



---

# Diseño y construcción de una fuente de radiación de flujo extremo. Resumen

---

*Autor:*

Francisco VALLE BROZAS

*Directores:*

Luis ROSO FRANCO

Álvaro PERALTA CONDE



## Breve resumen

La presente tesis consiste en el diseño y construcción de una fuente de rayos X mediante la interacción de un láser ultraintenso con un blanco sólido y/o líquido. Más concretamente, se ha investigado la tecnología láser adecuada a este fin, se han estudiado las características de la interacción láser-materia y se han buscado posibles aplicaciones de la radiación X (y electrones) generados.

Hoy en día, el desarrollo de fuentes de radiación ionizante mediante interacción láser-materia ha permitido tener acceso a haces pulsados de rayos X con duración ultracorta –la radiación producida “hereda” las características del láser que la genera- y flujos instantáneos extremos. Esto supone la posibilidad de estudiar la interacción de rayos X con la materia en unos regímenes imposibles de alcanzar por fuentes convencionales. Mientras que un pulso de rayos X generado por láser tiene una duración de cientos de femtosegundos o unos de pocos picosegundos, un tubo de rayos X convencional produce pulsos en el régimen de los microsegundos. Así mismo, los flujos instantáneos alcanzados maximizan los posibles efectos no-lineales, es decir, una serie de efectos que suceden cuando una gran concentración de fotones da lugar a que dos, o más, fotones interaccionen simultáneamente sobre la materia.

Si nos concentramos en la producción de rayos X por láser, hoy en día podemos encontrar montajes relativamente sencillos capaces de producir pulsos de rayos X usando intensidades láser moderadas (en el rango de  $10^{16} - 10^{17} \text{W/cm}^2$ ). En estos montajes, típicamente un láser de femtosegundo es focalizado en un blanco sólido produciendo en los primeros instantes la ionización de la muestra. Cuando la parte principal del pulso llega, el láser interacciona con un plasma en expansión más que con el target sólido en sí. En esta interacción, los electrones son extraídos del plasma por el campo eléctrico del láser, acelerados y reinyectados en él. En este proceso, se produce tanto radiación de Bremsstrahlung, por la pérdida repentina de energía de los electrones reinyectados, así como rayos X característicos del material del target, por la creación de vacantes en las capas internas de los átomos del material que son rápidamente ocupadas por los electrones en capas superiores. Los rayos X así producidos tienen inherentemente las características temporales del pulso láser.

Aunque el montaje para obtener una fuente de pulsos ultracortos de rayos X generados por láser es relativamente sencillo, no está exento de inconvenientes. Si se usa un blanco sólido, es necesario mover el blanco para que el siguiente pulso del láser encuentre una zona limpia del material y la producción de radiación sea eficiente. Esto limita la reproducibilidad de la

producción de rayos X debido a que hay que asegurar las mismas condiciones en el movimiento del blanco. Así mismo, la zona de material sin utilizar es limitada, y eventualmente el blanco debe ser sustituido. Así pues, uno de los requisitos para futuros desarrollos desde el punto de vista de la tecnología láser es la de disponer de fuentes de radiación ionizante con mayor control de las características de la radiación, fuentes más amigables para el usuario y suficientemente robustas para permitir medidas sistemáticas [1, 2].

Uno de los campos en los que existen más esperanzas depositadas para una futura aplicación es en radioterapia. Actualmente, la comunidad científica trata de responder preguntas como ¿podemos en efecto desencadenar fenómenos no lineales con estos flujos instantáneos? ¿hay alguna ventaja en depositar toda la dosis en un periodo ultracorto de tiempo? ¿podemos profundizar en nuestro conocimiento de la dinámica de irradiación de tejidos y así diseñar tratamientos de radioterapia más eficientes? (ver por ejemplo, referencias [3–5]). A este respecto, en este momento se pueden encontrar sólo unos pocos estudios preliminares usando radiación ionizante ultracorta generada por láser en diferentes líneas celulares (la mayoría *in vitro*). Desafortunadamente, los resultados no son concluyentes, siendo necesario continuar las investigaciones [6–14].

