por A. Einstein el 14 de septiembre de 2015).

Desde un punto de vista práctico, el empleo del LASER en comunicaciones supone, actualmente, un elemento de suma importancia sobre cuya base tiene lugar el desarrollo de aplicaciones de gran calado tecnológico, tales como la monitorización y maniobra en puntos remotos y con posible ambiente hostil, la transmisión de cantidades masivas de información en tiempos apropiados para su rápido procesamiento en computador, etc., todo ello aparte de las aplicaciones de carácter más convencional, como, por ejemplo, las de emisión y captación de señales para estimación de distancias entre elementos fijos o velocidades relativas entre elementos móviles, posicionamiento e inspección de elementos en trazados viarios, etc., que están revolucionando, de hecho, este mundo en rápido desarrollo.

Una tecnología íntimamente ligada a la citada, cuyo desarrollo era impensable en el momento de la construcción del primer LASER, que ha encontrado mercados masivos, y cuya evolución ofrece excepcionales perspectivas en conexión con la revolución informática vivida en las últimas décadas, es la del procesado y almacenamiento de información basados en el empleo del LASER. Estas aplicaciones utilizan las propiedades de estos sistemas para captar, almacenar, recuperar y reproducir información en sustitución de los dispositivos electromagnéticos convencionales, siendo ejemplos harto conocidos los lectores ("*scanners*") para la identificación de productos marcados con códigos de barras o matrices de puntos, los sistemas de audio y vídeo de lectura óptica, y las memorias ópticas de computadores (tanto de lectura como de escritura) en las que se basan los más modernos dispositivos de almacenamiento de datos y programas⁴³. De hecho, se estima que la resolución temporal y capacidad de cálculo de sistemas computacionales basados en dispositivos ópticos están al menos tres órdenes de magnitud por encima de los correspondientes a dispositivos puramente electrónicos⁴⁴, y los avances en el manejo de la conmutación y procesado fotónicos han sido tan significativos en los últimos años que ya en el momento presente existen los primeros sistemas de cálculo fotónico de alta

⁴³ Consultar, por ejemplo, algunas de las primeras patentes solicitadas en relación con estos procesos: C.O. Carlson y otros: "*Information processing systems using lasers*". Patente E.U.A. US 3 465 352 (1969) y T. Kitamura: "Recording apparatus with beam scan information reading". Patente E.U.A. US 4 370 678 (1983).

⁴⁴ Ver, por ejemplo, E. Agrell y otros: "*Roadmap of optical communications*". *Journal of Optics*, 18, 063002:1-40 (2016).

velocidad⁴⁵ y se apunta claramente el camino para el futuro de distintos tipos de sistemas de computación fotónica⁴⁶, incluida la vía hacia los computadores cuánticos⁴⁷.

La importancia de todas estas aplicaciones en un marco tecnológico como en el que nos movemos, dominado por las tecnologías de la información, es más que manifiesta, y constituye un ejemplo claro de la forma en que la mera aparición en un momento clave de una tecnología (la del desarrollo del LASER) ha potenciado, mediante un efecto altamente sinérgico, el desarrollo de tecnologías en principio de naturaleza bien distinta.

d) Aplicaciones en ingeniería civil y en la conservación del patrimonio histórico-artístico

De forma más reciente, y en función de la disponibilidad de fuentes LASER de elevada potencia (por encima, incluso de los 100 kW en modo continuo⁴⁸), se ha desarrollado un conjunto de aplicaciones de dicha tecnología basada en su empleo para la fusión y vaporización de materiales típicos de las tecnologías de la construcción.

En efecto, con ayuda de las citadas fuentes LASER de gran potencia se llevan a cabo en la actualidad operaciones de corte de hormigón y otros materiales pétreos en operaciones de desmantelamiento de instalaciones nucleares, horadado de túneles en macizos rocosos, y otras aplicaciones que van cobrando un creciente interés a medida que son disponibles tal tipo de fuentes LASER industriales y que se han visto, además, beneficiadas del uso de dicha herramienta como instrumento de alineamiento y medida.

De forma asociada, tanto en el citado caso del desmantelamiento de instalaciones nucleares como en otros procesos en los que se requiere una descontaminación o limpieza de superficies, el LASER va adquiriendo, en función de sus propiedades de interacción con la materia de forma

⁴⁵ Ver, por ejemplo, Y. Shen y otros: “*Deep learning with coherent nanophotonic circuits*”. *Nature Photonics*, 11, 441–446 (2017).

⁴⁶ Ver, por ejemplo, S. Kim y otros: “*Mie-coupled bound guided states in nanowire geometric superlattices*”. *Nature Communications*, 9, 2781:1-9 (2018).

⁴⁷ Ver, por ejemplo, R. Won: “*Integrated solution for quantum technologies*”. *Nature Photonics*, 13, 77–79 (2019).

⁴⁸ Ver, por ejemplo, E.A. Shcherbakov y otros: “*Industrial grade 100 kW power CW fiber laser*”. *Advanced Solid-State Lasers Congress Technical Digest*. OSA (2013).

selectiva asociadas a su finura espectral, importancia creciente en cuanto a su aplicación a tal tipo de procesos.

El LASER ha mostrado ya su aplicabilidad como agente de limpieza y decapado superficial con minimización del impacto medioambiental asociado a la dispersión de residuos eliminados en un importante conjunto de aplicaciones, entre las que se cuentan, por ejemplo, la eliminación de pintura en componentes aeronáuticos, eliminación de depósitos acumulados en superficies sometidas a contaminación superficial con agentes nocivos para la salud y la ya citada descontaminación radiactiva de superficies de contención en centrales nucleares como paso previo a su desmantelamiento⁴⁹.

Una aplicación de gran interés en esta línea es, asimismo, la eliminación de componentes agresivos y depósitos acumulados en piedra integrante de conjuntos monumentales⁵⁰. En la práctica, la aplicación de la limpieza con LASER a la conservación de obras de arte fue propuesta ya en los años 70 del pasado siglo por L. Lazzarini y J.F. Asmus y⁵¹ a través de una serie de ensayos llevados a cabo en Venecia sobre incrustaciones en piedra, si bien la técnica no avanzó en gran medida, principalmente como consecuencia de las limitaciones tecnológicas de las fuentes LASER pulsadas disponibles en aquel momento. Sin embargo, a partir de 1990, el trabajo de varios centros tecnológicos, instituciones de conservación de piezas de interés histórico-artístico y empresas volcadas en el campo de la

⁴⁹ Ver, por ejemplo, las referencias:

F. Buckstegge y otros: “*Advanced rock drilling technologies using high laser power*”. Physics Procedia, 83, 336-343 (2016).

S.I. Batarseh y otros: “*High Power Laser Technology in Downhole Applications, Reshaping the Industry*”. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 13-16 November 2017, Abu Dhabi, UAE (2017).

E.J. Linyaev y otros: “*High power laser offshore decommissioning tool, system and methods of use*”. Patente E.U.A. US 9 669 492 B2 (2017).

A. Kumar y otros: “*Laser assisted removal of fixed radioactive contamination from metallic substrate*”. Nuclear Engineering and Design, 320, 183-186 (2017).

⁵⁰ Ver, por ejemplo, A. Zanini, L. Bartoli: “*The laser as a tool for the cleaning of Cultural Heritage*”. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 364, 012078 (2018)

⁵¹ Ver las referencias originales:

L. Lazzarini y otros: “*Lasers for the Cleaning of Statuary: Initial Results and Potentialities*”. Journal of Vacuum Science and Technology 10, 1039-1044 (1973).

J.F. Asmus y otros: “*Studies on the interaction of Laser Radiation with art artifacts*”. Developments in Laser Technology II. SPIE Proceedings, 41, 19-30 (1974).

J.F. Asmus: “*Light Cleaning: Laser technology for surface preparation in the arts*”. Technology and Conservation, 3, 14-18 (1978).

restauración⁵², desarrollaron los sistemas LASER y las técnicas necesarias para lograr que la limpieza y eliminación selectiva de contaminantes puedan ser en el momento presente una realidad ampliamente aceptada en las comunidades científicas y de ámbito artístico al objeto de una mejor preservación de las obras.

Y no sólo esto: Dado que las capacidades desarrolladas en el ámbito de la espectroscopía (tratadas en un punto previo) han permitido el desarrollo de poderosísimas técnicas de análisis de la naturaleza de los posibles contaminantes en todo tipo de obras (arquitectónicas, escultóricas, pictóricas y bibliográficas)⁵³, el concurso de la tecnología LASER está resultando de gran importancia a la hora de establecer procedimientos combinados de identificación previa de integrantes iniciales de las obras y posterior restauración con criterios de originalidad. En esta línea merece citarse el imponente trabajo llevado a cabo recientemente por investigadores españoles en la restauración del Pórtico de la Gloria de la Catedral de Santiago de Compostela, en la que el LASER fue utilizado en las etapas iniciales como instrumento de análisis al objeto de un mayor conocimiento de la decoración coloreada inicial del excepcional grupo escultórico⁵⁴⁻⁵⁵.

