

# Laser-driven ion acceleration from ultrathin solid targets



VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

Luca Christopher Stockhausen  
FACULTAD DE CIENCIAS  
Departamento de Física Aplicada. Área de Óptica.  
Universidad de Salamanca

*A Thesis submitted for the degree of Doctor in Physics*

October 2015

RICARDO TORRES LA PORTE, Físico en el QUASAR group del Cockcroft Institute en la University of Liverpool, y

ENRIQUE CONEJERO JARQUE, Profesor Titular del Área de Óptica del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Salamanca,

CERTIFICAN:

Que la presente Memoria, "Laser-driven ion acceleration from ultrathin solid targets" ha sido realizada bajo su dirección en el Área de Óptica del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Salamanca por Don LUCA CHRISTOPHER STOCKHAUSEN y constituye su Tesis Doctoral para optar al grado de Doctor en Física por la Universidad de Salamanca.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ricardo Torres La Porte', with a horizontal line underneath.

Ricardo Torres La Porte

Enrique Conejero Jarque

Salamanca, 30 de octubre de 2015.

## Resumen

La interacción de pulsos láser de alta potencia (teravatios a petavatios) con la materia crea un plasma en condiciones extremas, capaz de sostener grandes campos eléctricos ( $\sim$  TV/m). Estos campos eléctricos se pueden emplear para acelerar partículas cargadas (electrones, protones, iones) a altas energías ( $>$  GeV para los electrones, decenas a cientos de MeV/u para los protones y los iones). En general estos pulsos láser ultraintensos ( $>$   $10^{19}$  Wcm $^{-2}$ ) interactúan con un blanco, que puede ser gaseoso, líquido (electrones) o sólidos (protones, iones). La tesis presentada investiga experimentalmente y numéricamente la aceleración de protones e iones de blancos sólidos finos. La aceleración de iones con láseres se ha convertido en un campo activo de la investigación en las últimas dos décadas. En el esquema de Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) bien entendido a día de hoy, los iones son acelerados a través de un campo grande de separación de cargas en la parte trasera del plasma sobredenso. Estos iones generados por TNSA se comparan favorablemente con las técnicas de aceleración convencional es con respecto a su emitancia, su brillo y la duración del pulso. Sin embargo, todavía hay muchos obstáculos como energías suficientemente altas y tasas de flujo que deben superarse para hacer de esos haces de partículas generadas por láser una herramienta útil para aplicaciones tales como el confinamiento inercial, *fast ignition*, o la terapia de hadrones. Al lado del esquema TNSA, han surgido otros regímenes de aceleración de iones prometedores. La aceleración por presión de radiación (RPA), basada en la transferencia de momento de los fotones a los electrones, ofrece uno mejor escalado con la intensidad del láser y produce decenas de iones de MeV. También han surgido otros esquemas en el inicio de la transparencia relativista inducida como el *Breakout Afterburner* (BOA), donde la interacción pase de ser de tipo superficial a volumétrica. Mientras que la aceleración

típica TNSA ocurre en blancos sólidos de micrómetros de espesor, tanto RPA como BOA ocurren preferentemente con blancos ultrafinos sobredensos en el rango de los nanómetros.

En la presente tesis, se exploran la aceleración de iones generado por láser en blancos ultrafinos. Se presentan resultados experimentales y numéricos de la interacción de un láser de pulso único y de doble pulso con blancos ultrafinos. En el caso de pulso único, se investiga la aceleración de iones en el régimen de RPA, así como la dinámica de partículas cargadas en el régimen de transparencia relativista. En cuanto al doble pulso, se demuestran un nuevo esquema de aceleración por onda de choque con polarización mixta. En este caso un primer pulso linealmente polarizado expande el plasma sobredenso nanométrico, y el segundo pulso con polarización circular produce una fuerte onda de choque sin colisiones en el plasma. Esto da lugar a una aceleración eficiente de iones pesados hasta 100 MeV/u con intensidades de láser relativamente moderadas ( $\sim 10^{20} \text{ Wcm}^{-2}$ ). Este esquema se ha explorado en el régimen de picosegundos y femtosegundo y se ha demostrado que es muy sensible a los parámetros del blanco y del láser. Por último, se presenta el estudio paramétrico para el sistema láser de petavatio VEGA del Centro de Láseres Pulsados (CLPU) en Salamanca. El láser VEGA del Centro de Láseres Pulsados (CLPU) producirá pulsos láser de 30 J/30 fs con un contraste ultra-alto y una potencia máxima de 1 Petavatio. Los resultados obtenidos en la interacción plasma con pulsos láser únicos y dobles se utilizan para explorar la capacidad de los sistemas del láser VEGA para producir eficientemente haces de iones de varios MeV.

