
FUENTES DE LUZ SINCROTRÓN

BASADAS EN LA INTERACCIÓN LÁSER-PLASMA:

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO HACIA MEJOR CONTRÓL,
ESTABILIDAD, GANANCIA Y BRILLANTEZ

ANDREAS STEFAN DÖPP

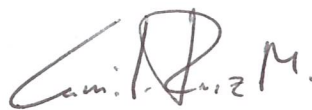
Kim TA PHUOC, Investigador del CNRS en el Laboratoire d'Optique Appliquée de ENSTA-ParisTech/CNRS/Ecole Polytechnique/Université Paris-Saclay, Camilo RUIZ MÉNDEZ, Profesor en el departamento de didáctica de matemáticas y ciencias en la Universidad de Salamanca, y Enrique CONEJERO JARQUE, Profesor Titular del Área de Óptica del Departamento de Física Aplicada en la Universidad de Salamanca certifican que la presente memoria,

LASER-PLASMA LIGHTSOURCES: RESEARCH AND DEVELOPMENTS
FOR INCREASED CONTROL, STABILITY, GAIN AND BRIGHTNESS

ha sido realizada bajo su dirección y tutoría en el Laboratoire d'Optique Appliquée y en el Área de Óptica del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Salamanca por Don Andreas Stefan DÖPP y constituye su Tesis Doctoral para optar a los grados de Docteur de l'École Polytechnique y de Doctor en Física por la Universidad de Salamanca.



Kim TA PHUOC,
Director



Camilo RUIZ MÉNDEZ,
Co-Director



Enrique CONEJERO
JARQUE, Tutor

Palaiseau / Salamanca, 20 de octubre de 2015.

Resumen

La tecnología de la interacción láser-plasma tiene el potencial de producir nuevas fuentes de rayos X, brillantes, compactas y ultracortas que reemplacen o sean una alternativa viable a las fuentes convencionales existentes. Experimentos recientes han demostrado los principios básicos de estas fuentes y su increíble potencial, pero también su pobre estabilidad y poco control, lo que limita el alcance de sus aplicaciones. La tecnología de aceleradores convencionales ha logrado un alto grado de control en las características de las fuentes de radiación ionizante mejorando progresivamente cada uno de sus elementos como la inyección, la aceleración el transporte del haz y la generación de radiación. En este trabajo utilizamos esta metodología de optimización individual para las fuentes láser-plasma y reportamos avances en cada uno de estos elementos.

El manuscrito está organizado de la siguiente forma: Empezamos con un discurso sobre nuevos métodos de inyección controlada para crear haces de electrones, explorando en particular la inyección por choque y la inyección por ionización. En la segunda parte presentamos los primeros resultados experimentales acerca de la evolución de la energía de un haz de electrones en un acelerador con un perfil de densidad previamente diseñado. Se demuestra también la posibilidad de focalizar un haz de electrones ultracorto en una lente completamente óptica, utilizando la estela lineal del pulso en un plasma de baja densidad.

La última parte del texto está dedicada a la generación de radiación. En particular reportamos avances significativos en una fuente betatrón. Demostramos la producción de una fuente estable y polarizada de rayos X producida por electrones inyectados por medio de ionización retrasada. Finalmente reportamos la producción optimizada de rayos X en canales de plasma sobre perfiles de plasma diseñados. Además, hemos estudiado la radiación de frenado y la retrodispersión Compton, centrándonos en sus aplicaciones en imagen de rayos X.

Lista de publicaciones

- E GUILLAUME, A DÖPP ET AL. **Physics of fully-loaded laser-plasma accelerators.** *Phys. Rev. Spec. Top.-Accel. Beams* 18, 061301 (2015).
- E GUILLAUME, A DÖPP, ET AL. **Electron rephasing in a laser-plasma accelerator.** *Phys. Rev. Lett* 115, 155002 (2015).
- C. THAURY, E GUILLAUME, A DÖPP ET AL. **Demonstration of relativistic electron beam focusing by a laser-plasma lens.** *Nature Communications* 6, 1-5 (2015)
- A. DÖPP, B. MAHIEU ET AL. **Stable and polarized Betatron x-ray radiation from a laser plasma accelerator in ionization injection regime.** presentado a *Phys. Rev. Lett.*
- A.DÖPP, E.GUILLAUME, ET AL. **A bremsstrahlung γ -ray source based on laser wakefield acceleration in high Z gases.** presentado a *Nuclear Instruments and Methods A.*
- A. DÖPP, E. GUILLAUME ET AL. **Single shot radiography using X-ray from Compton-backscattering with laser-wakefield accelerated electron beams.** presentado a *Plasma Physics and Controlled Fusion.*
- A. DÖPP, E. GUILLAUME ET AL. **Single shot radiography using an all-optical Compton backscattering source.** presentado a *Physics Procedia.*

Índice general

Resumen

Lista de publicaciones

1. Introducción

1.1 Fuentes de luz: Desde los tubos de rayos X hasta el láser de electrones libres

1.2 Méritos de la tecnología láser-plasma

2. Inyección*

2.1 Inyectores convencionales

2.2 Inyección en aceleradores de láser-plasma

2.3 Auto-Inyección

2.4 Inyección en gradientes de densidad

2.5 Inyección por ionización

2.6 Conclusiones

3. Aceleración*

3.1 Aceleradores convencionales

3.2 Aceleradores de plasma

3.3 Aceleración con el haz de electrones

3.4 Aceleración en un perfil diseñado de densidad

3.5 Conclusiones

Índice general

4. Transporte del haz*

- 4.1 Óptica de partículas cargadas
- 4.2 Campos transversales en un acelerador de plasma
- 4.3 Lentes de plasma
- 4.4 Lente de plasma en el régimen lineal
- 4.5 Lente de plasma en el régimen de la burbuja
- 4.6 Conclusiones

5. Generación de radiación*

- 5.1 Fuentes convencionales de rayos X
- 5.2 Fuentes de luz sincrotron
- 5.3 Onduladores y wigglers
- 5.4 Retrodispersión Compton
- 5.5 Radiación betatrón

6. Conclusiones y perspectivas

- 6.1 Resumen de los resultados
- 6.2 Perspectivas de futuro

* Este capítulo está solamente incluido en la versión inglesa

Introducción

Fuentes de luz: Desde los tubos de rayos X hasta el láser de electrones libres

El descubrimiento de los rayos X por Wilhelm Conrad Röntgen en 1895 puede considerarse como el comienzo de una nueva era en la ciencia. Sin embargo, desde un punto de vista tecnológico, la era de las fuentes modernas de rayos X y de partículas comenzó algunos años más tarde, en las décadas de 1900 y 1910. De hecho, estas dos décadas marcan el período de tiempo que se necesitaba para pasar de una máquina que 'accidentalmente' creaba rayos X a un dispositivo que fue diseñado para hacerlo.