-
- ⁵² Ver algunas de las referencias originales:
E.I. Hontzopoulos y otros: “*Excimer laser in art restoration*”. 9th Int. Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers. SPIE Proceedings, 1810, 748-751 (1993).
I. Zergioti y otros: “*Laser applications in painting conservation*”. Lacona I: Lasers in the conservation of artworks, Workshop, 4-6 October 1995, Heraklion, Crete, Greece. pp. 57-60 (1997).
C. Fotakis y otros: “*Laser technology in art conservation*”. Resonance ionization spectroscopy 1996: Eighth international symposium. AIP Conference Proceedings, 388, 183-190 (1997).
- ⁵³ Ver, por ejemplo, las referencias:
D. Anglos y otros: “*Laser Diagnostics of Painted Artworks: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy in Pigment Identification*”. Applied Spectroscopy, 51, 1025-1030 (1997).
P.V. Maravelaki y otros: “*Laser-induced breakdown spectroscopy as a diagnostic technique for the laser cleaning of marble*”. Spectrochimica Acta B, 52, 41-53 (1997).
- ⁵⁴ A. Laborde y otros: “*Laser ablation on polychrome stone surface: a protocol for risk evaluation*”. XI Conf. on Lasers in the Conservation of Artworks (LACONA XI). Krakow (Poland). 20-23 September 2016.
A. Laborde: “*La restauración del Pórtico de la Gloria (Catedral de Santiago de Compostela)*”. Patrimonio Histórico de Castilla y León, 60, 20-28 (2017).
- ⁵⁵ Por desgracia, la utilización de la Tecnología LASER para el análisis y reparación de obras de arte no siempre se aplica de una forma programada, y a veces ha de ser utilizada para la subsanación de actos vandálicos que pueden afectar a dichas obras de arte, pudiéndose citar a este respecto los repetidos casos de necesidad de eliminación de

V. FUENTES LASER DE POTENCIA Y TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN INDUSTRIAL

En el presente panorama tecnológico (en el que el coste de las materias primas aumenta de forma mantenida y las exigencias de calidad en los procesos se tornan altamente restrictivas), van cobrando importancia creciente cuestiones relativas a la necesidad de mayores precisión y calidad (metrológicamente controlables) en la fabricación de productos y a la necesidad de mayores grados de flexibilidad en la fabricación.

De forma consecuente, la idea de futuro entre los responsables de las tecnologías de producción industrial recoge la implantación de la Tecnología LASER en los procesos de transformación de materiales como una componente esencial⁵⁶.

En efecto, el número de sistemas LASER de cierta potencia en funcionamiento en todo el mundo no ha cesado de crecer de manera sostenida en los últimos años⁵⁷, estando, en la mayoría de los casos, asociados a sistemas de presentación de piezas y/o manejo del haz según varios grados de libertad programados por computador y provistos de sensores y otros dispositivos opto-electrónicos integrados (que permiten dirigir con altísima precisión potencias del orden de varios kilovatios en régimen continuo y hasta Teravatios⁵⁸ en régimen pulsado) con ayuda de los cuales se pueden practicar taladros sumamente finos en los materiales

grafismos en la propia Catedral de Santiago de Compostela. Ver, por ejemplo, los enlaces de internet:

<<https://www.efe.com/efe/espana/cultura/el-grafiti-en-catedral-de-santiago-podra-ser-borrado-horas-mediante-laser/10005-3712255>>

<<https://www.efe.com/efe/espana/sociedad/nuevas-pintadas-en-la-catedral-de-santiago/10004-3921974>>.

⁵⁶ Ver, por ejemplo:

G. Braun: “*The future for industrial laser materials processing*”. Industrial Laser Solutions for Manufacturing. D. Belforte, Ed.. 02/02/2016. <<https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-31/issue-1/features/the-future-for-industrial-laser-materials-processing.html>>

Wiseguy Reports: “*Laser Processing global market outlook (2016-2022)*”. March 2017. <<https://www.wiseguyreports.com/reports/826979-laser-processing-global-market-outlook-2016-2022>>.

⁵⁷ Ver, por ejemplo, G. Overton y otros: “*Annual laser market review & forecast 2019: What goes up...*”. Laser Focus World. 01/01/2019.

<<https://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-55/issue-01/features/what-goes-up.html>>.

⁵⁸ 1 TW=10¹² W

de mayor dureza conocidos, cortes de formas arbitrarias en chapas de aceros, de aleaciones o de compuestos no metálicos especiales, soldaduras de piezas complicadas (incluso con materiales diferentes), tratamientos superficiales de endurecimiento de gran calidad, recubrimientos con metales resistentes a la corrosión de gran durabilidad, así como una gran variedad de tratamientos especiales muchas veces impracticables por otros métodos.

Todas estas operaciones se pueden poner en práctica, además, con gran versatilidad: Es posible, por ejemplo, utilizar una misma fuente LASER para realizar con su ayuda en distintas estaciones de trabajo cortes de chapa fina, taladros, marcado, soldadura por puntos, etc. O bien, con uno de mayor potencia, además de las operaciones anteriores, otras como soldadura continua o varios tipos de transformaciones superficiales (endurecimiento, fusión, aleaciones, nitruración, carburación, recubrimientos, etc.).

Aparte de las mejoras en precisión y rapidez de las correspondientes tareas permitidas por las elevadas densidades de potencia accesibles, la versatilidad de la herramienta tratada permite, de una forma esencialmente directa, su incorporación en los complejos sistemas industriales dotados de elementos robotizados para fabricación flexible, abre directamente la vía para la definición de procesos de tratamiento altamente individualizados en cuanto a material, geometría y condiciones de procesado (pequeñas series, fabricación "*just-in-time*", introducción de pequeñas modificaciones en productos, etc.) difícilmente imaginables en cuanto a concepción desde el punto de vista de los procesos de fabricación con la tecnología hasta hace pocos años convencional.

A continuación, y tras una breve y simplificada introducción a la física de los procesos de interacción de la radiación LASER con la materia a elevadas intensidades (base necesaria para la comprensión de los a veces sutiles mecanismos puestos en juego en determinadas aplicaciones), se tratarán de forma individualizada (y, por supuesto, sin ánimo exhaustivo) algunas de las aplicaciones más importantes de la Tecnología LASER a actividades industriales de tratamiento y transformación de materiales en procesos de fabricación.

a) Breve descripción fenomenológica de los procesos de interacción de la radiación LASER de elevada intensidad con la materia en aplicaciones industriales de tratamiento de materiales⁵⁹

Cuando la radiación LASER incide sobre la superficie de un blanco, parte de ella es absorbida y parte reflejada. La energía que es absorbida comienza a calentar la superficie, pudiéndose considerar varios regímenes de interés en función de la escala de tiempo característica del proceso y de la potencia por unidad de superficie suministrada por el LASER.

Así, por ejemplo, las pérdidas debidas a conducción térmica son pequeñas si la duración del pulso LASER es muy corta, pero pueden ser importantes para pulsos más largos. Asimismo, puede haber importantes efectos debidos a la absorción de radiación en el vapor y plasma formados sobre la superficie del blanco, siendo la consideración de este efecto (que aparece a intensidades elevadas) importantísima a la hora de predecir la capacidad de absorción real por el material de la energía suministrada por el haz.

Los efectos de calentamiento debidos a la absorción de la energía de haces LASER de elevada potencia pueden ocurrir muy rápidamente, sobre todo si las densidades de potencia suministradas son muy elevadas. La superficie objeto de irradiación rápidamente se calienta hasta la temperatura de fusión del material, siendo esta fusión de fundamental interés en aplicaciones de corte y soldadura.

⁵⁹ Para una descripción más completa de los procesos de interacción de la radiación LASER de elevada intensidad con la materia, pueden consultarse las contribuciones del autor:

J.L. Ocaña: “*Numerical modeling of laser-matter interaction in high-intensity laser applications*”. Eighth International Symposium on Gas-Flow and Chemical Lasers, 1990, Madrid, Spain. SPIE Proceedings, 1397, 813-820 (1991).

J.L. Ocaña: “*Numerical simulation of energy transport mechanisms in high-intensity laser-matter interaction experiments*”. Symposium on Industrial and Scientific Uses of High Power Lasers, 1991, The Hague, Netherlands. SPIE Proceedings, 1502, 299-310 (1991).

J. L. Ocaña y otros: “*Numerical simulation and experimental diagnosis of the laser-plasma interaction in high-intensity processing applications*”. Ninth International Symposium on Gas-Flow and Chemical Lasers, 1992, Heraklion, Greece. SPIE Proceedings, 1810, 566-571 (1993).

J.L. Ocaña y otros: “*Ablation processes induced by UV lasers in metals and ceramics*”. High-Power Laser Ablation, 1998, Santa Fe, NM, United States. SPIE Proceedings, 3343, 927-938 (1998).

Para intensidades inferiores a 10^3 W/cm^2 , la incidencia de un haz LASER sobre un material metálico provoca solamente el calentamiento de su superficie sin fundirla ni vaporizarla: La fracción absorbida de la energía lo ha sido en una profundidad muy pequeña del material y es transportada hacia el interior del mismo mediante un mecanismo de conducción térmica que en ningún caso supone la elevación de la temperatura del material hasta valores que impliquen su fusión o vaporización, aunque sí, muy probablemente, una transformación de su estructura cristalina en estado sólido.

Sin embargo, a medida que la intensidad energética del LASER se hace mayor, transformaciones de más amplio calado van teniendo lugar en la superficie y en el seno del material: Éste puede resultar fundido y vaporizado, e incluso ionizado, dando lugar a un plasma de relativamente elevada densidad que absorbe por sí mismo la radiación LASER incidente y que puede, en función de las condiciones del proceso, bien mejorar la absorción de dicha radiación incidente por el material, o bien apantallararlo frente a ésta.

La rápida elevación de temperatura propiciada resulta, entonces, en una ablación del material fundido y vaporizado hacia el haz incidente, proceso que da lugar, a su vez, a una reacción hidrodinámica que se transmite a la parte condensada del material. Para intensidades del haz LASER por encima de 10^9 W/cm^2 , este efecto resulta de la mayor importancia y constituye la base para el tratamiento de transformación superficial por ondas de choque inducidas por LASER.

b) Procesos industriales de taladrado y ablación con LASER

Una de las primeras aplicaciones industriales del LASER al procesado de materiales fue la realización de taladros de $20 \mu\text{m}$ de diámetro en piezas de relojería⁶⁰. Desde entonces, el taladrado con LASER, manejando diámetros de entre 0,01 y 1 mm, se ha convertido en una de las técnicas más importantes de procesado de materiales resistentes a altas temperaturas, aceros, superaleaciones, wolframio, molibdeno y materiales cerámicos.

⁶⁰ Ver, por ejemplo, las patentes:

I.F. Larsson: “*Method and apparatus for drilling holes by means of a focused laser beam*”. Patente E.U.A. US 3 410 979. 12/11/1968.