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes . . . . .	1
1.2	Motivación . . . . .	3
1.2.1	Terapia de hadrones . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Interacción de un único pulso con blancos sólidos finos</b>	<b>9</b>
2.1	Resumen . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Interacción de doble pulso con blancos sólidos finos</b>	<b>15</b>
3.1	Resumen . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Conclusión y perspectivas</b>	<b>21</b>
4.1	Conclusión . . . . .	21
4.2	Perspectivas . . . . .	24
	<b>Bibliografía</b>	<b>27</b>

## ÍNDICE

---

# 1

## Introducción

### 1.1 Antecedentes

La historia de la amplificación de luz por emisión estimulada de radiación (LASER) comenzó cuando Albert Einstein explicó por primera vez la teoría de la emisión estimulada en 1917 (1). Tras el desarrollo de la amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación (MASER) por Townes en 1953 (2), el primer láser fue creado por Theodore Maiman en 1960 (3), que utilizó una lámpara de flash para bombear un cristal de rubí sintético en su experimento original. Desde entonces las potencias de pico de los pulsos láser y las intensidades han ido aumentando continuamente. La invención de técnicas tales como el *Q-switching* (4) y el *mode-locking* de (5) en la década de 1960 condujo a la generación de pulsos cortos (de femtosegundo a picosegundos de duración del pulso) con alta intensidad. Un gran avance en la tecnología láser se logró en 1985, cuando Donna Strickland y Gerard Mourou inventaron el concepto de *Chirped Pulse Amplification* (CPA) (6). Al estirar el pulso temporalmente antes de la amplificación y luego recomprimirlo, se hizo posible la construcción de los primeros sistemas láser de tamaño reducido (table-top) con potencias ultra-altas y pulsos ultracortos en el rango del picosegundo y el femtosegundo. Hoy en día, las instalaciones láser de última generación pueden en general dividirse en sistemas láser de pulsos largos del orden de nanosegundos a picosegundos con energías superiores a kilojulios y hasta megajulios y sistemas de pulsos cortos del orden de femtosegundos con energías sub-kilojulio. Los pulsos largos son los más utilizados para la investigación fundamental en física del plasma, la astrofísica de laboratorio, el desarrollo de armas atómicas y la fusión por

## 1. INTRODUCCIÓN

---

confinamiento inercial. Los pulsos más cortos del orden de femtosegundos se utilizan para la explotación de fuentes de rayos X, la física nuclear, la ignición rápida (fast ignition) y la aceleración de partículas generada por láser, cuyo estudio se aborda en esta tesis.

La historia de la aceleración de partículas convencional se inició en el siglo XX. Rolf Widerøe construyó y patentó el acelerador lineal (LINAC) en 1928 (7) y Ernest Lawrence construyó el ciclotrón en 1932 (8). En estas máquinas las partículas son aceleradas por potenciales eléctricos oscilantes rápidos y son capaces de la generación de haces de protones e iones de cientos de MeV. Un hito en la aceleración de protones convencional se estableció con la invención del sincrotrón de protones en 1952, que permitía la aceleración a energías de GeV. Hoy en día el más grande y más potente acelerador de partículas es el gran colisionador de hadrones (LHC) en el CERN, que acelera haces por encima de 13 TeV de energía.

En la década de 1950 Vladimir Veksler propuso por primera vez un acelerador de partículas basado en plasma (9) (antes de la primera láser fue creado por Theodore Maiman en 1960). Toshiki Tajima y John Dawson demostraron teóricamente que un campo de estela (*wakefield*) en un plasma puede ser generado por un pulso láser intenso cuyo tamaño es aproximadamente la mitad de una longitud de onda de plasma, proponiendo así el primer acelerador de electrones basado en láseres en 1979 (10). Hoy en día los electrones pueden ser acelerados fácilmente a energías superiores a 1 GeV (11). Mientras que los electrones pueden ser directamente acelerados a energías relativistas por el campo de láser con intensidades láser moderadas del orden de  $10^{18} \text{ Wcm}^{-2}$  (11), este no es el caso para los iones. La aceleración directa de iones por láser requiere intensidades superiores a  $10^{24} \text{ Wcm}^{-2}$ , que es al menos dos órdenes de magnitud superior a las intensidades alcanzables por los sistemas láser existentes a día de hoy. Por lo tanto, la aceleración de protones impulsada por láser, que se ha convertido en un campo vivo de investigación en las últimas dos décadas (12), siempre se basa en la transferencia de energía de los electrones, que actúan como mediadores. La irradiación de blancos finos (principalmente sólidos) con láseres potentes conduce a la aceleración de haces de protones por campos eléctricos que exceden el TV/m con energías de las partículas de hasta cien MeV a lo largo de distancias muy cortas (a escala micrométrica). Esto contrasta fuertemente con los haces de iones generados por aceleradores convencionales, que son propensos a la ruptura por potenciales del orden de 100 MV/m y por lo tanto