El tubo de Crookes, que Röntgen utilizaba para su trabajo, crea electrones a través de la ionización del gas residual en una descarga eléctrica. Los electrones liberados son atraídos por el ánodo donde emiten radiación en forma de radiación de frenado y exceso de líneas espectrales. Mientras tanto, los iones derivan hacia el cátodo, donde se liberan electrones a través de ionización por colisiones. Esos electrones procedentes del cátodo son acelerados a energías más altas que los electrones del gas y por lo tanto irradian más durante la interacción con el ánodo. Estos primeros tubos de rayos X (también llamados tubos de rayos X de iones o tubos de cátodo frío) no eran muy eficientes, casi no eran sintonizables y dejaban de funcionar cuando se agotaba el gas residual en el tubo.

Fuentes de luz sincrotrón basadas en la interacción láser-plasma

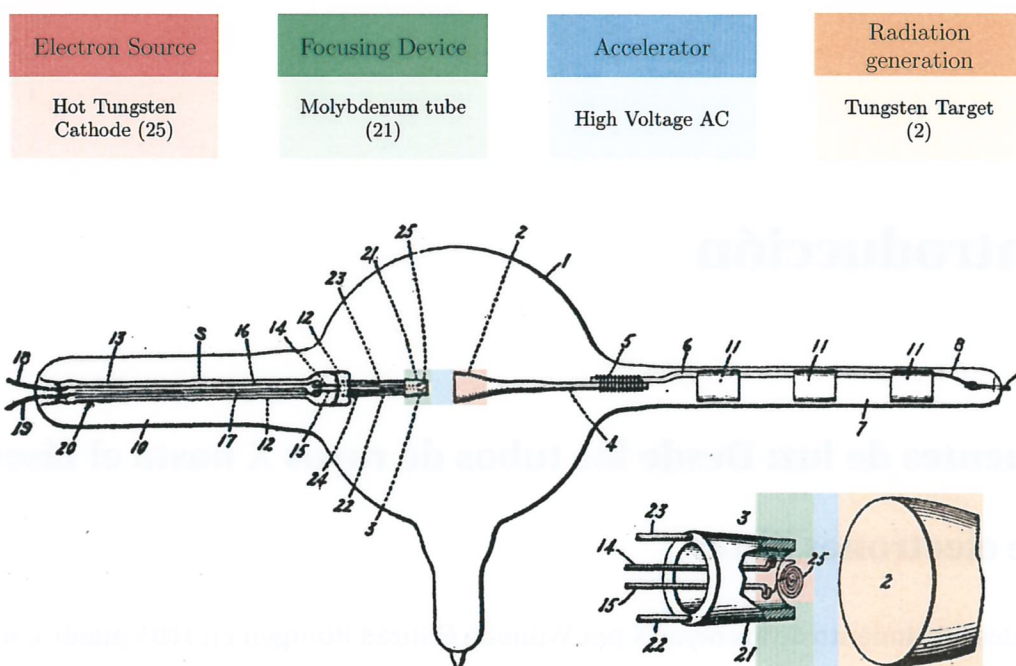


Figura 1: Esquema del tubo de rayos X de Coolidge como presentado en la publicación original de 1913. Las partes distintas de la fuente son coloradas según sus funciones.

El diseño del moderno tubo de rayos X, que opera en mayor vacío y por tanto todos los electrones se originan en el cátodo, se desarrolló unos años más tarde por Julio E. Lilienfeld en Alemania y William Coolidge en los Estados Unidos. En el tubo de rayos X de Coolidge los electrones son creados por emisión termoiónica, calentando un cátodo de tungsteno a unos 2.000 grados Celsius. Aunque el emisor termoiónico fue ya estudiado antes, Coolidge fue el primero en lograr un vacío lo suficientemente bueno como para reducir el efecto de los iones positivos. La Figura 1 muestra un diseño del tubo No.147 de Coolidge, que incorpora todos los componentes principales de una fuente de rayos X moderna.

El componente principal de la fuente de electrones es una espiral de tungsteno, el filamento, que se calienta por una corriente de 3 a 5 amperios a temperaturas de

investigación y desarrollo hacia mejor control, estabilidad, ganancia y brillantez

1890-2540 Kelvin. Los electrones son emitidos desde esta espiral a través de la emisión termoiónica, que sigue siendo el tipo más común de cátodos para esta aplicación. A continuación hay un dispositivo de enfoque, que consiste en un tubo de molibdeno cilíndrico que sirve como lente electrostática. Hoy en día esta parte se llama la copa de enfoque; se utiliza para controlar las trayectorias de los electrones durante su propagación hacia el ánodo. El espacio entre el cátodo y el ánodo forma el acelerador. Aquí se aplica un alto voltaje para acelerar los electrones en un campo electrostático. En el caso de Coolidge se alcanzaron hasta 100 kV, lo cual es comparable a los valores utilizados en los generadores de tubos modernos (unos 20 a 150 kV). Una vez los electrones son acelerados, su energía se convierte en radiación cuando golpean el ánodo, que está inclinado de modo que los rayos X se emiten hacia el exterior de la bombilla. El blanco está hecho de tungsteno, que al ser un elemento pesado produce más radiación de frenado y ofrece buena resistencia al calor. Desde entonces hasta la actualidad, el tungsteno ha sido el material más utilizado, aunque a veces se emplean aleaciones con mejor resistencia a daños superficiales (por ejemplo, 10% de renio y el 90% de tungsteno) o materiales con líneas de emisión específicas (por ejemplo, molibdeno o rodio).

Mientras que el tubo de cátodo caliente fue y sigue siendo un dispositivo perfectamente adecuado para la mayoría de las aplicaciones médicas, los científicos estaban interesados en la producción de rayos X aún más energéticos. Para ello los electrones tenían que ser acelerados a energías más altas, por lo que se necesita una intensidad de campo más elevada. Esto pudo lograrse utilizando los generadores diseñados por Van-de-Graaff (1929) y Cockcroft-Walton (1932). Estos permitían la aceleración de electrones a escala de MeV. No obstante, a intensidades de campo más altas se formaban chispas que dañaban el acelerador.