Así pues, y teniendo en cuenta el contexto presentado, en esta tesis se pretende, por un lado, desarrollar una fuente de rayos X generados por láser de flujo extremo que permitan futuros estudios sobre daño no lineal. Y por otro, explorar posibles mejoras a este tipo de fuente que permitan mayor estabilidad, que las hagan más rentables y que permita una manipulación más sencilla que las disponibles actualmente. En este sentido, se ha analizado el uso de un jet líquido para la producción de rayos X con objeto de solventar los inconvenientes de los blancos sólidos. Este tipo de blancos permiten mantener un perfil de densidad estable tiro a tiro y en consecuencia una producción de rayos X reproducible. Así mismo, con objeto de caracterizar la fuente, se presenta un detector de tiempo de vuelo para iones que podrá ser usado en el futuro para estudiar la duración temporal del pulso de rayos X.

Tras la puesta a punto de la fuente de rayos X, se han estudiado sus posibles aplicaciones. En particular, se ha analizado cómo puede ser usada para realizar experimentos de fluorescencia de rayos X.

Por último, con objeto de llegar a disponer de una fuente de radiación no sólo robusta y estable, sino también económicamente rentable, se analizarán posibles modificaciones al propio láser que permitan abaratar los costes de producción de la fuente.

## Introducción

El rápido desarrollo de la tecnología láser desde su nacimiento -el primer láser fue desarrollado por Maiman en 1960-, proporcionando sistemas con una cada vez más energía por pulso, pulsos más cortos y extremadamente robustos, ha pavimentado el camino a nuevas e inesperadas aplicaciones en varias disciplinas científicas. De hecho, se puede decir que este desarrollo se ha convertido en una fuerza líder para la progresión de nuevas herramientas basadas en láser que obtener ventaja de todas estas nuevas capacidades.

Uno de los campos de la Ciencia que ha sido claramente reforzado por este progreso es la aceleración de partículas por en láser, especialmente a partir de la invención a mediados de los años ochenta de la técnica de amplificación de pulso chirpada (CPA) de Gérard Mourou y Donna Strickland en la Universidad de Rochester EE.UU. [15]. Antes del desarrollo de la técnica CPA, aunque teóricamente era posible producir pulsos láser ultracortos y ultraintensos, en la práctica la intensidad máxima alcanzable estaba limitada a cientos de gigavatios por centímetro cuadrado debido al umbral de daño del medio activo y de los elementos ópticos. Usando CPA, sin embargo, no existe tal limitación porque el pulso de láser es estirado temporalmente -reduciendo por lo tanto su potencia de pico- antes de la amplificación. Una vez que se ha amplificado completamente, el láser se comprime temporalmente recuperando la duración del pulso original y alcanzando las potencias máximas en el nivel del teravatio y petavatio. Con potencias tan enormes, hoy en día es posible implementar aceleradores de partículas compactos y, por lo tanto, fuentes de radiación ionizante para la investigación biológica y médica basada en la interacción láser-materia.

En términos simples, la aceleración de las partículas se logra enfocando un pulso láser ultraintenso con duración del orden de la longitud de onda central  $\lambda$ , es decir, pulsos que contienen un número limitado de ciclos ópticos, en un punto del orden de  $\lambda^2$ . En tales condiciones, la energía del láser se concentra en un cubo espacial del orden de  $\lambda^3$ , siendo posible obtener intensidades de hasta  $10^{17} \text{ W/cm}^2$  con láseres de modereadas potencias (GW). Para intensidades del orden de  $10^{16} \text{ W/cm}^2$ , el campo eléctrico del láser es mayor que el campo eléctrico que el que mantiene ligado los electrones al núcleo, produciendo la ionización del átomo. Los electro-

nes expulsados son además acelerados por el láser y vueltos a inyectar en el material una vez que el campo eléctrico invierte su dirección. En este proceso se generan radiación ultravioleta profunda (VUV), ultravioleta extrema (XUV) y rayos X.

Para intensidades de  $10^{18} \text{ W/cm}^2$ , no sólo los electrones son acelerados, sino también los protones. Además, estos iones acelerados pueden utilizarse para producir neutrones de alta energía [1, 2, 16].

## Hipótesis de trabajo

En el presente trabajo de tesis se ha estudiado una fuente de radiación, electrones y rayos X, de flujo extremo.

Bajo la hipótesis de conseguir un fuente robusta y estable con importantes aplicaciones, se han realizado diferentes estudios. Se pueden distinguir tres bloques principales.

En el primer bloque, se ha analizado la generación de radiación con blancos diferentes a los utilizados habitualmente. En particular, se ha estudiado la generación de rayos X en una cortina de jet líquido a presión atmosférica.