E. Kocher y otros: “*Method and apparatus for drilling watch jewels or other workpieces by means of laser beams*”. Patente E.U.A. US 3 962 558. 08/06/1976.

Especial mención merecería, asimismo en este campo, la práctica del sinnúmero de taladros característico de las estructuras aeronáuticas y que, en la práctica, son practicadas con la ayuda de haces LASER en incidencia tanto normal a la superficie como oblicua.

El taladrado de materiales con LASER se lleva generalmente a cabo en modo pulsado al objeto de evitar procesos indeseables de conducción térmica y utilizando preferentemente fuentes LASER de estado sólido de elevado ritmo de repetición, fuentes LASER de gas de excelente calidad de haz o fuentes de última generación con elevadísimas densidades de potencia⁶¹. Dichas elevadas densidades de potencia de estas fuentes LASER son capaces de fundir y vaporizar prácticamente cualquier material, incluso si éste presenta inicialmente alta reflectividad.

En la práctica, el proceso de taladrado con LASER se empezó a llevar a cabo con asistencia de gas reactivo (que ayuda, vía reacción exotérmica, en el proceso de calentamiento del material hasta su vaporización) y de gas de soplado (que ayuda a la eliminación de material fundido).

Sin embargo, últimamente, con el desarrollo de fuentes LASER de emisión en el dominio ultravioleta (tanto de excímero⁶² como de estado sólido con

⁶¹ Consultar, a este respecto, las excelentes referencias de revisión:
W. Schulz y otros: “*Review on laser drilling I. Fundamentals, modeling, and simulation*”. *Journal of Laser Applications*, 25, 012006:1-17 (2013).
G.D. Gautam, A.K. Pandey: “*Pulsed Nd:YAG laser beam drilling: A review*”. *Optics and Laser Technology*, 100, 183–215 (2018).

⁶² El LASER de excímero es un dispositivo amplificador que utiliza como medio activo un dímero (entidad química consistente en dos subunidades con estructura similar) que sólo resulta estable en su estado de mayor energía, que se toma como nivel superior de la transición LASER. Los dispositivos LASER basados en excímeros poseen un gran interés al ser capaces de emitir en modo fundamental radiación en la zona ultravioleta del espectro electromagnético, proporcionando una mayor capacidad de interacción con los materiales, especialmente los metálicos. El primer LASER de excímero fue desarrollado en 1970 por N.G. Basov, V.A. Danilychev y Yu M. Popov en el Instituto de Física Lebedev de Moscú, utilizando un dímero de Xenón (Xe₂) excitado por un haz de electrones para proporcionar emisión estimulada en la longitud de onda de 172 nm. Una mejora posterior fue el uso de haluros de gases nobles (originalmente, XeBr). Un LASER de excímero típico utiliza una combinación de gas inerte como argón, kriptón o xenón, con un gas reactivo. En condiciones apropiadas de estimulación eléctrica, se origina una pseudo-molécula que existe solamente en estado excitado y que, al desexcitarse, emite radiación LASER en el dominio ultravioleta. La aplicación industrial más extendida de los dispositivos LASER de excímero ha sido la fotolitografía en el ultravioleta profundo (longitudes de onda muy cortas), una tecnología fundamental utilizada en la fabricación de dispositivos microelectrónicos.

emisión de pulsos ultracortos en armónicos superiores, con elevado grado de acoplamiento al material tratado y capaces de eliminar la parte seleccionada de éste mediante un mecanismo de foto-ablación), la técnica del taladrado de materiales ha podido extenderse a dimensiones características de taladro del orden de 1 μm o menores sobre los más diversos materiales, con formas arbitrarias, y sin necesidad de aporte exotérmico alguno, lo cual supone un gran avance en el campo al poderse obtener taladros o, en general, volúmenes vaciados de superficie interior perfectamente limpia y sin práctica afectación térmica.

c) **Procesos industriales de corte y soldadura con LASER**

El corte de materiales con LASER consiste, fundamentalmente, en la fusión/vaporización de una estrecha franja de los mismos mediante el movimiento relativo de la pieza en cuestión bajo un haz LASER convenientemente enfocado.

Como en el caso del taladrado (y de la mayoría de las aplicaciones del LASER en procesamiento de materiales), han de ser utilizadas fuentes LASER de elevada potencia (CO_2 , Nd:YAG, excímero, fibra activa⁶³, etc.), ya en régimen continuo, ya en régimen pulsado en función de las propiedades de difusividad térmica del material, y al objeto de minimizar la zona térmicamente afectada por el proceso.

Sin embargo, la radiación ultravioleta del LASER de excímero es muy bien absorbida en tejidos y componentes orgánicos, de manera que, en vez de cortar o quemar, la interacción de fotones de elevada energía permite una afectación directa de las uniones moleculares de los tejidos merced a la cual este tipo de fuente LASER tiene la propiedad de poder levantar o eliminar pequeñas y delgadas capas de células sin dañar los tejidos, lo cual le convierte en un excelente instrumento para cirugías delicadas como la ocular y otras en las que se requiera una gran precisión en la interacción.

⁶³ Un LASER de fibra activa (o simplemente LASER de fibra) es un medio amplificador de radiación en el que la ganancia activa es obtenida en el seno de una fibra óptica dopada con determinados elementos químicos (normalmente lantánidos, como Praseodimio, Neodimio, Disprosio, Holmio, Erblio, Tulio, Yterbio, etc.) cuya excitación se lleva a cabo por medio de un dispositivo externo de bombeo óptico (normalmente un LASER de semiconductor) y cuyo proceso de amplificación de radiación tiene lugar de forma progresiva sobre toda su longitud y merced a mecanismos fotónicos esencialmente distintos de la acción LASER clásica descrita en párrafos anteriores (efectos no lineales), de manera que el flujo final de fotones obtenido en su extremo final excede en un factor numérico importante al flujo presente en el extremo de inicio. Para un conocimiento más detallado de este tipo de fuentes LASER puede consultarse J. Nilsson, D.N. Payne: "*High-Power Fiber Lasers*". Science, 332, Issue 6032, 921-922 (2011).

En el caso de corte de algunos materiales metálicos, el proceso de corte se concibe de forma asistida por gas reactivo y de arrastre, de manera que la propia oxidación del material pueda aportar una parte de la energía requerida para el proceso y que el material que va siendo fundido al paso del frente del haz LASER pueda ser convenientemente expulsado de la zona de corte sin formación de rebabas indeseables. En el caso de otro tipo de materiales (aleaciones de aluminio, aceros inoxidable, etc) cuya oxidación se desea evitar en el proceso de corte, se ha de aportar un gas de protección que minimice la misma y, al mismo tiempo, también proporcione el necesario flujo de arrastre para el material fundido.

Como dato orientativo, un LASER de una potencia intermedia (varios kW) permite el corte de espesores de hasta 10-12 mm de materiales metálicos (incluidos aceros de alta reflectividad) a una velocidad de varios metros por minuto, obteniéndose excelentes resultados en aceros al carbono de baja aleación, zircalloy, titanio, molibdeno y materiales cerámicos, y pudiéndose gobernar fácilmente el proceso de corte mediante los adecuados sistemas de CAD-CAM que controlen las velocidades de movimiento de las piezas objeto de corte bajo el haz.

No deja de ser llamativa en este punto la consideración, a la luz de lo expuesto, de la evolución que a lo largo de la Historia han sufrido las tecnologías de corte de materiales, las cuales, de una u otra manera, han marcado las propias Edades de desarrollo de la Humanidad. En efecto, la clasificación que hoy conocemos de Edades de la Piedra (Paleolítico, Neolítico) y de los Metales (del Bronce y del Hierro) está directamente asociada al tipo de material con ayuda del cual el ser humano fue siendo capaz de desarrollar progresivamente sus actividades de todo tipo, desde la caza hasta el trabajo y manejo de los materiales para la superación de los distintos aspectos de su supervivencia, incluida la fabricación de utensilios para su desarrollo y de armas para su defensa. Y en todos ellos, parece que la capacidad de corte o tallado de otros materiales fue el aspecto fundamental.

A lo largo de la Historia conocida de la Humanidad se evolucionó de forma constante hacia la consecución de materiales que ofrecían una mayor dureza y poseían una mayor capacidad de transformación de otros e, incluso en las recientes transformaciones industriales, se ha evolucionado siempre hacia materiales más duros que tuvieran una mayor y más efectiva capacidad de corte (caso, por ejemplo, del desarrollo de todos los aceros de herramienta y otras aleaciones y compuestos de elevadísima dureza

capaces de mecanizar un amplio conjunto de los materiales utilizados en la industria).

Progresión truncada de forma radical con el advenimiento de las herramientas de corte basadas en LASER, capaces de cortar todo un amplio espectro de materiales, incluidos los de mayor resistencia mecánica, con total ausencia de contacto mecánico: Sólo con la acción de la energía coherente proporcionada por un haz LASER, de manera que un elemento absolutamente sutil como la luz es capaz de vencer toda la resistencia del más duro de los materiales, cambiando radicalmente el paradigma de designación de la era tecnológica en función del material característico. ¿O será que de la Edad del Acero, como se ha denominado al siglo XX, hemos pasado ya a la era tecnológica del LASER (que no es en sí mismo un material)?.

Por su parte, la soldadura con LASER ha alcanzado en los últimos años un elevado nivel de desarrollo que permite su aplicación, tanto a escala microscópica en la soldadura por puntos de pequeños componentes y circuitos integrados a elevados ritmos de producción, como en el límite superior de la soldadura de espesores de hasta varios centímetros de materiales metálicos (típicamente aceros) con fuentes LASER de gran potencia.

El proceso de soldadura puede considerarse, en lo referido a caracterización física, como un procedimiento inverso al de corte, en el que se utiliza la potencia del LASER para fundir (con o sin aportación de material externo) una franja de material que contiene la superficie de separación entre las dos partes a soldar, de manera que, tras la subsiguiente resolidificación, dichas partes queden metalúrgicamente unidas⁶⁴. Ello permite un máximo de fiabilidad en la unión debido a la formación de una única estructura cristalina, así como una minimización efectiva y altamente deseable de la zona térmicamente afectada por la unión en función de la precisión de enfoque del haz.