Fuentes de luz sincrotrón basadas en la interacción láser-plasma

Un avance importante en la historia del desarrollo de aceleradores ocurrió cuando Ising propuso (1925) y Wideroe demostró (1928) el principio de la aceleración en resonancia. En lugar de una aceleración electrostática, estas máquinas funcionan con un campo eléctrico dependiente del tiempo y aumentan la energía de las partículas sucesivamente en varias etapas de aceleración. Con este principio, el primer acelerador de Wideroe, operado a una radiofrecuencia de 1 MHz, consiguió acelerar partículas a dos veces el voltaje de CA usando un tubo de deriva y dos electrodos conectados a tierra. Su obra inspiró a Ernest Lawrence en los Estados Unidos, que aplicó el principio de resonancia a una estructura de aceleración cíclica, aumentando entonces la energía de las partículas durante cada revolución. Sin embargo, su ciclotrón, que sigue siendo una fuente de iones muy común hoy en día, se limita a velocidades de partículas no relativistas con el fin de mantener la sincronización y por tanto es inadecuada para la aceleración de electrones. En cambio, otros dos conceptos de aceleración cíclica fueron concebidos y realizados poco después: el betatrón y el sincrotrón.

El concepto del betatrón es acelerar electrones en un campo eléctrico tangencial que se produce por un flujo magnético variable. A diferencia del ciclotrón, tal configuración puede llegar a energías relativistas, pero, como Iwanenko y Pomeranchuk señalaron en 1944, en última instancia la energía será limitada por las pérdidas por radiación que experimentan las partículas debido a la aceleración centrípeta para mantenerlas en una órbita circular. Al mismo tiempo, Julian Schwinger también desarrolló una teoría para la radiación en el betatrón. Sus cálculos indicaban que la emisión de radiación en un betatrón de 100 MeV alcanza su punto máximo en la parte infrarroja o visible del espectro. En 1945 McMillan propuso el sincrotrón, que es en muchos aspectos una combinación del acelerador lineal de RF de Wideroe y del ciclotrón de Lawrence. Una diferencia importante con conceptos anteriores de aceleradores cíclicos es que el sincrotrón no puede acelerar partículas desde el reposo, sino que necesita un inyector que provea electrones a velocidades relativistas.

investigación y desarrollo hacia mejor control, estabilidad, ganancia y brillantez

Poco después de la primera demostración del sincrotrón por Goward y Barnes en 1946, se construyó una máquina más potente de 70 MeV bajo la dirección de Pollock. Fue su equipo el que descubrió la señal visible predicha por Schwinger, que ahora se conoce como radiación sincrotrón.

El desarrollo consecutivo de esta primera generación de sincrotrones se concentró inicialmente en llegar a más altas energías del haz, por ejemplo más de 1 GeV en el ElettroSincrotrone en Frascati o 6 GeV en DESY. Más tarde el desarrollo de anillos de almacenamiento proporcionó corrientes de haz más altas y una mayor estabilidad. Sin embargo todas estas instalaciones servían a las vez como fuentes de partículas de alta energía y fuentes de radiación X. La construcción de instalaciones dedicadas exclusivamente a la producción de radiación sincrotrón, como el SRS en Daresbury (Reino Unido) marca el inicio de lo que se llaman las instalaciones de segunda generación.

Aunque la radiación de sincrotrón se descubrió en los aceleradores cíclicos, pronto se vio que campos magnéticos alternos en la dirección del movimiento podrían provocar oscilaciones transversales de los electrones y por lo tanto generar radiación. Para grandes amplitudes de oscilación un observador medirá destellos cortos de radiación, cuya transformada de Fourier corresponde a un espectro amplio de radiación (radiación wiggler). Con el mismo argumento cualitativo vemos que en el caso de baja amplitud (llamado ondulator), la radiación tendrá un espectro de energía muy estrecho alrededor de una frecuencia fundamental. Este modelo de "linterna" fue introducido por Motz, quien en el 1953 construyó el primer ondulator en el acelerador lineal de 100 MeV en Stanford y consiguió en la producción de radiación a 400 nm. La radiación de ondulator tiene una mejor coherencia espacial y temporal que la radiación Wiggler, por lo que los sincrotrones modernos utilizan en su mayoría onduladores.

Fuentes de luz sincrotrón basadas en la interacción láser-plasma

La alta coherencia espacial de la radiación sincrotrón también permitió el desarrollo de nuevas generaciones de imagen con rayos X. Por ejemplo, las imágenes de rayos X mediante contraste de fase tienen muchas ventajas sobre las radiografías que se basan en contraste por absorción.

En 1971 Madey propuso el láser de electrones libres (FEL), que se realizó poco después de forma experimental en Stanford. El FEL imita el concepto de los láseres convencionales, pero sustituyendo el medio activo de un láser por un haz de electrones relativistas. Cuando un FEL opera en el IR o visible se puede usar una cavidad óptica con espejos, en la cual la intensidad de la luz crece en un pequeño porcentaje en cada paso del haz. Sin embargo, en el régimen XUV y de rayos X no es posible utilizar una cavidad con espejos. En lugar de ello se aprovecha un efecto llamado microbunching. Microbunching significa que los electrones normalmente más o menos distribuidos espacialmente de forma homogénea, debido a las interacciones con la radiación, se dividen en grupos muy concentrados separados por una longitud de onda de la radiación. Este efecto conduce a la emisión coherente de todos los estados electrónicos y entonces la fuente tiene propiedades muy parecidas a un láser. Esta configuración, que gracias a su fuerte ganancia puede amplificar la radiación en un único paso, se llama emisión espontánea auto-amplificada (SASE en el acrónimo inglés).

La primera emisión láser con SASE se demostró en 2001 en la Advanced Photon Source, que se encuentra en el Argonne National Laboratory, y la emisión en el régimen Angstrom fue medida en 2011 en la Linear Coherent Lightsource de SLAC. Actualmente existen muchos proyectos en todo el mundo con el objetivo de construir FELs en el régimen de rayos X, proporcionando radiación a intensidades sin precedentes. También muchas instalaciones quieren reemplazar la emisión espontánea auto-amplificada por una operación con semilla (el seeding), que proporcionaría una coherencia temporal superior. Hay muchas maneras posibles de implementar