tienen que acelerar partículas cargadas a través de cientos de metros. Características ventajosas de los haces de iones impulsados por láser son el tamaño efectivo de la fuente extremadamente pequeño, el brillo y la corta duración del pulso de iones. En 2000 Snavely et al. (13) atrajeron la atención internacional cuando generaron un intenso haz de protones con una energía máxima de 55 MeV, en un experimento basado en un solo disparo como prueba de principio. Otros desarrollos, también en campos no relacionados directamente con el láser, como la fabricación de los blancos, condujeron a un aumento adicional de la energía, como por ejemplo la generación de protones de 67 MeV por Gaillard et al. en 2011 (14) con un blanco cónico. Hoy en día hay todo un conjunto de instalaciones con láseres en el rango petavatios ( $10^{15}$  W) permiten la aceleración de partículas impulsada por láser (por ejemplo, (13) (14) (15) (16) (17)). En el bien conocido mecanismo *Target Normal Sheath Acceleration* (TNSA), los iones son acelerados a través de un gran campo de separación de carga gen el lado posterior de un plasma opaco. Normalmente, en el régimen TNSA se utilizan blancos sólidos con espesores de micras que se irradian con láseres intensos para producir haces de iones con algunas características no muy favorables como las energías de corte bajas y perfiles espectrales térmicos. Más recientemente, el campo de la aceleración de iones impulsada por láser se ha desplazado un poco al estudio de la interacción de pulsos láser con blancos ultrafinos (nanómetros) sobredensos o casi críticos (18, 19, 20, 21). La interacción de los láseres de alta intensidad con tales blancos ultrafinos parece una ruta prometedora para una generación de haces de iones más eficiente en regímenes como *Radiation Pressure Acceleration* (RPA) y *Breakout Afterburner* (BOA). Sin embargo, todavía hay una serie de inconvenientes que se han de superar, por ejemplo, aumentando aún más energía de las partículas, el control espectral y angular del haz, la eficiencia de conversión de energía del láser en el haz de iones, posibles problemas de activación, así como la estabilidad de los parámetros de aceleración. A pesar de ello, están surgiendo rutas experimentales prometedoras para superar estos problemas.

## 1.2 Motivación

Hay muchas aplicaciones potenciales para los haces de iones acelerados por láser debido a sus características únicas, incluyendo el tamaño de fuente pequeño, el alto grado de

## 1. INTRODUCCIÓN

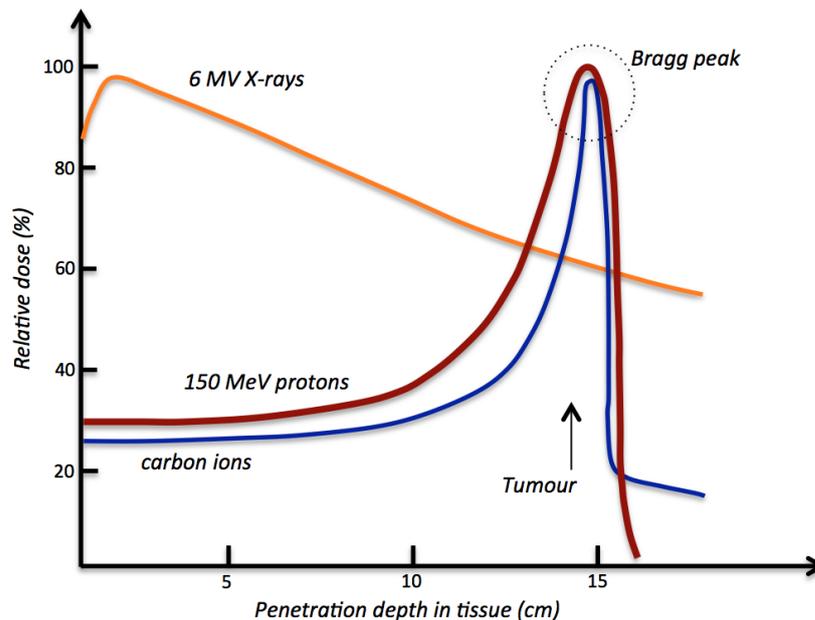
---

laminaridad y la duración ultracorta de la fuente. En esta sección se discuten algunas aplicaciones potenciales.