De forma semejante al caso del corte, los parámetros definitorios de una aplicación de soldadura de materiales con LASER son la densidad de potencia aportada por el haz, la profundidad del surco, la posición relativa del foco del haz con respecto a la superficie externa de las piezas y la

⁶⁴ Ver, por ejemplo, S. Katayama: “*Laser welding*” in McGraw Hill Encyclopedia of Science & Technology, Vol. 9, pp. 707–714 (2012).

velocidad relativa de movimiento del haz con respecto a la misma (velocidad de soldadura).

En lo referido a requerimientos de la fuente LASER empleada para la soldadura de materiales metálicos por penetración profunda (grandes espesores), se requieren densidades de potencia del orden o superiores a 10^6 W/cm^2 , las cuales sólo pueden ser suministradas por fuentes LASER con potencias del orden de varios kW o superiores.

Las ventajas más significativas que ofrece la soldadura LASER frente a otras tecnologías competitivas son, principalmente, una mayor capacidad de penetración en soldaduras de piezas de gran espesor, una más reducida zona de afectación térmica de las zonas adyacentes y, en conjunto, una muy superior controlabilidad y calidad final de la unión, aspectos estos últimos muy potenciados por su elevado grado de automatización y control en tiempo real.

Desde un punto de vista práctico, la soldadura con LASER de elevada potencia es una aplicación fundamental de esta tecnología y está siendo aplicada a un gran número de procesos productivos industriales con gran ventaja sobre las técnicas convencionales de unión⁶⁵.

d) Procesos industriales de tratamiento térmico, recubrimiento y aleación superficial con LASER

El fundamento de los procesos de tratamiento superficial de materiales con LASER consiste en la modificación de la estructura metalúrgica superficial de los materiales al objeto de conferirles propiedades especiales en lo relativo a dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, etc. Se trataría, en definitiva, de procesos similares a los convencionales de temple, recubrimiento superficial, aleación superficial, refusión superficial y otros desarrollados con métodos convencionales, pero aprovechando la

⁶⁵ Ver, por ejemplo:
S. Katayama, Ed.: “*Handbook of Laser Welding Technologies*”. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials. Vol. 41. Woodhead Publishing Ltd., (2013).
M. Shome, M. Tumorulu, Eds.: “*Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)*”. Woodhead Publishing (2015).
J. Lawrence, Ed.: “*Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Applications*”. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, Woodhead Publishing (2018).

capacidad de interacción localizada y controlable posible gracias a las propiedades de los haces LASER⁶⁶.

Las potencialidades brindadas por las fuentes LASER de potencia permiten la realización de todos estos procesos con un máximo de sencillez, eficacia y fiabilidad, permitiendo, además, el tratamiento específico y de forma selectiva sólo de aquellas zonas del material en las cuales sea requerido el tratamiento⁶⁷.

Así, por ejemplo, en el proceso de tratamiento térmico superficial, utilizado sistemáticamente en la industria de automoción para el endurecimiento superficial de levas, cabezas de biela y otros elementos sometidos a desgaste, fatiga o corrosión, el haz LASER se hace incidir sobre la superficie del material con el diámetro de haz y velocidad adecuados para que tengan lugar las transformaciones metalúrgicas perseguidas en un pequeño espesor de material cercano a su superficie, de manera que el resto del material componente del elemento tratado quede totalmente inalterado⁶⁸.

Asimismo, en el caso de recubrimiento o aleación superficial con LASER, se usa la potencia de éste para fundir el material aportado junto con un pequeño espesor del sustrato objeto de tratamiento, de forma que el recubrimiento quede suficientemente bien instalado y adherido tras su resolidificación, o bien incorporado químicamente el material aleado. De esta forma, es posible conseguir de forma eficiente, y con un mínimo de energía puesta en juego, procesos metalúrgicos que, realizados de forma

⁶⁶ Ver, por ejemplo:
D. Gnanamuthu: “*Laser Surface Treatment*”. *Optical Engineering*, 19, 195783 (1980).
W.W. Duley, G. Kinsman: “*Laser Surface Treatment*”. Patente E.U.A. US 4 972 061. 20/11/1990.
C.W. Draper, P. Mazoldi, Eds.: *Laser Surface Treatment of Metals*. Springer Science and Business Media (2012).

⁶⁷ Ver, por ejemplo:
R.C. Reed y otros: “*Laser transformation hardening of steel: effects of beam mode, beam size, and composition*”. *Materials Science and Technology*, 15, 109-118 (1999).
D. Pollack y otros: “*Laser beam shaping device and process including a rotating mirror*”. Patente E.U.A. US 5 293 265. 20/07/1999

⁶⁸ Ver, por ejemplo:
J. Grum: “*Comparison of different techniques of laser surface hardening*”. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 24, 17-25 (2007).
P. Sancho y otros: “*Customized laser beam intensity distribution for the laser surface treatment of geometrically convoluted components*”. *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 223-232 (2019).

convencional, resultarían de un coste en muchos casos prohibitivo. De hecho, los procedimientos de aleación y recubrimiento superficial con LASER se están extendiendo en la actualidad a aplicaciones difícilmente imaginables desde el punto de vista de los procedimientos convencionales⁶⁹.

Finalmente en este punto, una técnica que se presenta como una seria alternativa a los tradicionales procesos de transformación superficial de materiales por vía mecánica (perdigoneado y similares), de gran interés en la industria de bienes de equipo del sector energético y, sobre todo en el sector aeronáutico, es el tratamiento superficial de materiales metálicos mediante ondas de choque generadas por LASER⁷⁰. Esta aplicación, sólo factible con la ayuda de fuentes LASER impulsionales de elevada potencia de pico e intensidad (por encima de 10^9 W/cm²), aprovecha la conversión de energía del LASER a energía termo-fluido-dinámica del plasma generado sobre el material para propiciar el desarrollo de una fortísima onda de detonación capaz de modificar de forma eficiente la estructura cristalina del mismo. A pesar de encontrarse, como otras muchas aplicaciones del LASER a elevada intensidad, en fase de investigación⁷¹,

⁶⁹ Ver, por ejemplo:

E.M: Birger y otros: “*Industrial laser cladding: current state and future*”. *Welding International*, 25, 234-243 (2011).

S.K. Kargapoltshev y otros: “*Laser alloying of wear surfaces with metal components*”. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12, 6499-6503 (2017).

M. Ganjali y otros: “*Laser deposition of nano coatings on biomedical implants*”. En *Emerging Applications of Nanoparticles and Architecture Nanostructures: Current Prospects and Future Trends*, A. Barhoum y A.S.H Makhoulf, Eds., pp. 235-254 (2018).

⁷⁰ La denominación “Tratamiento superficial mediante ondas de choque generadas por LASER” es la acepción en lengua española correspondiente al proceso conocido internacionalmente como “Laser Shock Processing”, e intenta describir el modo en que los materiales tratados por esta técnica sufren una impulsión de naturaleza termo-mecánica en su superficie originada como consecuencia de la súbita expansión del plasma generado a partir de la misma por interacción de pulsos LASER de muy elevada intensidad.

⁷¹ Consultar, a este respecto, algunas de las investigaciones del grupo de trabajo del autor, como, por ejemplo:

J.L. Ocaña y otros: “*Predictive assessment and experimental characterization of the influence of irradiation parameters on surface deformation and residual stresses in laser-shock-processed metallic alloys*”. *Proc. SPIE 5448, High-Power Laser Ablation V*, 642-653 (2004).

J.L. Ocaña y otros: “*Experimental assessment of the influence of irradiation parameters on surface deformation and residual stresses in laser shock processed metallic alloys*”. *Applied Surface Science*, 238, 501-505 (2004).

esta técnica presenta un gran número de ventajas (sobre todo versatilidad y mayor capacidad de penetración) sobre los procedimientos convencionales citados, y ha de constituir, sin duda, un elemento de referencia en el sector en un futuro no lejano.

e) **Procesos industriales de fabricación aditiva de modelos y componentes asistida por LASER**

Asociada a los espectaculares desarrollos de la Tecnología LASER en el tratamiento y transformación de materiales descritos en los puntos anteriores, una aproximación con entidad propia ha ido madurando lentamente en los últimos años hasta constituir en el momento presente uno de los más prometedores conjuntos de aplicaciones de dicha tecnología en prácticamente todos los ámbitos de nuestra vida cotidiana.

Se trata de la metodología de fabricación de todo tipo de objetos basada en la deposición progresiva y ordenada de material asistida por LASER, conocida más prácticamente por la denominación de fabricación aditiva asistida por LASER, en contraposición a la forma inicial (fundamentalmente substractiva en aplicaciones de corte, taladrado y ablación) de empleo de esta herramienta⁷².

Desarrollada de forma especialmente intensa a lo largo de la última década, la tecnología de fabricación aditiva asistida por LASER ha mostrado su gran capacidad para una transformación en profundidad del mundo del diseño y la fabricación industrial y, de hecho, dicho desarrollo ha motivado

M. Morales y otros: “*Model based optimization criteria for the generation of deep compressive residual stress fields in high elastic limit metallic alloys by ns-laser shock processing*”. *Surface & Coatings Technology*, 202, 2257-2262 (2008).

J.L. Ocaña y otros: “*Induction of engineered residual stresses fields and associate surface properties modification by short pulse Laser Shock Processing*”. *Materials Science Forum*, 638-642, 2446-2451 (2010).

J.L. Ocaña y otros: “*Laser Shock Processing: an emerging technique for the enhancement of surface properties and fatigue life of high-strength metal alloys*”. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 8, 38-52 (2013).

J.L. Ocaña y otros: “*Laser Shock Processing as an advanced technique for the surface and mechanical resistance properties modification of bioabsorbable magnesium alloys*”. *Materials Science Forum*, 941, 2489-2494 (2018).

⁷²

Ver, por ejemplo:

D. Gu y otros: “*Laser Additive Manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms*”. *International Materials Review*, 57, 133-164 (2012).