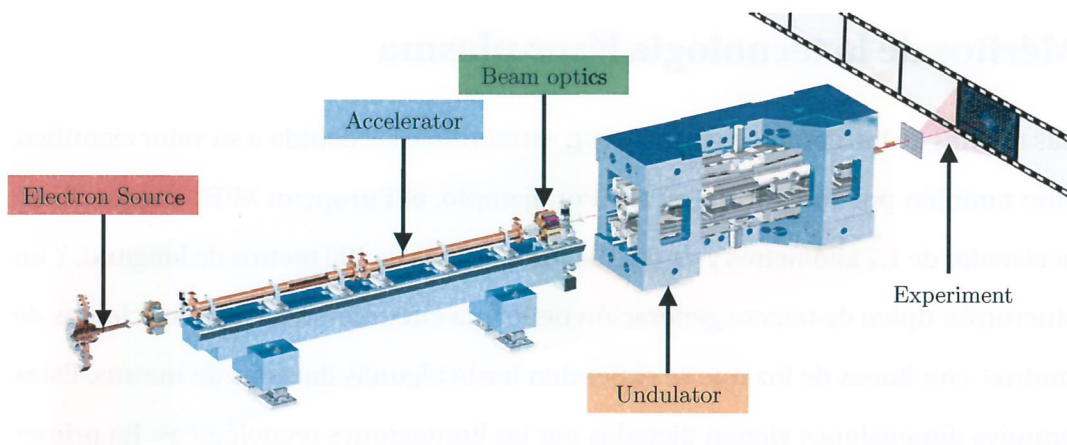


Figura 2: Diseño de una típica fuente moderna. Están marcadas las partes que sirven para inyectar, acelerar, focalizar y generar radiación.

el seeding, siendo algunas de las técnicas más prometedoras el self-seeding, el HHG seeding o echo-enabled harmonic generation. La figura 2 demuestra el diseño típico de un FEL.

Los FELs son las fuentes más sofisticadas de luz que existen, resultado de más que un siglo de investigación y desarrollo. Sin embargo, se basan en los mismos elementos básicos que utilizó ya el tubo de rayos X de Coolidge en 1913: un inyector de electrones, un acelerador, una línea de transporte y una sección para generar radiación.

Méritos de la tecnología láser-plasma

Las fuentes de luz modernas no sólo son extraordinarias debido a su valor científico, sino también por su enorme escala. Por ejemplo, el European XFEL consta de un acelerador de 1.7 kilómetros y de onduladores de más de 100 metros de longitud. Y un sincrotrón típico de tercera generación tiene una circunferencia de unos cientos de metros, con líneas de luz que se extienden hasta algunas decenas de metros. Estas grandes dimensiones vienen dictadas por las limitaciones tecnológicas: En primer lugar, el gradiente de aceleración en los aceleradores convencionales no puede exceder unos 150 MV / m debido al límite de ruptura de vacío. En segundo lugar, las matrices de imanes utilizadas en los onduladores no pueden hacerse arbitrariamente pequeñas, sino que tienen un periodo mínimo de algunos milímetros.

Por tanto es obvio que la difusión de cualquier tecnología basada en la radiación sincrotrón, independientemente de sus ventajas, se ve obstaculizada por la accesibilidad limitada de las fuentes de sincrotrón. Las fuentes de luz basadas en la interacción láser-plasma tienen el potencial de superar estas limitaciones.

A modo de ejemplo, la Figura 1.3 muestra los resultados de un experimento de aceleración de electrones por láser efectuado con el láser ASTRA GEMINI en 2011. Durante la campaña experimental, los electrones se aceleraron en una distancia de 10 milímetros a energías por encima de 1 GeV. Además, los electrones emitieron radiación sincrotrón, conocida como radiación betatrón, en el rango de los rayos X duros. La coherencia espacial de estos rayos X era suficiente para obtener radiografías de contraste de fase de un espécimen.

Este experimento es representativo del estado-del-arte de las fuentes de luz láser-plasma al comienzo de este trabajo. En lo que sigue, por tanto, vamos a discutir

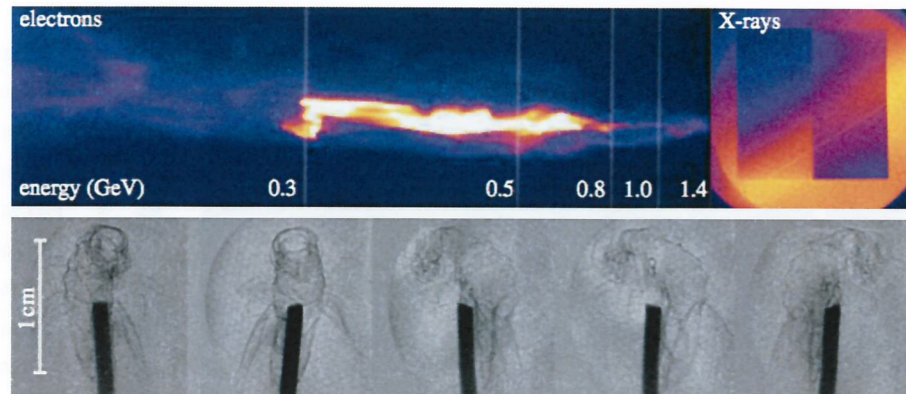


Figura 3: Resultados de espectro de electrones y señal de rayos X, como obtenido en una campaña experimental al láser ASTRA GEMINI en el 2011. El acelerador está operado en el régimen de auto-inyección, así que el haz es divergente y policromático. Abajo están presentados imágenes de radiografía que se hicieron con esa misma fuente.

cualitativamente cómo funcionó este experimento y cuáles fueron las limitaciones de la tecnología en ese momento.

Aceleración en el régimen auto-guiado, auto-inyectado y auto-radiante

La principal ventaja de los aceleradores por interacción láser-plasma sobre los aceleradores convencionales basados en cavidades de radiofrecuencia es que el plasma puede sostener campos sustancialmente mayores, del orden del TV / m. Un acelerador por interacción láser-plasma (acrónimo inglés: LPA) puede aumentar la energía de los electrones al nivel del GeV en poco más de un centímetro, dentro de una cavidad de plasma con dimensiones en la escala de micrómetros. También, debido a las pequeñas dimensiones de la cavidad, el haz de electrones tiene una duración mucho más corta que en las instalaciones convencionales, por lo general del orden de unos femtosegundos. Además, el tamaño de la fuente es de unas micras y por lo tanto, el volumen del haz en el espacio de fases es muy pequeño.