### 1.2.1 Terapia de hadrones

Haces de iones energéticos generados por aceleradores convencionales ya se utilizan con frecuencia para el tratamiento del cáncer. Robert Wilson propuso el uso radiológico de protones rápidos en 1946 (22) y los primeros pacientes fueron tratados en la década de 1950 con haces de protones generados en ciclotrones. Naturalmente, con los avances en la calidad del haz y las energías alcanzables, los haces de iones generados con láser se han propuesto para su uso clínico (23). Las tasas de cáncer globales aumentan significativamente cada año. En 2012 más de 14 millones de personas fueron diagnosticadas con cáncer y se produjeron más de 8 millones de muertes relacionadas con el cáncer (24), exigiendo claramente un tratamiento asequible y eficaz. Si algunos tipos de cáncer se pueden tratar bien con quimioterapia sola, otros necesitan radioterapia y a veces cirugía. La quimioterapia y la radioterapia son dos enfoques diferentes de tratamiento y se emplean de diferentes maneras. La quimioterapia se refiere al tratamiento con fármacos con el objetivo de evitar que las células cancerosas se reproduzcan y dividan. Por lo general se da en una serie de sesiones antes de una operación para reducir el tumor y debilitar su adhesión y también se usa para destruir las células que quedan después de una operación. Como con cualquier tipo de medicamento, hay efectos secundarios y el tejido sufre daños. La radioterapia es menos dura que la quimioterapia. Se usa radiación para destruir las células cancerosas en un punto específico al dañar el ADN de las células cancerosas. La radiación se puede aplicar directamente al tumor en lugar de inyectar medicamentos en los vasos sanguíneos. Por lo tanto, la radioterapia es un tratamiento más preciso, ya que se basa en el tipo, localización y estadio del cáncer. Los electrones y rayos gamma se utilizan ampliamente, pero recientemente iones de carbono y protones se han utilizado también para los tratamientos. Mientras que los haces de electrones y fotones son generados de forma relativamente barata, ambos depositan su energía de forma continua en la materia, provocando de este modo daños no deseados al tejido sano durante el tratamiento. Por el contrario, el patrón de deposición de energía de los iones muestra un pico agudo, el pico de Bragg (figura 1.1). Mediante la selección de la energía inicial del haz de iones, la dosis puede ser depositada localmente en el tumor, sin afectar a las células sanas. Por lo tanto, la radioterapia con haces

de iones rápidos es una de las vías más prometedoras para el tratamiento del cáncer en el futuro. Para tratar cualquier tejido canceroso en el cuerpo humano, hacen falta haces de protones o iones de alrededor de 200 MeV o 250 MeV/u, respectivamente (25). Dependiendo del tumor, es necesario para un tratamiento con éxito una dosis entre 2 Gy y 10 Gy ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ ) (23). Esto corresponde a aproximadamente a  $2 \times 10^{10}$  protones de 250 MeV depositados en un kilogramo. Esto podría requerir varios miles de pulsos de iones generados por láser en función del número de partículas disponibles por pulso y del volumen del tumor.

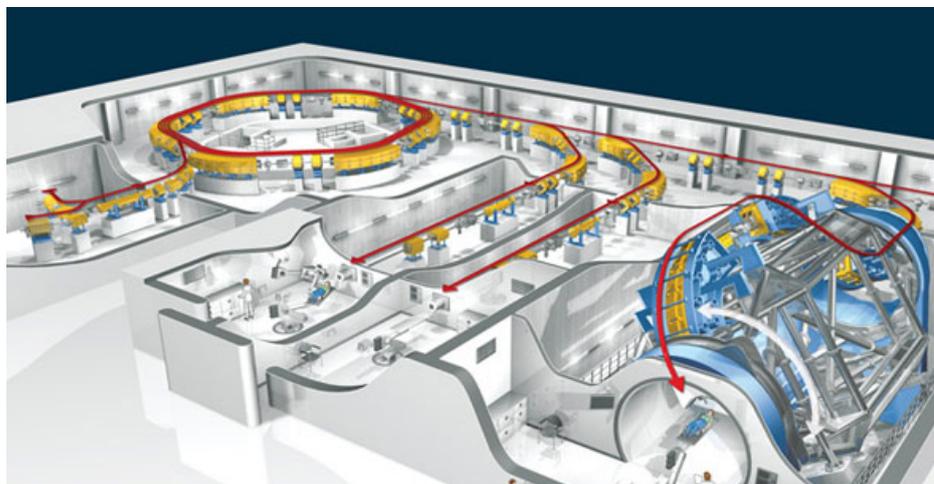


**Figure 1.1: Bragg Peak** - Curvas de deposición de dosis de los rayos X, los protones y los iones de carbono en el tejido humano. Mientras que los rayos X pierden su energía de forma continua, protones e iones de carbono depositan casi toda su energía antes de ser detenidos (pico de Bragg)

Hoy en día existen varias instalaciones de gran tamaño de aceleradores para aplicaciones médicas que utilizan aceleradores lineales, ciclotrones o sincrotrones para generar haces de iones con energías de decenas a cientos de MeV para el tratamiento del cáncer. Una de estas instalaciones es la Ion Therapy Center Heidelberg (HIT) en Alemania, que utiliza un sincrotrón alimentado por un acelerador lineal para la generación de pro-

## 1. INTRODUCCIÓN

---



**Figure 1.2: Heidelberg Ion Therapy Center** - Dibujo del HIT (Centro de Terapia de Iones de Heidelberg) (26). Los haces de iones son acelerados por un sincrotrón de altas energías y guiados y enfocados por imanes en tubos de vacío. Tres haces independientes llegan a las salas de tratamiento e irradian los pacientes.