I. Mingareev, M. Richardson: “*Laser Additive Manufacturing Going Mainstream*”. *Optics and Photonics News*, February 2017, pp. 24-31.

unas grandes expectativas y la consiguiente fuerte inversión por parte de empresas de los más punteros sectores tecnológicos: el aeronáutico/aeroespacial, el de energía y bienes de equipo, el de automoción y, muy notablemente en los últimos años, el de aplicaciones biomédicas.

Las dos principales técnicas de fabricación aditiva asistida por LASER (fusión selectiva de materiales en lecho de polvo (SLM) o deposición directa de material fundido (DLMD)⁷³) ofrecen hoy día a los ingenieros mecánicos oportunidades sin precedentes en las fases de diseño y fabricación de componentes de elevado valor añadido, ya por su elevado coste o por su carácter de componentes específicos de problemática sustitución.

Son notables, a este respecto, determinados casos paradigmáticos desarrollados en dichos sectores como, por ejemplo, la fabricación directa con geometría tridimensional detallada de componentes rotativos de alto rendimiento termo-fluídico en un único paso de fabricación (hecho imposible con las tecnologías de fabricación hasta ahora convencionales)⁷⁴ o la fabricación de prótesis de rodilla, cadera o cráneo directamente implantables en el cuerpo humano y con un elevado nivel de personalización, que, además, incorporan el nivel de porosidad superficial adecuado para su correcta integración biológica⁷⁵.

⁷³ Las referencias citadas en la nota anterior proporcionan una visión suficientemente descriptiva de estos dos tipos de tecnología junto con sus principales características y aplicaciones potenciales. Se pueden consultar, además:

D. Gu: *“Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials”*. Springer Verlag (2015).

H. Lee y otros: *“Lasers in additive manufacturing: A review”*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 4, 307-322 (2017).

⁷⁴ Ver, por ejemplo:

L. Xue y otros: *“Laser Consolidation: A Novel Additive Manufacturing Process for Making Net-Shape Functional Metallic Components for Gas Turbine Applications”*. Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. GT015. June 15-19, 2015, Montréal, Canada, GT2015-43971, pp. 1-11.

L. Xue, L., M.U. Islam: *“Free-Form Laser Consolidation for Producing Metallurgically Sound and Functional Components”*. Journal of Laser Applications, 12, 160-165 (2000).

⁷⁵ Ver, por ejemplo:

C. Emmelmann, y otros: *“Laser additive manufacturing of modified implant surfaces with osseointegrative characteristics”*. Lasers in manufacturing 2011: Proceedings of the sixth international WLT conference on lasers in manufacturing. M Schmidt, T Graf, A Ostendorf, Eds.. Elsevier Science, 375-384 (2011).

Y también el caso de las industrias aeronáutica/aeroespacial y de automoción, que han experimentado un crecimiento sostenido en la demanda de estructuras metálicas ligeras (basadas en materiales estratégicos, como aleaciones de titanio, magnesio, tántalo y otros) y componentes móviles de esos mismos materiales posibilitadores de sistemas propulsores de elevada eficiencia energética⁷⁶.

Por su parte, el propio sector del diseño mecánico de dichos componentes ha encontrado en las tecnologías de fabricación aditiva asistidas por LASER una herramienta sin parangón a la hora de la fabricación de prototipos de ensayo capaces de acelerar y minimizar los costes de desarrollo de productos, lo cual ha posibilitado una puesta en práctica fuertemente expansiva de procesos de producción altamente personalizados y con una sustancial reducción de costes⁷⁷.

El propio sector biomédico se está beneficiando de manera cada vez más generalizada, merced a la fabricación aditiva asistida por LASER, de la posibilidad de desarrollo y fabricación de modelos realistas de órganos, incluida su vascularización, capaces de facilitar de forma sustancial determinadas intervenciones quirúrgicas que, de otra forma, podrían tener un incierto pronóstico⁷⁸.

A.L. Jardini y otros: “*Improvement in Cranioplasty: Advanced Prosthesis Biomanufacturing*”. *Procedia CIRP*, 49, 203-208 (2016).

M. Munsch: “*Laser additive manufacturing of customized prosthetics and implants for biomedical applications*”. *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies and Applications*. M. Brandt, Ed.. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials pp. 399-420 (2017).

76

Ver, por ejemplo:

R. Liu y otros: “*Aerospace applications of laser additive manufacturing*”. *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies and Applications*. M. Brandt, Ed.. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, pp. 351-371 (2017).

V. Navrotsky y otros: “*Industrialisation of 3D printing (additive manufacturing) for gas turbine components repair and manufacturing*”. *VGB Power Tech*, 12, 48-52 (2015).

77

Ver, por ejemplo:

D.G. Ahn: “*Applications of Laser Assisted Metal Rapid Tooling Process to Manufacture of Molding & Forming Tools-State of the Art*”. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12, 925-938 (2011).

M.K. Thompson y otros: “*Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints*”. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 65, 737-760 (2016).

78

Ver, por ejemplo:

A. Darwood y otros: “*Re-thinking 3D printing: A novel approach to guided facial contouring*”. *Journal of Craniomaxillofacial Surgery*, 43, 1256-1260 (2015).

Evaluando en conjunto todos los desarrollos asociados al progreso de la tecnología de fabricación aditiva asistida por LASER, se constata en la práctica la inauguración de una fase de cambio paradigmático en el ámbito de las tecnologías de fabricación aplicables a un conjunto amplísimo de sectores tecnológicos, donde la capacidad de personalización va a resultar clave y la posibilidad de sustitución de las tecnologías tradicionales de fabricación por otras potenciadas por unas muy superiores capacidades de diseño y, sobre todo, de manejo de la información (revolución industrial de cuarta generación; Industria 4.0), están ya en el momento presente suponiendo una transformación sustancial de la oferta tecnológica, tanto desde el punto de vista de los costes de producción, como, sobre todo, de la calidad final y especificidad de los productos fabricados.

Recapitulando, finalmente, sobre las ventajas que la utilización de la Tecnología LASER ofrece en los ámbitos tecnológicos citados en los epígrafes precedentes, son de destacar, entre otros, los siguientes aspectos:

Desde el punto de vista de los procesos de fabricación en sí:

- a) Quedan permitidas unas mayores velocidad y fiabilidad de procesado.
- b) Queda permitido el trabajo en condiciones similares sobre una amplia variedad de materiales.
- c) Puede ser eliminado o reducido sustancialmente el uso de troqueles y herramientas de ensamblaje.
- d) Queda permitida una reducción importante en los pesos y fortaleza de los elementos resistentes de las máquinas-herramienta.
- e) Resultan normalmente innecesarias operaciones subsidiarias tras la mayoría de los procesos.
- f) Quedan posibilitadas mejoras importantes en la precisión dimensional y el ajuste entre piezas mecanizadas, así como un mejor grado de repetibilidad en las operaciones.

Desde el punto de vista de la planificación y gestión de la fabricación:

- a) Queda fácilmente posibilitado el trabajo sobre una gran variedad de tamaños y formas.

C. Scott: “*Twin Babies No Longer Joined at the Brain Thanks to 3D Technology*”. October 2016. <<https://3dprint.com/153280/conjoined-twins-3d-surgery/>>.

S.A. Goehrke: “*3D Printed Models in the Operating Room: 3D Systems Brings Technology to Surgeons*”. December 2016. <<https://3dprint.com/159082/3ds-healthcare-models/>>.

- b) Queda permitida una mayor flexibilidad en la utilización de estaciones de trabajo, al ser permitidas en forma conjunta operaciones de taladrado, corte, micromecanizado, tratamientos superficiales, soldadura, etc.
- c) Queda realmente posibilitada la automatización de las operaciones con gran precisión y fiabilidad.
- d) Queda asimismo posibilitada la interconexión de operaciones en secuencias complejas (incluida la posibilidad de intercambio de haz entre distintas estaciones para operaciones "*just-in-time*")
- e) Queda permitido el trabajo en entornos remotos o inaccesibles mediante el uso de fibra óptica.

Desde el punto de vista de la gestión integral y competitividad de la producción:

- a) Quedan permitidos ahorros sustanciales en la utilización de materiales y en los costes de fabricación.
- b) Son obtenibles, en general, unas mayores calidades de fabricación.
- c) Queda posibilitada una optimización efectiva en la concepción de los procesos de fabricación
- d) Queda posibilitada la realización de procesos esencialmente inabordables con tecnologías convencionales de fabricación.

Por todo ello, y aún teniendo en cuenta algunas dificultades aún por salvar, fundamentalmente las relativas a elevado coste inicial de los equipos y portabilidad de fuentes de gran potencia, las aludidas cada vez más estrictas exigencias en cuanto a calidad de los procesos a que las modernas tecnologías de fabricación habrán de hacer frente en el futuro hacen concluir en la gran importancia que para el futuro ha de revestir el LASER como elemento clave para el desarrollo de un cada vez más importante número de tareas productivas.

De la misma forma, teniendo en cuenta la capacidad mostrada por el LASER para ser integrado de forma ventajosa frente a otras tecnologías en las más diversas aplicaciones en función de sus extraordinarias propiedades (que lo configuran como un elemento sinónimo de precisión y calidad), se ha de considerar la Tecnología LASER en su conjunto como un elemento de base ciertamente importante como motor del desarrollo tecnológico en áreas de especial nivel y un instrumento de gran potencial como soporte de procesos de innovación industrial.

VI. LA INVESTIGACIÓN DE APLICACIONES DEL LASER COMO MOTOR DEL DESARROLLO CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO PARA EL FUTURO DE LA HUMANIDAD

Los desarrollos científicos y tecnológicos a nivel internacional relacionados con aplicaciones del LASER se plantean en el momento presente desde dos vertientes principales claramente diferenciadas (aunque con áreas comunes de interés): Por una parte, las relativas al estudio y utilización del LASER con todas sus posibilidades de finura espectral y coherencia espacio-temporal en aplicaciones científicas a nivel básico; y, por otra, las relativas al desarrollo y aplicación de fuentes LASER y sus correspondientes estrategias de utilización como herramientas en dispositivos y procesos orientados desde una perspectiva tecnológica.