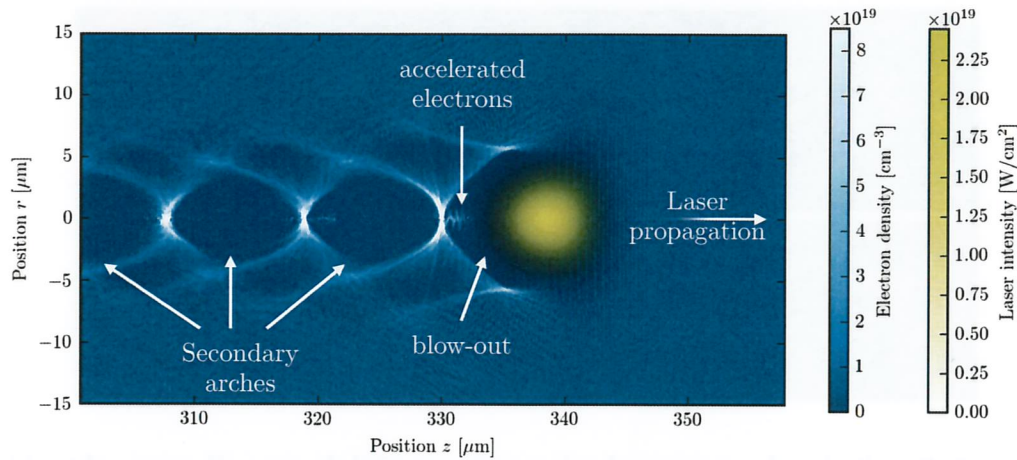


Figura 4: Simulación de la propagación de un láser de alta intensidad en un plasma. Los electrones están inyectados en la parte trasera de la burbuja que se forma detrás del pulso (amarillo).

La mayoría de los primeros experimentos de aceleración por láser usaban una configuración bastante simple, confiando en el auto-enfoque del láser y la auto-inyección de electrones. En este esquema, un láser de alta potencia se enfoca en un blanco de helio gaseoso, el cual se ioniza inmediatamente por la parte inicial del pulso. El gradiente de la intensidad del láser empuja las partículas fuera de las regiones de alta intensidad.

In this scheme a high power laser is focused onto a helium target, which is immediately ionized by the leading edge of the pulse.

Esta fuerza, llamada la fuerza ponderomotriz, escala como $F_p \propto \langle \vec{A}^2 \rangle / \gamma$, por lo que la fuerza es proporcional al promedio del cuadrado del potencial vector $\langle \vec{A}^2 \rangle$ y por lo tanto actúa en la misma dirección tanto para los electrones como para los iones. Sin embargo, la inercia de ambas especies es muy diferente, así que las tasas de aceleración son dispares, induciendo una separación de carga. Dependiendo de la intensidad del láser este efecto puede conllevar desde una débil perturbación de densidad hasta una expulsión completa de los electrones, cf. Fig. 1.4.

investigación y desarrollo hacia mejor control, estabilidad, ganancia y brillantez

La extensión transversal de la zona sin electrones es en general del orden del tamaño de láser, mientras que su longitud está limitada por el hecho de que los electrones son atraídos por el campo de los iones. Por tanto, la extensión longitudinal está limitada por la longitud de onda (relativista) plasma $\lambda_p \propto \sqrt{\gamma_e/n_e}$. El régimen relativista se alcanza si el campo del láser es suficiente para acelerar electrones a velocidades relativistas, es decir, si el potencial vector normalizado es del orden de $a_0 = eA_0/m_e c^2 > 1$.

La expulsión ponderomotriz y el aumento de masa relativista también modifican la relación de dispersión, lo que lleva al auto-enfoque relativista del pulso. Como se mencionó en el párrafo anterior, la fluctuación de la intensidad del láser debida a este efecto y a las variaciones de la densidad de iones locales afectarán al tamaño de la cavidad. Esto cambia la velocidad de la estela del láser y facilita la inyección de electrones de plasma en la parte de la cavidad que acelera partículas, un proceso conocido como auto-inyección. Una vez inyectados, los electrones adquirirán energía del potencial dentro de la cavidad de plasma, que es cuasi-parabólico en ambas direcciones, longitudinal y transversal. Los electrones con un momento distinto de cero en dirección transversal van a efectuar oscilaciones (llamadas oscilaciones betatrón) y emiten radiación sincrotrón.

Además de su pobre estabilidad entre disparos, la principal desventaja de esta configuración es que es imposible ajustar parámetros como la energía de los electrones, la carga, la divergencia y el rendimiento de rayos X independientemente uno de otro. Por ejemplo, los mejores resultados de rayos X se obtienen con haces de electrones de peor emitancia. Por el contrario, los haces de electrones de alta emitancia generan poca o ninguna radiación betatrón. Por lo tanto hace falta una solución más sofisticada que permita controlar diferentes parámetros de la fuente láser-plasma de forma independiente. A ese fin aplicamos la misma filosofía que se utiliza en fuentes conven-

cionales, es decir, mejorar individualmente las etapas de inyección, de aceleración, de transporte y de generación de radiación.

Fuentes de luz láser-plasma: Etapas y estructura de la tesis

Como un LPA opera en un medio ya ionizado, el plasma, no hay necesidad de un cátodo para proporcionar electrones libres. En cambio, el desafío de la etapa de inyección es acoplar los electrones no relativistas del fondo del plasma con una onda de plasma que se propaga a una velocidad cercana a la velocidad de la luz. El primer experimento que consiguió de hacer eso de una manera controlada fue presentado en 2006, y desde entonces se han estudiado varios esquemas diferentes de inyección controlada. El capítulo 2 de este trabajo se centra en los resultados experimentales en dos mecanismos de inyección controlada: inyección debida a la expansión de la cavidad en gradientes de densidad e inyección provocada por ionización retrasada en nitrógeno y argón.

Una vez que un electrón está inyectado, se acelera hasta que el láser no consigue mantener su estela, o hasta que las diferentes velocidades de los electrones y del láser resultan en una pérdida de resonancia, lo que al final resulta en desaceleración. Para mitigar ese efecto, se ha propuesto controlar la velocidad de la onda de plasma a través del perfil longitudinal de la densidad del plasma. En el Capítulo 3 presentamos resultados analíticos, numéricos y experimentales sobre un rephasing de electrones en el régimen de burbuja de plasma. Asimismo, se presentan datos experimentales que sugieren una aceleración de electrones más allá de la atenuación del láser debida a una estela creada por los propios electrones.

Una desventaja importante de los haces de electrones acelerados por láser es su divergencia elevada en comparación con los aceleradores convencionales. Si el haz no es colimado cerca de la salida del acelerador, esto implica una grave degradación de

investigación y desarrollo hacia mejor control, estabilidad, ganancia y brillantez

su calidad. Sin embargo, las lentes convencionales no son lo suficientemente potentes como para lograr colimación en una escala milimétrica. En el Capítulo 4 vamos a discutir cómo los campos transversales de la estela permiten focalizar un haz de electrones. Tras una comparación teórica de tales lentes de plasma con los dispositivos convencionales, se presentan los primeros resultados sobre una lente completamente óptica. Además se introduce el concepto de desenfoque de electrones a través de una variación de densidad, que posiblemente puede amplificar las oscilaciones betatrón.