En el segundo bloque, se han analizado las posibles aplicaciones de la fuente. Para ello se han realizado diferentes experimentos, entre los que destaca el análisis por fluorescencia de rayos X de diferentes muestras.

Finalmente, en el tercer bloque, se han estudiado posibles mejoras al sistema láser que permitan abaratar los costes de producción del sistema final.

## Objetivos

El objetivo del presente trabajo de tesis es el diseño y construcción de una fuente de radiación de flujo extremo, robusta y estable, con prometedoras aplicaciones.

Para ello, el primer objetivo ha sido encontrar un blanco de generación de radiación que solvente los inconvenientes de los blancos habituales. En ese sentido, se ha experimentado con una cortina de jet líquido. El siguiente objetivo que se deriva es la completa caracterización de la fuente, para lo cual se han realizado medidas sistemáticas y se ha realizado un detector de tiempo de vuelo que ha permitido caracterizar la dinámica del filamento que produce la generación de la radiación.

Tras la puesta a punto de la fuente, el objetivo pasa a ser estudiar las diversas aplicaciones de la misma, para lo cual se han llevado a cabo diversos experimentos que permitan mostrar sus ventajas frente al uso de aceleradores convencionales.

Por último, con objeto de llegar a obtener una fuente que pueda competir económicamente con la tecnología de aceleradores actual, se pretende estudiar diversas modificaciones al sistema láser que permitan abaratar el coste final de la fuente.

## Conclusiones

En esta tesis, hemos desarrollado una fuente de rayos X generada por láser basada en la ionización de un blanco cuando un láser ultraintenso es focalizado en él y en la consecuente aceleración y desaceleración de electrones y la creación de vacantes en las capas internas de los átomos del blanco. Con el objetivo de mejorar las fuentes convencionales, hemos estudiado una cortina de líquido en condiciones de presión atmosférica como blanco para la generación de radiación. Hemos encontrado que mientras que la eficiencia en la producción de la  $K_\alpha$  a 8.0 keV del cobre es del orden de  $10^7$ , la eficiencia para la  $K_\alpha$  a 11.8 keV del KBr disuelto en la cortina líquida es del orden de  $10^{-8}$ . A pesar de esta reducción en la eficiencia, los blancos líquidos ofrecen robustez y estabilidad. Por otra parte, puesto que no es necesario sustituir el blanco, es posible llevar a cabo mediciones sistemáticas y/o de larga duración. Estas características son obligatorias si queremos explorar las desafiantes posibilidades que las fuentes láser de radiación ionizante pueden ofrecer.

Para caracterizar completamente la fuente, hemos construido un detector de tiempo de vuelo que nos ha permitido estudiar la dinámica del filamento del plasma. Esto es muy importante en nuestra fuente, ya que la interacción de un filamento de un haz láser de femtosegundos con el blanco en aire es un problema teórico muy difícil y pide la plena comprensión de la dinámica del filamento. Además, el detector de tiempo de vuelo desarrollado podría adaptarse para actuar como una cámara de rayos que puede medir la duración del pulso de rayos X.

Una vez construida y caracterizada la fuente de radiación, hemos explorado sus posibles aplicaciones. En particular, hemos demostrado que nuestra fuente tiene una ventaja importante en los experimentos de fluorescencia de rayos X: mientras que la radiación de rayos X proporciona una imagen completa de las sustancias presentes en una muestra, los electrones acelerados pueden ser utilizados para analizar sólo la capa superficial. Aplicada a las obras de arte, esta técnica permite distinguir entre la pintura visible y las posibles imágenes ocultas debajo de ella.

Finalmente, hemos propuesto varias modificaciones al propio sistema láser que podrían reducir el coste total del sistema, lo cual es necesario si queremos que las fuentes láser compitan

con la ya asentada tecnología de aceleradores de partículas. En particular, se ha propuesto una cavidad de bombeo que permita alcanzar altas tasas de repetición en el láser así como modificaciones al compresor.