El primer tipo de estudios se halla realmente en la frontera del conocimiento y forma parte de los desarrollos de mayor significación en el ámbito científico-tecnológico de nuestros días, al abordar problemas que, siendo hoy tratados a nivel fundamental, podrán, en un futuro no muy lejano, integrar de forma directa el conjunto de conocimientos responsables de los desarrollos tecnológicos del momento.

La investigación en fuentes LASER ultra-rápidas, procesos fotoquímicos realizados en la escala temporal de los attosegundos (10^{-18} s) y más breves, fuentes LASER microscópicas como integrantes de posibles dispositivos de comunicación óptica, interacción de la radiación LASER con la materia a extremadamente elevadas intensidades (10^{24} - 10^{30} W/cm²), dando lugar a estados materiales de comportamiento poco conocido, aceleración de materia con fuentes LASER ultraintensas, propulsión por LASER, etc. son todos temas cuya investigación (básica en el momento presente) se ofrece como un activo importante para el futuro desarrollo de aplicaciones de la Tecnología LASER en los ámbitos energético, físico, químico, de materiales, medioambiental, computacional y otros⁷⁹.

⁷⁹

Ver, por ejemplo:

C. Danson y otros: “*Petawatt class lasers worldwide*”. High Power Laser Science and Engineering, 3, e3:1-14 (2015).

J. Zweiback y otros: “*100 J UV glass laser for dynamic compression research*”. SPIE Proceedings. Volume 10082, Solid State Lasers XXVI: Technology and Devices, 100821R:1-7 (2017).

X. Wang y otros: “*Generation of a large compressive strain wave in graphite by ultrashort-pulse laser irradiation*”, Structural Dynamics, 6, 024501:1-5 (2019).

Por su parte, la investigación de carácter más aplicado sobre dispositivos y procesos basados en la Tecnología LASER como elemento fundamental se ocupa de los problemas más concretos (aunque nunca menos interesantes) que plantea la aplicación a los mismos del LASER como herramienta. Ya desde el punto de vista de optimización de las propiedades en las aplicaciones a baja intensidad, ya de los regímenes de interacción y la optimización de los correspondientes procesos en aplicaciones a elevada intensidad. Este último dominio constituye un área de investigación del máximo interés desde una doble vertiente en el entorno de las aplicaciones industriales de los dispositivos LASER.

En efecto, por una parte se centra en la exploración de vías para la obtención de dispositivos de este tipo de cada vez mayor potencia que posibiliten muchas de las aplicaciones que hasta el momento han venido limitadas por dicho factor. En este sentido son característicos todos los desarrollos de nuevos (o tradicionalmente conocidos pero aún no dominados) medios activos para la generación de cada vez mayores niveles de potencia en el caso de fuentes LASER continuas (caso, por ejemplo, de las fuentes LASER de fibra activa)⁸⁰. También con mayores potencias de pico, energías de pulso e intensidades (en el límite de lo termomecánicamente admisible por los materiales ópticos), como en el caso de los sistemas LASER destinados a experimentos de compresión de materia hasta condiciones extremas de densidad y temperatura, área esta última tremendamente atractiva que implica la puesta en juego de las últimas tecnologías en cuanto a materiales, instrumentación electrónica, diagnosis experimental de plasmas y otros muchos aspectos en la frontera del desarrollo tecnológico de nuestros días⁸¹.

M. O’Neil y otros: “*Ultrashort-pulse laser-induced breakdown spectroscopy for detecting airborne metals during energetic reactions*”. *Applied Optics*, 58, C79-C83 (2019).

80

Ver, por ejemplo:

D. Stachowiak: “*High-Power Passive Fiber Components for All-Fiber Lasers and Amplifiers Application-Design and Fabrication*”. *Photonics*, 5, 38:1-17 (2018).

W.C. Wang y otros: “*Recent advances in soft optical glass fiber and fiber lasers*”. *Progress in Materials Science*, 101, 90-171 (2019).

81

Ver, por ejemplo:

B.A. Remington y otros: “*Material dynamics under extreme conditions of pressure and strain rate*”. *Materials Science and Technology*, 22, 474-488 (2006).

D. Batani: “*Matter in extreme conditions produced by lasers*”. *Europhysics Letters*, *EPL*, 114, 65001:1-7 (2016).

I.K. Krasnyuk y otros: “*Study of extreme states of matter at high energy densities and high strain rates with powerful lasers*”. *Laser Physics*, 26, 094001:1-7 (2016).

Importantes laboratorios de investigación y empresas tecnológicas en todo el mundo se hallan en el origen de este estratégico conjunto de desarrollos que, de cara al futuro y desde el punto de vista de todos los sectores de aplicación, han de suponer elementos decisivos de ventaja tecnológica para sus poseedores⁸².

Y es que uno de los objetivos fundamentales que motiva la puesta en práctica de todos estos desarrollos y avances es la expectativa, acariciada ya desde hace algunas décadas, pero hasta el momento siempre esquiva, de lograr procesos de compresión de la materia hasta condiciones propicias para la obtención de un balance positivo de energía procedente de fusión nuclear⁸³.

En efecto, el estudio de la fusión nuclear por confinamiento inercial inducido por LASER ha sido, a lo largo del último medio siglo, un objetivo siempre presente entre los investigadores dedicados al estudio de la interacción de la radiación de esta singular fuente de energía con la materia⁸⁴.

⁸² Ver, por ejemplo:

M.A. Meyers y otros: “*Laser shocking of materials: Toward the national ignition facility*”. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 62, 24-30 (2010).

E.I. Moses y otros: “*Overview: Development of the National Ignition Facility and the Transition to a User Facility for the Ignition Campaign and High Energy Density Scientific Research*”. Fusion Science and Technology, 69, 1-24 (2016).

D. Charalambidis y otros: “*The Extreme Light Infrastructure-Attosecond Light Pulse Source (ELI-ALPS) Project*”. Progress in Ultrafast Intense Laser Science XIII. K. Yamanouchi y otros, Eds.. Springer Series in Chemical Physics. Springer, pp 181-218 (2017).

S. Gales y otros: “*The extreme light infrastructure-nuclear physics (ELI-NP) facility: new horizons in physics with 10 PW ultra-intense lasers and 20 MeV brilliant gamma beams*”. Reports on Progress in Physics, 81, 094301:1-28 (2018).

⁸³ Ver, por ejemplo:

E. I. Moses: “*Ignition on the National Ignition Facility: A path towards inertial fusion energy*”. Nuclear Fusion, 49, 104022:1-9 (2009).

R.E. Olson y otros: “*First Liquid Layer Inertial Confinement Fusion Implosions at the National Ignition Facility*”. Physical Review Letters, 117, 245001:1-5 (2016).

⁸⁴ Ver, por ejemplo:

R. Betti, O.A. Hurricane: “*Inertial-confinement fusion with lasers*”. Nature Physics, 12, 435-448 (2016).

L. Berzak Hopkins y otros: “*Toward a burning plasma state using diamond ablator inertially confined fusion (ICF) implosions on the National Ignition Facility (NIF)*”. Plasma Physics and Controlled Fusion, 61, 014023:1-10 (2019).

La fusión nuclear por confinamiento inercial inducido por LASER se basa en el calentamiento y confinamiento espacial simultáneos de una pequeña masa de combustible nuclear hasta elevadísimas densidades y temperaturas por medio del fuerte efecto de compresión logrado con ayuda de un conjunto de haces LASER simétricamente dispuestos⁸⁵.

Tal procedimiento trata de reproducir a una escala de laboratorio los procesos físicos mediante los cuales tiene lugar la generación de energía en las estrellas.

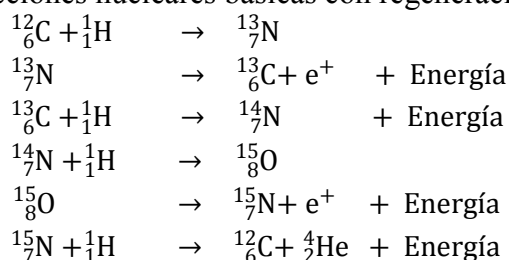
En este caso, y como consecuencia de la elevada masa de las mismas, es la propia atracción gravitacional la responsable del confinamiento espacial de los núcleos (en su mayoría de hidrógeno y sus isótopos) a elevadísimas densidades y en condiciones de elevadísima temperatura y de la consiguiente liberación de energía a través de reacciones de fusión nuclear según el conocido Ciclo de Bethe, mecanismo básico en la nucleosíntesis de los elementos químicos⁸⁶.

En el caso del confinamiento inercial inducido por LASER, el efecto confinante gravitacional es sustituido por un efecto de compresión basado en la inercia y conservación de la cantidad de movimiento mecánico de la materia acelerada por efecto de los haces LASER.

La posibilidad de realización práctica de tal tipo de compresiones a escala terrestre se acarició, ya en 1961, con la proposición, por parte del posteriormente laureado con el Premio Nobel de Física N.G. Basov (citado en notas anteriores) y el científico estadounidense J. Nuckolls de manera

⁸⁵ Para una referencia asequible sobre los fundamentos y distintos tipos de desarrollos tecnológicos en relación con la Fusión Nuclear en sus distintas modalidades, puede consultarse la obra del autor: *“La Fusión Nuclear: Una Energía para el Futuro”*. BERESIT. Cofradía Internacional de Investigadores (Toledo). 3, 65-110 (1989).

⁸⁶ Se conoce como Ciclo de Bethe el ciclo básico de reacciones de fusión nuclear según el cual tiene lugar la transmutación del hidrógeno en elementos más pesados (nucleosíntesis inicial) con la consiguiente producción de energía en las estrellas. Sus reacciones nucleares básicas con regeneración del núcleo de ¹²C son las siguientes:



independiente⁸⁷, de haces LASER de elevada potencia como agentes de la aceleración material requerida para el confinamiento.