Hablando de eso llegamos a la última etapa: Generación de Radiación (Capítulo 5). En esta parte vamos a discutir varios métodos para producir haces de fotones energéticos con electrones acelerados por láser. Primero usamos la conversión de radiación de frenado, similar a un tubo de rayos X convencional, para crear la radiación en escala de MeV. Esta técnica se ha demostrado antes, pero en este caso la combinación con la inyección por ionización permite una operación estable durante cientos de disparos. A continuación se presentan resultados sobre las fuentes de sincrotrón. En primer lugar investigamos la generación de la radiación a través de retrodispersión Compton. Esta sección comprende una investigación numérica de diferentes geometrías de dispersión y resultados experimentales usando un esquema totalmente óptico presentado hace unos pocos años. Finalizamos el trabajo con una parte dedicada a la radiación de betatrón. En particular vamos a mostrar que el señal de rayos X aumenta en plasmas con variación de densidad. Además demostramos que la interacción del láser con una mezcla de gases da lugar a una emisión de radiación estable y polarizada.

Conclusiones y perspectivas

En este trabajo hemos aplicado diferentes técnicas de inyección, aceleración y transporte con el objetivo de optimizar la producción de rayos X. En este apartado vamos a revisar los resultados principales de los capítulos precedentes y a discutir las perspectivas de investigación que se derivan partiendo de esa base.

Resumen de los resultados

El objetivo de las tres primeras etapas ha sido extender nuestro control sobre el acelerador láser-plasma. En el **capítulo 2: La Inyección** hemos hablado de cómo la inyección de ionización y la inyección en transiciones de densidad (Fig.5) se pueden utilizar para producir haces de electrones cuya estabilidad supera a la auto-inyección. Usando el sistema láser SALLE JAUNE se midió que la inyección por ionización en nitrógeno y argón da lugar a haces de electrones con un espectro Maxwelliano estable con una carga de hasta 1 nC. Los haces inyectados por choque contienen menos carga, pero son monoenergéticos y sintonizables en energía.

Capítulo 3: La aceleración se ha dedicado a las extensiones de aceleración más allá de las limitaciones establecidas por la atenuación del láser y el desfase. En particular, hemos hablado de cómo una adaptación del perfil de densidad se puede utilizar para variar la fase de los electrones en la estela. Hemos demostrado que eso permite

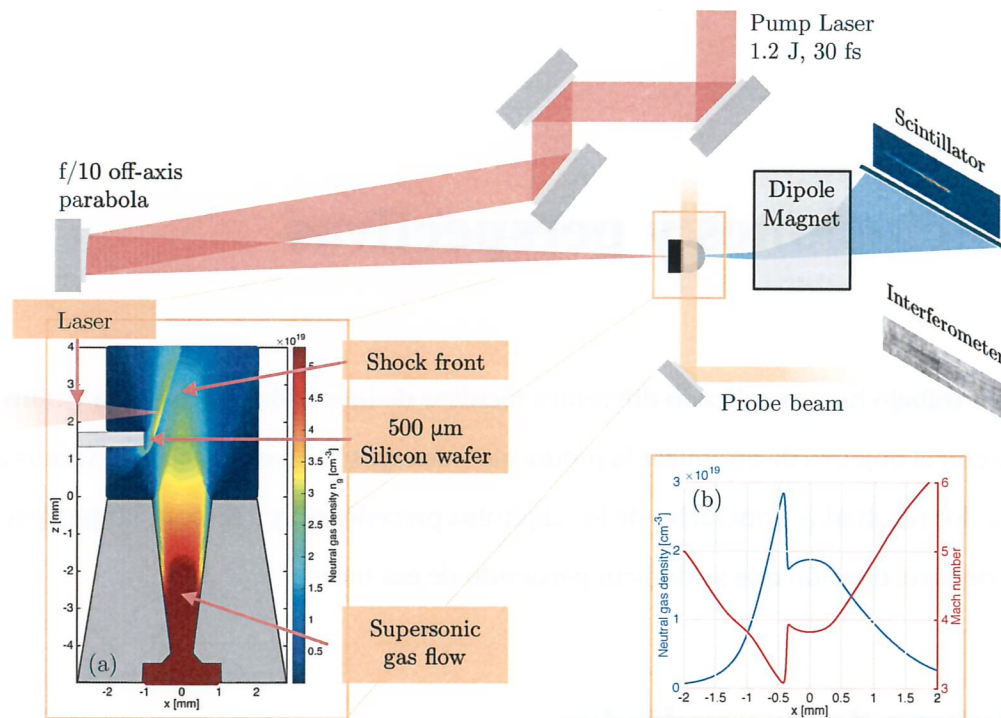


Figura 5: Configuración experimental para inyección en transiciones densidad creadas por choque. (a) simulación de la generación de choque con el programa ANSYS FLUENT (b) Densidad y número de mach en una altura de $z = 3$ mm.

mantener los electrones durante más tiempo en una fase de aceleración, resultando en un aumento de la energía final (Fig.6).

Mientras que este rephasing nos permitió actuar sobre la dinámica longitudinal de los haces, también hemos conseguido el control de la evolución transversal: En el **capítulo 4: Transporte del haz** hemos presentado la lente láser-plasma como dispositivo para colimar rápidamente haces de electrones ultracortos. En particular hemos conseguido a reducir la divergencia de un haz de electrones relativistas por un factor de 3. Además, hemos descubierto que la interacción entre electrones y la parte posterior de la burbuja de plasma puede desenfocar el haz, aumentando así la amplitud de las oscilaciones betatrón.