tones de 221 MeV e iones de carbono de 430 MeV/u. El HIT cuenta con un sistema de pórtico (670 toneladas métricas) para permitir la rotación completa del haz para radiar al paciente con precisión submilimétrica. Desde 2009, los pacientes han sido tratados con éxito con la radioterapia de protones e iones de carbono. Sin embargo, los costes de construcción de la instalación fueron altos (superiores a 115 millones de euros), así como las demandas de infraestructura. Los tres niveles del edificio con una superficie de 5.027 metros cuadrados tienen casi el tamaño de un campo de fútbol; solamente el pórtico tiene 25 m de largo y 13 m de diámetro y pesa 670 toneladas métricas (figura 1.2). En promedio 750 pacientes por año pueden ser tratados con la instalación funcionando a plena capacidad. Los haces de iones generados por láser podrían ser la vía para conseguir instalaciones de tratamiento más pequeñas debido a las longitudes de aceleración de unas pocas micras frente a los varios metros de los aceleradores convencionales ((27), (28), (29), (30), (31), (32), (33), (34), (35)). Esto también permite la generación del haz de iones más cerca del paciente, ya que un sistema impulsado por láser ofrece ventajas en términos de guiado; es más fácil conducir un haz láser con espejos que un haz de partículas con imanes pesados. Por otra parte, las instalaciones basadas en láser podrían ser más asequibles y permitir un acceso más amplio. Sin embargo, los principales inconvenientes que aún tienen que superarse por esta nueva

tecnología incluyen la energía máxima alcanzable por los iones, su monocromaticidad y su fiabilidad. Los aceleradores convencionales ofrecen haces muy estables, con una muy pequeña dispersión de energía de menos del uno por ciento, mientras que los haces de iones generados por láser por lo general tienen un espectro térmico y una dispersión de energía de hasta el 100%. Por último, el número de protones producidos en un solo tiro no es lo suficientemente alto como para tratar el tejido canceroso (depende del volumen de objetivo), y hasta ahora no se ha probado que exista ningún mecanismo de aceleración robusto que pueda operar a una alta tasa de repetición.

## 1. INTRODUCCIÓN

---

## 2

# Interacción de un único pulso con blancos sólidos finos

En los inicios de la investigación de la aceleración de iones por láser los esfuerzos se centraron principalmente en el estudio de la interacción de láseres de alta intensidad ( $> 10^{18} \text{ Wcm}^{-2}$ ) incidentes sobre láminas sólidas de espesores de micras. En estas condiciones, se encontró que la *Target Normal Sheath Acceleration* (TNSA) (36) era el mecanismo dominante para la aceleración de los iones. En los modelos TNSA, los iones son acelerados a través de un campo muy intenso de separación de carga en la parte trasera de un plasma opaco, lo que resulta en la generación de haces de iones con una distribución de energía térmica y energías de corte moderadas (alrededor de 50 MeV) (36).

Debido a sus moderados requisitos respecto a la intensidad del láser respecto al blanco moderadas (es experimentalmente más fácil disparar con una intensidad láser moderada ( $\sim 10^{18} - 10^{19} \text{ Wcm}^{-2}$ ) sobre objetivos micrómetros que con láseres ultraintensos ( $\sim 10^{21} - 10^{22} \text{ Wcm}^{-2}$ ) sobre láminas de nanómetros), el esquema TNSA puede ser visto como un mecanismo fiable, lo que permite la generación reproducible de iones de varios MeV. Sin embargo, el escalado de las energías máximas con la intensidad del láser va como  $E_{max} \propto \sqrt{I}$  (37), que se compara desfavorablemente con la escala propuesta en otros mecanismos, como la *Radiation Pressure Acceleration* ( $E_{max} \propto I^2$ ) (38).

Además, los haces de iones generados por TNSA no están bien adaptados para las aplicaciones prácticas previstas, como la terapia de hadrones, debido a sus propiedades

## 2. INTERACCIÓN DE UN ÚNICO PULSO CON BLANCOS SÓLIDOS FINOS

---

pobres en términos de energía de corte, dispersión de energía y las tasas de flujo. La terapia de hadrones para tumores profundos requiere energías de  $\sim 250$  MeV para protones,  $\sim 400$  MeV/u para iones de carbono y un ancho de energía por debajo de 1%. En oposición a esto, los haces TNSA tienen un espectro de energía térmica (con una energía extendida hasta el 100%) y energías de corte de alrededor de 50 MeV para los protones.