# Bibliografía

- [1] H. Daido, M. Nishiuchi, and A. S. Pirozhkov. Review of laser-driven ion sources and their applications. *Reports on Progress in Physics*, 75(5):056401, 2012.
- [2] A. Macchi, M. Borghesi, and M. Passoni. Ion acceleration by superintense laser-plasma interaction. *Rev. Mod. Phys.*, 85:751–793, May 2013.
- [3] A. Giulietti. *Laser-Driven Particle Acceleration Towards Radiobiology and Medicine*. 2016.
- [4] P Mayles and J.C Rosenwald Nahum, A. *Handbook of Radiotherapy Physics: Theory and Practice*. 2007.
- [5] M. Durante and JS. Loeffler. Charged particles in radiation oncology. *Nat. Rev. Clin. Oncol.*, 7:37–43, 2010.
- [6] R. Meesat, H. Belmouaddine, J.F. Allard, C. Tanguay-Renaud, R. Lemay, T. Brastaviceanu, L. Trembla, B. Paquette, J. R. Wagner, J. P. Jay-Gerin, M. Lepage, M. A. Huels, and D. Houde. Cancer radiotherapy based on femtosecond laser-beam filamentation yielding ultra-high dose rates and zero entrance dose. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109(38):E2508–E2513, 2012.
- [7] O. Rigaud, N. O. Fortunel, P. Vaigo, E. Cadio, M. T. Martin, O. Lundh, J. Faure, C. Rechatin, V. Malka, and A. Gaudel. Exploring ultrashort high-energy electron-induced damage in human carcinoma cells. *Cell Death and Disease*, 1:e73, 2010.
- [8] C. Tillman, G. Grafström, A.-C. Jonsson, B.-A. Jönsson, I. Mercer, S. Mattsson, S.-E. Strand, and S. Svanberg. Survival of mammalian cells exposed to ultrahigh dose rates from a laser-produced plasma x-ray source. *Radiology*, 213(3):860–865, 1999.
- [9] K. Zeil, M. Baumann, E. Beyreuther, T. Burris-Mog, T. E. Cowan, W. Enghardt, L. Karsch, S. D. Kraft, L. Laschinsky, J. Metzkes, D. Naumburger, M. Oppelt, C. Richter,

- R. Sauerbrey, M. Schürer, U. Schramm, and J. Pawelke. Dose-controlled irradiation of cancer cells with laser-accelerated proton pulses. *Applied Physics B*, 110(4):437–444, 2013.
- [10] S. D. Kraft, C. Richter, K. Zeil, M. Baumann, E. Beyreuther, S. Bock, M. Bussmann, T. E. Cowan, Y. Dammene, W. Enghardt, U. Helbig, L. Karsch, T. Kluge, L. Laschinsky, E. Lessmann, J. Metzkes, D. Naumburger, R. Sauerbrey, M. Schürer, M. Sobiella, J. Woithe, U. Schramm, and J. Pawelke. Dose-dependent biological damage of tumour cells by laser-accelerated proton beams. *New Journal of Physics*, 12(8):085003, 2010.
- [11] V. Malka, J. Faure, and Y. A. Gauduel. Ultra-short electron beams based spatio-temporal radiation biology and radiotherapy. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 704(1–3):142 – 151, 2010. ESF-EMBO Conference: Spatio-Temporal Radiation Biology: Transdisciplinary Advances for Biomedical Applications.
- [12] J. Nguyen, Y. Ma, T. Luo, R. G. Bristow, D. A. Jaffray, and Q. B. Lu. Direct observation of ultrafast-electron-transfer reactions unravels high effectiveness of reductive dna damage. *roc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 108(11778), 2011.
- [13] X. Kong, S. K. Mohanty, J. Stephens, J. T. Heale, V. Gomez-Godinez, L. Z. Shi, J.-S. Kim, K. Yokomori, and M. W. Berns. Comparative analysis of different laser systems to study cellular responses to dna damage in mammalian cells. *Nucleic Acids Research*, 37(9):e68, 2009.
- [14] A. Yogo, T. Maeda, T. Hori, H. Sakaki, K. Ogura, M. Nishiuchi, A. Sagisaka, H. Kiriya, H. Okada, S. Kanazawa, T. Shimomura, Y. Nakai, M. Tanoue, F. Sasao, P. R. Bolton, M. Murakami, T. Nomura, S. Kawanishi, and K. Kondo. Measurement of relative biological effectiveness of protons in human cancer cells using a laser-driven quasimonoenergetic proton beamline. *Applied Physics Letters*, 98(5):053701, 2011.
- [15] D. Strickland and G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses. *Optics Communications*, 56(3):219 – 221, 1985.
- [16] S. Corde, K. Ta Phuoc, G. Lambert, R. Fitour, V. Malka, A. Rousse, A. Beck, and E. Lefebvre. Femtosecond x rays from laser-plasma accelerators. *Rev. Mod. Phys.*, 85:1–48, Jan 2013.