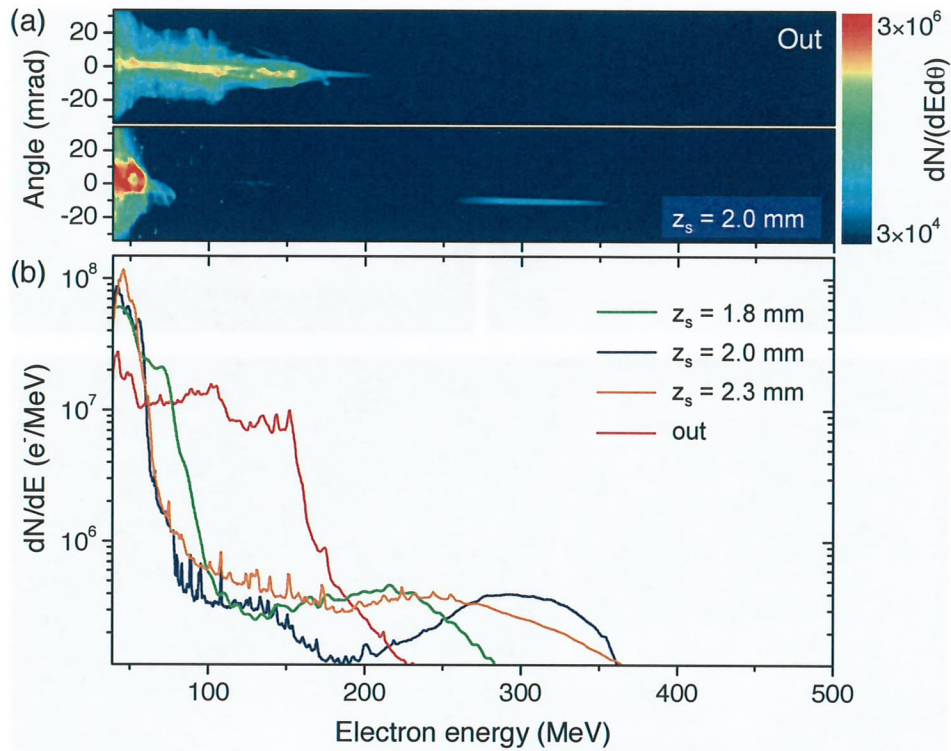


Figura 6: Disparos representativos con y sin transición de densidad. Observamos que la transición puede aumentar la energía máxima del haz por unos 50 porcientos.

Tal aumento de la amplitud de oscilación puede elevar significativamente la señal de rayos X, como hemos visto en el **capítulo 5: Generación de radiación**. Otro resultado importante ha sido que electrones inyectados a través de inyección por ionización irradian de forma mucho más estable que en cualquier experimento precedente. Además el esquema permite crear haces de rayos X polarizados. También hemos dado los primeros pasos hacia las aplicaciones de las fuentes de rayos X/ γ , usando la radiación de frenado o la retrodispersión Compton para realizar radiografías (Fig.7).

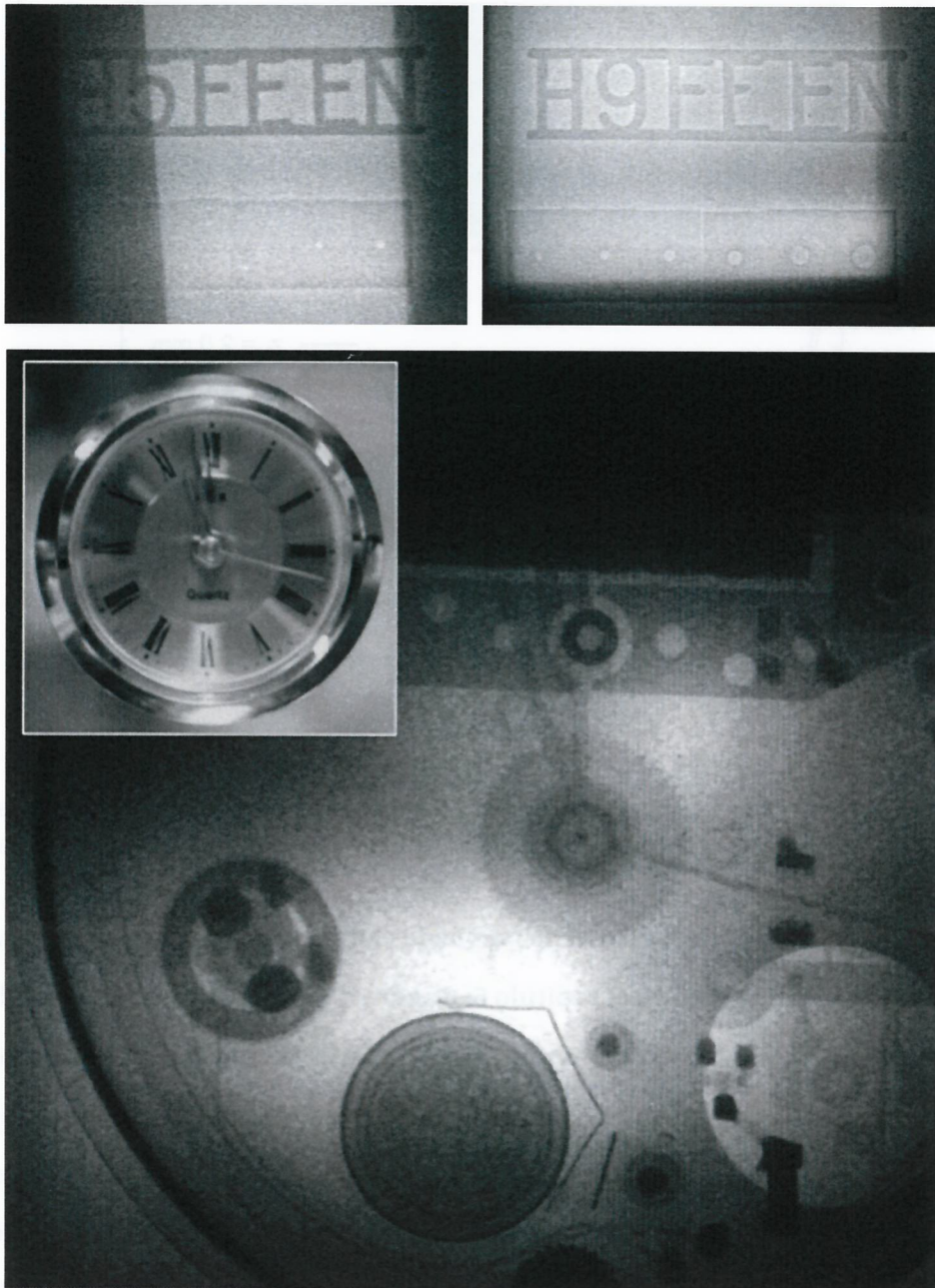


Figura 7: Radiografías con radiación de frenado (arriba) y retrodispersión Compton (abajo).

Perspectivas de futuro

Los resultados descritos en la sección anterior tienen implicaciones inmediatas y a largo plazo. A corto plazo tenemos en cuenta las tareas que surgen directamente de los resultados del proyecto, pero que no se pudieron realizar todavía. Las perspectivas a medio plazo incluyen futuros experimentos que se pueden realizar sobre la base de infraestructuras existentes o desarrollos razonables. Se concluye con un análisis de las perspectivas del campo de las fuentes láser-plasma para los próximos años.

Mejoras de la configuración experimental a corto plazo

Muchos experimentos realizados en el contexto de esta tesis se basaron en el control del perfil longitudinal del plasma. Con el fin de crear tales perfiles de densidad hemos usado bien dos chorros de gas o un chorro de gas supersónico combinado con una cuchilla para crear un frente de choque. Desafortunadamente, ninguna de estas técnicas nos permite variar la posición de la transición y la densidad de forma completamente independiente. De hecho hay siempre una interacción entre los dos flujos de gas o el flujo de gas y el frente de choque, respectivamente. Sin embargo, para un mejor control y comprensión es indispensable tener un control completo de esos parámetros. Un primer paso sería realizar una caracterización completa del conjunto. En nuestro caso, esto requeriría medidas tomográficas de la densidad de la fuente en un amplio rango de presiones y posiciones.