Por todo ello, los mayores esfuerzos en el estudio de la aceleración de iones por láser se han desplazado últimamente desde el régimen TNSA (blancos micrométricos) hacia otros esquemas de aceleración con blancos mucho más finos (nanómetros), que predicen más altas energías y un mejor escalado con los parámetros del láser. Uno de los mecanismos más prometedores es la aceleración de iones por presión de radiación *Radiation Pressure Acceleration* (RPA) (39, 40, 41) que se introduce en el capítulo 2 de esta memoria junto con otros esquemas tales como el *Breakout Afterburner* (BOA). El BOA funciona mejor en el inicio del régimen de transparencia inducida relativísticamente (RIT) y por lo tanto también depende de forma muy sensible de los parámetros del láser y del blanco (42, 43).

A continuación se presentan resultados numéricos y experimentales de la interacción de pulsos láser de alta intensidad con blancos sólidos ultrafinos. En la primera parte, la generación eficiente de haces de iones en el régimen de RPA con un único pulso de láser intenso se investiga en detalle con simulaciones PIC, incluyendo un análisis de varios parámetros del láser y del blanco.

El régimen RPA investigado en las simulaciones funciona mejor en el umbral de la *relativistically induced transparency* (RIT). El inicio de la RIT no está todavía completamente explicado, ya que se acompaña de una compleja dinámica de electrones que afecta críticamente a la aceleración de los iones.

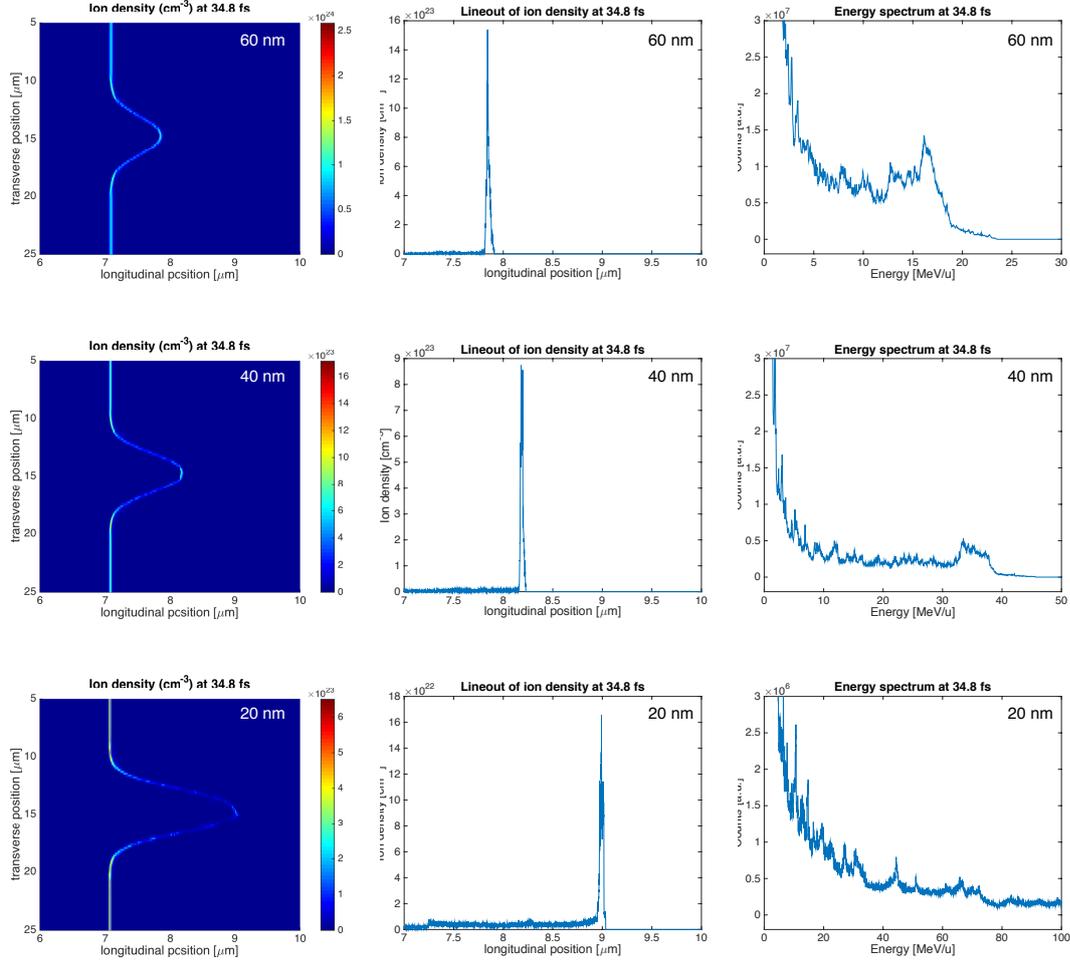
### 2.1 Resumen

La producción de haces de iones de alta energía a partir de la interacción de pulsos láser ultraintensos con blancos ultrafinos se ha investigado numéricamente. Las simulaciones muestran evidencias del modelo RPA de aceleración de iones, según se ve en la formación de frentes de choque y distribuciones de energía de iones no térmicos que muestran alguna población prominente en las energías más altas. Las energías de corte de estos