Desde entonces, la investigación en busca de las condiciones experimentales en las cuales obtener la ignición del material de fusión con una ganancia energética suficiente que permita el desarrollo del proceso de forma sostenida ha sido constante en numerosos laboratorios en todo el mundo⁸⁸, considerándose dicha obtención como uno de los grandes retos a nivel internacional con importancia decisiva, no sólo desde el punto de vista científico, sino, muy fundamentalmente, para el devenir del abastecimiento energético de la Humanidad.

Por otra parte, volviendo a los más recientes descubrimientos en materia de manipulación micro-nanoscóptica con haces LASER (descritos anteriormente con ocasión de la referencia al Premio Nobel de Física de

⁸⁷ Los datos históricos de ambas proposiciones se recogen de manera conjunta en el volumen conmemorativo de los discursos de aceptación de la Medalla Edward Teller al mérito en el campo de la Fusión Nuclear, que ambos científicos recibieron en 1991. Las correspondientes citas son:

J.H. Nuckolls: “*Edward Teller Medal: Acceptance Remarks*”. Edward Teller Lectures: Lasers and Inertial Fusion Energy. H. Hora and G.H. Miley, Eds. World Scientific Publishing, pp. 85-88 (2005).

N.G. Basov: “*Comments on the history and prospects for Inertial Confinement Fusion*”. Edward Teller Lectures: Lasers and Inertial Fusion Energy. H. Hora and G.H. Miley, Eds. World Scientific Publishing, pp. 89-92 (2005).

⁸⁸ Se citan, en función de su importancia, referencias en esta línea de varios laboratorios estadounidenses, rusos, japoneses y franceses:

H. Azechi y otros: “*The status of Fast Ignition Realization EXperiment (FIREX) and prospects for inertial fusion energy*”. Journal of Physics: Conference Series, 717, 012006:1-3 (2016)

H. Azechi: “*A pathway to laser fusion energy in Japan*”. Journal of Physics: Conference Series, 717, 012119:1-6 (2016)

S.A. Bel’kov y otros: “*Thermonuclear Targets for Direct-Drive Ignition by a Megajoule Laser Pulse*”. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 121, 686-698 (2015).

S.Yu. Gus’kov y otros: “*Fast ignition of asymmetrically compressed targets for inertial confinement fusion*”. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 105, 402-407 (2017).

J.L. Miquel y otros: “*The Laser Mega-Joule: LMJ & PETAL status and Program Overview*”. Journal of Physics: Conference Series, 688, 012067:1-6 (2016)

S. Jacquemot: “*Inertial confinement fusion for energy: Overview of the ongoing experimental, theoretical and numerical studies*”. Nuclear Fusion, 57, 102024:1-12 (2017).

N.B. Meezan y otros: “*Indirect drive ignition at the National Ignition Facility*”. Plasma Physics and Controlled Fusion, 59, 014021:1-13 (2017).

S.P. Regan y otros: “*The National Direct-Drive Inertial Confinement Fusion Program*”. Nuclear Fusion, 59, 032007:1-10 (2019).

2018), resulta evidente que el LASER, siguiendo su aludido carácter de “solución en busca de problemas” es un instrumento que está proporcionando de manera permanente, no sólo un campo sin límites para la investigación científica en sí, sino soluciones muchas veces altamente imaginativas a problemas de todo tipo en los más diversos ámbitos, excediendo frecuentemente los límites de lo racionalmente previsible.

Pensemos, por ejemplo, a este respecto, en las excepcionales y prácticamente ilimitadas posibilidades que los propios desarrollos citados, con sus "herramientas hechas de luz", ofrecen a la hora de manejar con precisión todo tipo de sistemas microscópicos, especialmente los biológicos, y el virtualmente ilimitado campo que sobre su base se abre para la resolución de problemas tradicionalmente considerados como inabordables. En su propia reseña sobre la concesión del Premio, la Academia Sueca de Ciencias reconoció que, a través de sus desarrollos, los investigadores galardonados (y en particular A. Ashkin con su desarrollo de “pinzas ópticas”) abrían un amplio universo de aplicaciones en las cuales un punto fundamental es ya en el momento presente la capacidad de investigar de forma sistemática la acción de los motores moleculares y dar lugar a los recientes avances publicados en el campo de la modificación genética. Asimismo, el propio G. Mourou (copartícipe del Premio) ha realizado, durante su reciente visita a España, unas declaraciones en las que pone de manifiesto la gran potencialidad del LASER en el tratamiento del cáncer como fuente de energía controlada para el desarrollo de la protón-terapia⁸⁹.

En función de todo ello y de otros puntos no tratados de forma extensa en el presente Discurso por razones de brevedad (metrología avanzada, computación óptica, fabricación digital, etc.), se ha de concluir que el LASER ha demostrado ser y continua presentándose a cada momento como un instrumento absolutamente clave para el desarrollo científico-tecnológico conformador, en los más diversos ámbitos, del devenir de la Humanidad.

⁸⁹ Consultar a este respecto:
<<https://www.lavanguardia.com/vida/20190527/462504758016/nobel-de-fisica-destaca-el-potencial-de-la-tecnologia-laser-contr-el-cancer.html>>.

RECAPITULACIÓN / EPÍLOGO

A lo largo del presente Discurso se han ido presentando de forma sucesiva los fundamentos y aplicaciones la Tecnología LASER y, a pesar de no haber pretendido llevar a cabo una relación exhaustiva, una idea que ha podido quedar puesta claramente de manifiesto es que dicha Tecnología constituye en la actualidad un elemento esencial en el desarrollo de la actividad científica y tecnológica del ser humano, siendo pieza clave en multitud de áreas de aplicación que, esencialmente, contribuyen de forma altamente positiva al nivel de calidad de vida de la población del Planeta.

Esta sensación de ubicuidad de la Tecnología LASER no es, en el fondo, nada casual, dado que los propios fundamentos científicos que soportan su funcionamiento son de la naturaleza más brillante y elaborada que ha podido concebir la especie humana con la ayuda inestimable de las leyes de la Física: En efecto, un aprovechamiento tan fructífero de los principios cuánticos de la estructura de la materia y sus transformaciones energéticas sólo podía haberse llevado a cabo de la mano de insignes científicos como los que establecieron sus fundamentos y fueron capaces de poner en práctica los primeros dispositivos con el resultado de que la nueva herramienta, con sus fundamentales propiedades de monocromaticidad, direccionalidad y coherencia, estuviera destinada a una utilización generalizada en función de las mismas.

Pero, más allá de la aparente trivialidad que el uso de dispositivos basados en Tecnología LASER en todo tipo de aplicaciones de nuestra vida cotidiana pueda suponer, no deberíamos dejar de reflexionar sobre el importante papel que dicha tecnología ha representado en el desarrollo real de la ciencia y tecnología de nuestros días, constituyendo una herramienta esencial sobre la que apoyar un importante conjunto de desarrollos multidisciplinares asociados.

Simplemente mirando la relación de descubrimientos galardonados con el Premio Nobel desde la década de los 1960, en que el propio LASER apareció finalmente como dispositivo paradigmático de la Física Cuántica con sus excepcionales propiedades, podemos comprobar que ha sido incesante la participación de este instrumento en un número significativo de descubrimientos posteriores, algunos de los cuales han podido ser comentados en los párrafos previos, haciendo válida la reflexión expresada por los comentaristas científicos con ocasión del último Premio Nobel de

Física (en 2018) y teniendo en cuenta la concesión del año anterior (2017): “*Lasers Rule!*”⁹⁰.

En efecto, dicha relación incluye el desarrollo de la Holografía en 1971, el de la Espectroscopía LASER en 1981, la observación de reacciones químicas ultrarrápidas mediante pulsos LASER ultracortos en 1999, los métodos de enfriamiento y atrapamiento de átomos con LASER en 1997, el desarrollo de nuevas herramientas basadas en LASER de semiconductores para tecnologías de la información en 2000, la transmisión de haces LASER por fibra óptica en 2009, la observación interferométrica basada en LASER de ondas gravitacionales en 2017, etc., pudiendo observarse claramente cómo todos estos desarrollos y otros de los comentados a lo largo del Discurso (sin contar los desarrollos específicos en el campo biomédico) han contribuido de forma significativa a un desarrollo integral y multidisciplinar de diferentes aspectos de la ciencia y la tecnología que posibilitan actualmente unos mejores niveles de calidad de vida para la Humanidad.

Y, de forma semejante a lo atribuido por el historiador Gaius Plinius Secundus (23-79), Plinio el Viejo, en su *Naturalis Historia*⁹¹ a la planta homónima (Laser), interviniente en múltiples “composiciones”, pareciera que el LASER vuelve a ser, de acuerdo con las notas del Prof. O. Svelto, autor de uno de los libros de texto de referencia en la materia⁹², el regalo divino que posibilita, en función de sus extraordinarias propiedades, tan elevado número de aplicaciones, algunas de las cuales verdaderamente espectaculares.

En consecuencia, se considera que la Tecnología LASER, aún estando sujeta (como todo desarrollo científico-tecnológico) a los inherentes riesgos y peligros de utilización irresponsable⁹³, no constituye un elemento

⁹⁰ “2018 Nobel Prize in Physics: *Lasers Rule!*”. SPIE Newsroom, 02 October 2018. <http://spie.org/newsroom/1002-nobel_physics_2018?SSO=1>

⁹¹ Gaius Plinius Secundum: *Naturalis Historia*, XXII, 49. Texto: “*Laser.....inter eximia naturae dona numeratum plurimum compositionibus inseritur*”.

⁹² O. Svelto: *Principles of Lasers*. 2nd Edition. Plenum Press (1982).

En su comentario de la cita de Plinio el Viejo sobre el Laser (planta medicinal) durante la civilización Greco-Romana, el Prof. Svelto indica que la misma era bien conocida y muy celebrada, teniéndose por un regalo de los dioses en virtud de sus propiedades casi milagrosas.