La mayoría de los experimentos también compartían los mismos diagnósticos, que consisten en un detector encima de la zona de interacción, un interferómetro lateral para medir la densidad del plasma, un espectrómetro de electrones y un detector de rayos X. Añadidos útiles a esta configuración estándar serían, por ejemplo, incluir un integrating current transformer (ICT) para medir directamente la carga del haz.

Fuentes de luz sincrotrón basadas en la interacción láser-plasma

Además, algunos diagnósticos adicionales para el láser serían útiles para muchos tipos de experimentos, por ejemplo, para obtener una mejor comprensión de la evolución del pulso. También tenemos la intención de mejorar los detectores X / gamma. En particular, sigue siendo difícil medir la radiación más allá de 100 keV, razón por la cual hemos realizado pruebas iniciales que midieron la respuesta de diferentes escintiladores. Estos podrían ser incluidos en una matriz de sensores para medir radiación de alta energía.

Perspectivas de investigación a corto y medio plazo

Más allá de estas mejoras inmediatas a la configuración experimental, los resultados de esta tesis se pueden ampliar de varias maneras. En lo que sigue, por tanto, vamos a discutir algunos ejemplos de experimentos que podrían profundizar en nuestros resultados. Una de las principales conclusiones de la tesis es que la inyección por ionización permite la producción estable de radiación betatrón. El descubrimiento de este régimen es un paso importante para las aplicaciones más sofisticadas de los rayos X de duración de femtosegundos, por ejemplo para la cristalografía de alta resolución temporal. Otro resultado importante ha sido que podemos influir en la amplitud de oscilación betatrón a través del desenfoque en la parte trasera de la burbuja. De hecho, el cambio de la amplitud hace no sólo aumentar la emisión de radiación, sino también variar la velocidad efectiva a la que los electrones se propagan en la dirección del láser. Por lo tanto, un régimen de interés para las investigaciones futuras podría ser aumentar la amplitud de betatrón hasta que la velocidad longitudinal de los electrones sea igual a la velocidad de fase de la onda de plasma. Tal configuración tendría una fase fija entre los electrones y la onda, así que podría proporcionar una alternativa al escenario de rephasing, presentado en esta tesis. Una estimación de los parámetros requeridos se demuestra en la Fig.8b.

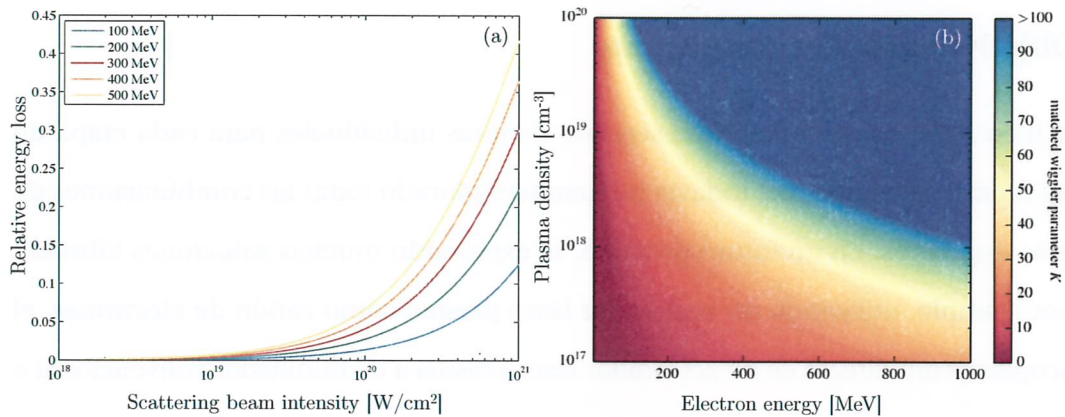


Figura 8: a) Cálculo demostrando la pérdida de energía de un haz de electrones por la interacción con un ondulator óptico de alta potencia. B) Parámetros de difracción necesarios para equiparar la velocidad longitudinal de electrones con la velocidad de fase de la onda de plasma.

Nuevos dispositivos de focalización, como la lente láser-plasma o la lente plasma creada por haces de carga alta, también permitirán muchos desarrollos sucesivos. Por ejemplo tales lentes podrían ser empleadas para reducir el tamaño de la fuente en la conversión de radiación de frenado, o para mejorar el ancho de la radiación en la retrodispersión Compton.

Nuestros resultados en retrodispersión Compton animan además a seguir usando la fuente para aplicaciones de imagen. Un ejemplo sería aprovechar el pequeño tamaño de la fuente para realizar imágenes con contraste de fase. O bien, la variación de la energía del haz de electrones podría permitir imagen de energía dual. Un interesante experimento de física fundamental sería medir la reacción a la radiación. Dada la estabilidad que hemos logrado utilizando inyección por choque, sería posible observar directamente el efecto clásico con ambos haces principales del láser SALLE JAUNE. Las estimaciones de este experimento se demuestran en Fig.8a. Sin embargo, este efecto será mucho más fácil de observar con un láser de petavatios.

Objetivos a medio y largo plazo

Si bien hemos presentado una serie de mejoras individuales para cada etapa de las fuentes láser-plasma, todavía no hemos explorado todas las combinaciones de esos esquemas. En un futuro próximo, se explorarán muchas soluciones híbridas, por ejemplo, utilizando un acelerador láser-plasma como cañón de electrones, el acoplamiento directo de un acelerador láser-plasma a un ondulator convencional o combinaciones de aceleradores convencionales con dispersión Compton. Es también probable que las lentes de plasma sean un elemento importante para mantener la emitancia del haz en estas configuraciones.

Aun así, la perspectiva a largo plazo sigue siendo crear una fuente completamente óptica, que sea compacta, fiable, sintonizable y brillante. Un paso importante en esta dirección ha sido la combinación de retrodispersión con inyección controlada utilizando los choques (publicado recientemente por el grupo del MPQ). Las fuentes del futuro también deben proporcionar una mayor tasa de repetición, que inevitablemente requiere nuevos desarrollos en la tecnología láser. Pero al mismo tiempo el acelerador de plasma debe funcionar tan eficientemente y establemente como posible. En este contexto, se espera un alto impacto de nuestros resultados sobre inyección por ionización y modulación de la densidad de plasma.