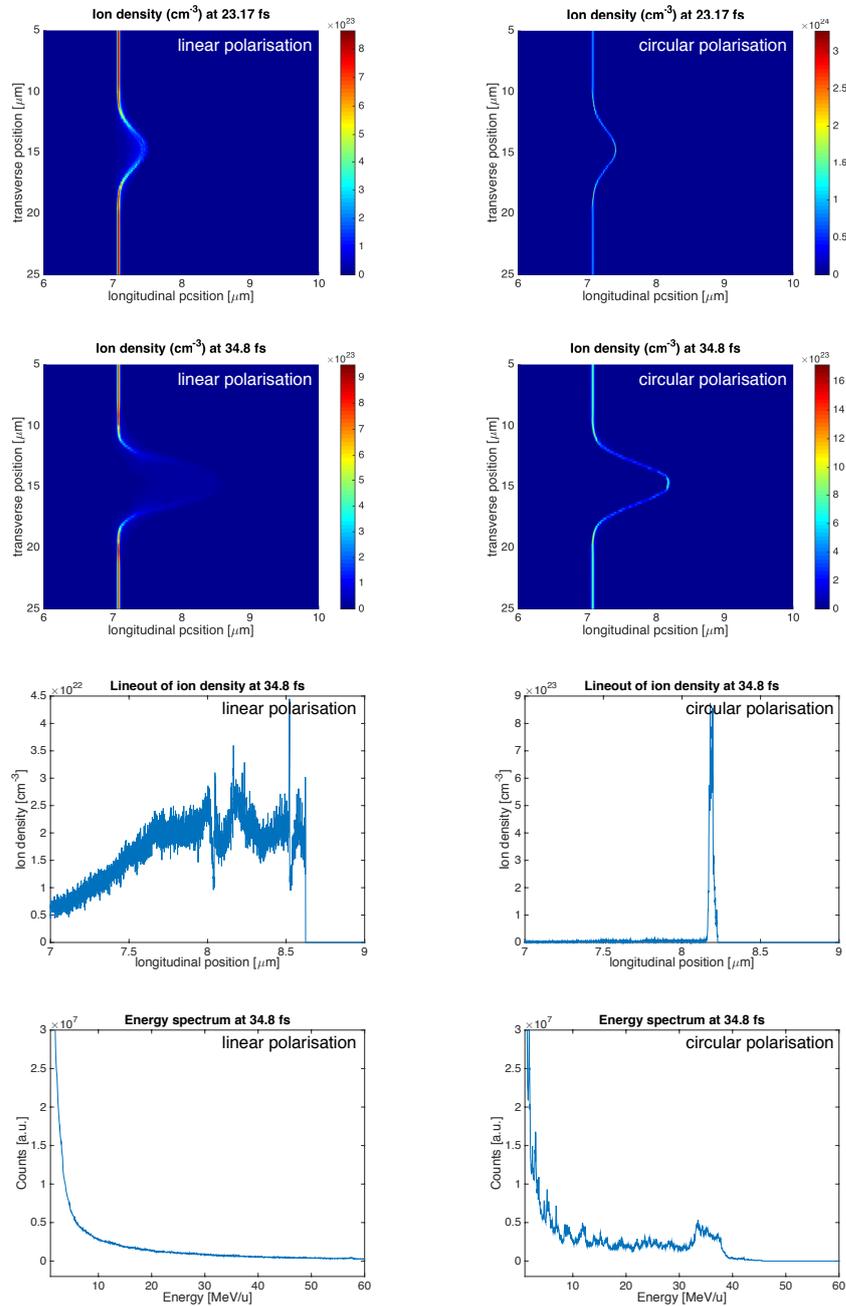
haces de iones escalan favorablemente como  $E_{max} \propto I^2$  según lo predicho por el modelo RPA. Simulaciones con blancos de múltiples especies muestran que el mecanismo de RPA actúa volumétricamente sobre todas las especies de iones en el grueso de plasma, lo que favorece la aceleración de iones más pesados sin la necesidad de una exigente preparación los blancos.

Por lo tanto, a escala de femtosegundo, sistemas láser de alto contraste como Astra-Gemini y VEGA son muy adecuados para acelerar iones de forma eficiente en el régimen dominado por presión de radiación. La forma espectral de los haces de iones producidos es fuertemente dependiente tanto de los parámetros del láser como de los del blanco. Las energías de iones más altas se obtienen con los blancos más finos, la polarización circular y las más altas intensidades del láser. De esto se puede concluir que el régimen RPA sería accesible al láser VEGA 3 en el CLPU siempre que se pueda llegar a un contraste de pulso mayor que  $10^{12} : 1$  en una escala de tiempo más corta que 1 ps, manteniendo la intensidad por encima de  $10^{21} \text{ Wcm}^{-2}$ . En ese caso se podrían generar protones de energías de 100 MeV e iones  $C^{6+}$  con energías de 100 MeV/u, con un potencial para un aumento de energía intensidades de láser superiores, y una población relativamente alta de iones de alta energía, mayor que con el mecanismo TNSA.