⁹³ Consultar a este respecto la reflexiva obra de M. Born, uno de los forjadores de la Física Cuántica “*La Responsabilidad del Científico*”, publicada en español por Ed. Labor (1968).

meramente incremental de la evolución tecnológica de la Humanidad, sino una verdadera “*tecnología posibilitadora*” que ha sido capaz de potenciar con su simple avance el desarrollo de otras muchas a las cuales sirve de base y que inciden ya hoy directamente en el progreso del género humano.

En el emblema inicial de la Universidad de Coruña, en la que el recipiendario llevó a cabo una parte importante de su actividad docente e investigadora, figuraba el lema en lengua latina “*HAC LUCE*” (“con esta luz”).

Refiriéndose a esta expresión, él mismo argumentaba frecuentemente con las autoridades académicas en la época en la que se responsabilizó de la instalación del primer equipo LASER de potencia en los locales de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol (en la que estaba destinado), haciendo ver las enormes posibilidades de desarrollo industrial y académico que dicha instalación había de comportar para el entorno geográfico del Campus de Ferrol y su astillero (como en la práctica así sucedió).

Dicho lema, que históricamente aludía al faro de la Torre de Hércules, santo y seña de la llamada “Ciudad de Cristal” y puede ser encontrado originariamente en la Rhetorica de Jacobus Hautinus⁹⁴, es considerado de gran propiedad para concluir con esta modesta contribución, pues de nuevo resulta inspirador, por una parte en el sentido “quasi-literal” de que la luz LASER sea un elemento de vanguardia alumbrador del desarrollo científico-tecnológico del futuro de la Humanidad y, por otra parte, para la definición de la verdadera misión de la Ciencia y la Tecnología de alumbrar con claridad hacia el futuro para hacer más noble y positiva la existencia humana.

He dicho.

Muchas gracias.

⁹⁴ Jacobus Hautinus: *Rhetorica Adolescentum Ingeniis Accomodata*. (1647). Cita: “...cum hac luce clariora videantur”.

CONTESTACIÓN
DEL
EXCMO. SR. DR.
D. RAFAEL MORALES-ARCE MACÍAS.

Excmo Señor Presidente de la Real Academia de Doctores de España;
Excmos. Sres Académicos; Señoras y Señores:

Tengo el honor de contestar a la brillante intervención del Doctor D. José Luis Ocaña Moreno con ocasión de su ingreso como Académico de Número de nuestra Corporación, en especial, porque me ofrece la especial satisfacción de comentar el contenido de un Discurso alusivo a una de las mas importantes aplicaciones de las ciencias físicas al desarrollo de un instrumento, el láser, que tanto contribuye y seguirá contribuyendo al desarrollo de la sociedad en innumerables campos como la salud, la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos, y, entre otros, de los procedimientos de fabricación de importantes bienes y servicios para el conjunto de la sociedad.

En primer lugar, me referiré a su historial académico. El Doctor Don José Luis Ocaña Moreno realizó sus estudios en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, que concluyera en 1979 con el mejor expediente académico en su especialidad. Bajo la orientación de nuestro colega de la Sección de Ingeniería, el Doctor Scala Estalella, como ha reconocido el recipiendario, un maestro excepcional de tantos ingenieros de ese centro, siendo, además, sujeto de una relación paterno-filial en el ámbito académico, que trasciende la mera colaboración docente, orientando el desarrollo de una trayectoria ejemplar, tanto en lo científico como lo personal, de la que ha dejado público testimonio.

Con posterioridad, se doctoró en 1982, con la calificación de Sobresaliente “Cum Laude” por unanimidad, con Premio Extraordinario de Doctorado.

A continuación, inició su actividad docente en diversos puestos en el centro que había iniciado sus estudios, accediendo a la categoría de Profesor Titular de Universidad en el Departamento de Energía Nuclear de la Universidad Politécnica, en la que permaneció desde 1984 hasta 1990. Desde esta fecha hasta 1994 ejerció en el Departamento de Física Aplicada.

En dicho año accedió a la Cátedra en el Departamento de Ingeniería Mecánica, Naval y Oceánica en la Universidad de La Coruña, centro en el que prestó sus servicios hasta 1999 en que retornó a la Universidad Politécnica de Madrid, en cuyo Departamento de Física Aplicada continuó su carrera académica hasta el momento presente. Desde el año 2004, director del Departamento de Física Aplicada a la Ingeniería Industrial.

En el año 1999 había sido nombrado director del Centro Laser de la Universidad Politécnica, puesto que desempeñó ininterrumpidamente hasta el año 2016, y que ha sido el centro de gravedad de su labor docente e investigadora, y con la mayor ligazón con el Discurso de Ingreso que estamos comentando.

En el desarrollo de sus funciones en este Centro, el Doctor Ocaña Moreno ha sido un eficiente colaborador de importantes firmas nacionales y europeas para el desarrollo de proyectos de investigación en el área de los láseres de potencia en procesos industriales de fabricación: el Instituto de Investigación de la Universidad francesa de Marsella; el centro Laser franco-alemán de París; la Fundación para la investigación de los láseres de corta longitud de onda en Grecia; el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Liverpool; el Instituto de Procesado con haces de radiación en la Universidad alemana de Stuttgart; el Instituto Fraunhofer de Materiales y Tecnología de Radiaciones de Dresde, etc. Un conjunto de instituciones distinguidas por la alta calidad de su investigación.

Su curricular viene jalonado por la participación activa en 69 proyectos de I+D+i, en 54 de ellos como primer responsable. Autor de 240 artículos en revistas internacionales indexadas y 305 comunicaciones en congresos internacionales, sin olvidar la autoría de 9 patentes, 6 de ellas de ámbito internacional; la dirección de 19 Tesis doctorales, 2 adicionales actualmente en curso, y acreditar 6 quinquenios de docencia y 6 sexenios de investigación.

Y todo ello, integrado con unos valores humanos dignos de destacar y que se acreditan en el desempeño de sus diversos puestos académicos. El Doctor Ocaña, por otra parte, tiene la más alta estima a sus familiares más próximos, en especial a sus padres, que hicieron posible con su esfuerzo y sacrificio su trayectoria vital, a su esposa María Jesús, y a sus dos hijas,

Ana y Marta, sin olvidar a sus nietos, Santiago y Miguel, en la confianza que tendrán todos, hijas y nietos, una referencia de singular valor.

Y centrándonos en su Discurso de Ingreso, en el que significa la importancia del láser como paradigma de la física cuántica e instrumento clave para el desarrollo, recordamos otra vez las palabras del Profesor Scala Estalella pronunciadas en 1996 en la Universidad de La Coruña para el que “en el segundo milenio de la Era Cristiana las innovaciones se clasificaban en dos grupos: el de las aportaciones que han permitido al ser humano mejorar el conocimiento de las leyes de la naturaleza, y, el segundo, el de todos aquellos que permitieron a la humanidad hacer lo que antes no se podía: entre otros, el uso del láser”.

A este respecto, conviene recordar que ya en 1964, la Academia de Ciencias de Suecia concedió el Premio Nobel de Física a los científicos Townes, Basov y Prokhorov por su trabajo fundamental en el campo de la Electrónica cuántica, que hizo posible la construcción de osciladores y amplificadores basados en el principio Máser-Laser. El término “máser”, como ya ha indicado el Doctor Ocaña fuere ya anticipado por Albert Einstein en un artículo del lejano año 2017 sobre la Teoría Cuántica de la Radiación, recordando lo ya anunciado en 1905 sobre la naturaleza corpuscular de la luz, fundamento del conocido “efecto fotoeléctrico”, iniciándose a partir de aquella cifra un acelerado desarrollo de su tecnología, con grandes aplicaciones en los campos de las ciencias de la salud y todas las experimentales, para las que la disponibilidad del láser ha resultado fundamental.

También en el campo de la Metrología e instrumentación, con grandes posibilidades de para la detección remota, inspección y control; en la velocimetría; en la detección, con soportes de naturaleza similar al radar; para los sistemas de análisis y control medioambiental, que a través de la aplicación de los principios de la espectroscopia laser poder registrar, cuantitativa como cualitativamente, la presencia de contaminantes indeseables en emisiones a la atmósfera; como ayuda en las comunicaciones ópticas, procesado y almacenamiento de información, prueba de lo cual fue el reconocimiento en 2009 con el Premio Nobel de Física a los investigadores Kao, Boyle y Smith, que introdujeron los dispositivos y detectores CCD para el registro de imágenes; también en aplicaciones para la ingeniería civil y la conservación del patrimonio histórico-artístico; en los procesos industriales de taladrado; en los de corte

y soldadura; en las actividades industriales de tratamiento térmico, recubrimiento y aleación superficial; en los de fabricación aditiva de modelos y componentes asistidos por láser, sin olvidar cómo la tecnología láser ofrece indudables ventajas en los procesos de fabricación, al permitir mayor velocidad y fiabilidad de procesado; facilitando la reducción del uso de troqueles y herramientas para ensamblajes; para mejora en la precisión de las dimensiones y el ajuste entre piezas mecanizadas, con indudables ventajas, igualmente, en la planificación y la gestión de la fabricación.

En definitiva, las aplicaciones del laser se sitúan en la frontera del conocimiento científico-tecnológico para el futuro de la humanidad. Consecuentemente, y como concluía el Doctor Ocaña, la tecnología “laser” no es otra cosa que el verdadero medio, capaz de potenciar, con su simple avance, el desarrollo de otras muchas, a las que sirve de base, que tienen y tendrán una gran incidencia en la vida del ser humano.

He pretendido resaltar en este breve comentario los aspectos esenciales de la trayectoria académica e investigadora del Doctor Ocaña Moreno, que hoy toma posesión como Académico de Número de la medalla número 58 de la Sección de Ingeniería, al que doy la bienvenida y deseo una larga vida de colaboración en todas las actividades de esta Corporación.

Muchas gracias.



Se terminó de imprimir el presente
Discurso de Ingreso en la
Real Academia de Doctores de España
el día 25 de Julio de 2019,
Festividad de Santiago Apóstol.