## 2. INTERACCIÓN DE UN ÚNICO PULSO CON BLANCOS SÓLIDOS FINOS



**Figure 2.1: Barrido para varios espesores** - Análisis de resultados en función del espesor para blancos de carbono ( $I = 10^{22} \text{ Wcm}^{-2}$  con pulsos de polarización circular). Se muestran las densidades de carga en tres instantes de tiempo y los espectros de iones. El tiempo corresponde al tiempo después del momento en el que el pulso láser incide en el blanco. Los espectros de iones corresponden al tiempo de paso 34.8 fs. Las energías de corte aumentan significativamente con la disminución del espesor y los espectros de iones muestran modulaciones más fuertes para el blanco más delgado. El color azul claro en el mapa de color corresponde a altas densidades, mientras que el color púrpura indica las regiones de baja densidad.



**Figure 2.2: Comparación de polarizaciones** - Comparación de polarización lineal y circular para blancos de carbono en condiciones idénticas ( $I = 10^{22} \text{ Wcm}^{-2}$ , 40 nm de espesor del blanco). Se muestran las densidades de carga en tres momentos de tiempo y los espectros de iones. El tiempo corresponde al tiempo después del momento en el que el pulso láser incide en el blanco. Los espectros de iones se corresponden con un tiempo de 32 fs. El pulso láser polarizado linealmente calienta fuertemente los electrones del plasma y provoca que la expansión del blanco lleve la densidad de electrones a valores cercanos al crítico. Mientras se alcanzan altas energías de corte, el espectro tiene una forma térmica sin picos afilados. El pulso polarizado circularmente empuja de manera eficiente el plasma hacia dentro y conduce un paquete comprimido de iones a altas energías.

## 2. INTERACCIÓN DE UN ÚNICO PULSO CON BLANCOS SÓLIDOS FINOS

---

## 3

# Interacción de doble pulso con blancos sólidos finos

Desde los primeros días de la investigación en aceleración láser ha habido un esfuerzo continuo para comprender mejor y aprovechar la rica variedad de los fenómenos que surgen en la interacción láser-plasma, variando de forma controlada la gran cantidad de parámetros que los determinan. Estos incluyen el tamaño del blanco, su forma y su composición ((14), (44)), la geometría de la interacción (45) y los parámetros del láser (intensidad, polarización, duración del pulso y forma del pulso) ((37), (46), (47)).

Entre estos últimos el uso de un pre-pulso controlado ha sido propuesto como una manera eficaz de adaptar y optimizar el perfil de densidad del blanco ((48), (49)). Por ejemplo, un pre-pulso suficientemente intenso puede iniciar una expansión del blanco de manera que algún tiempo después del impulso principal puede encontrarse con un plasma próximo a la densidad crítica. Estos plasmas cercanos a la densidad crítica son particularmente adecuados para sostener el mecanismo de aceleración de *holeboring* (50).

En este capítulo se presentan los resultados sobre la investigación de la aceleración de iones utilizando esquemas de doble pulso láser.

Desde el punto de vista experimental, se llevaron a cabo campañas con blancos ultrafinos de aluminio sólido para estudiar la viabilidad de una mayor aceleración de los iones con una configuración de dos pulsos láser linealmente polarizados. Los resultados llevaron a la investigación y la propuesta de un nuevo esquema de aceleración mediante un pulso doble con polarizaciones mixtas (lineal-circular).

### 3. INTERACCIÓN DE DOBLE PULSO CON BLANCOS SÓLIDOS FINOS

---

Desde el punto de vista numérico, se han llevado a cabo simulaciones con el código PIC (particle-in-cell) OSIRIS con el fin de encontrar las mejores condiciones prácticas de este nuevo esquema de aceleración.

Estas simulaciones se realizaron en primer lugar para duraciones de pulso largo (de picosegundos) para permitir la comparación de los resultados experimentales y numéricos presentados en la primera parte. Más adelante se extendieron para estudiar la viabilidad del esquema con pulsos de femtosegundos.

## Aceleración de iones con dos pulsos láser de diferentes polarizaciones

En experimentos y simulaciones anteriores se ha demostrado que un láser con un pre-pulso polarizado linealmente podría crear un plasma casi crítico en el que se mejoraría el acoplamiento de la energía del pulso láser principal, también polarizado linealmente, con los electrones. Esta idea se extendió para estudiar las diferencias con un pulso principal polarizado circularmente. En este caso el segundo pulso puede generar un choque en el plasma de densidad casi crítica en lugar de un calentamiento volumétrico habilitado para RIT y la formación de chorro de partículas aceleradas a continuación.

La eficiencia del proceso de hole boring aumenta a medida que la densidad del plasma se reduce a justo por encima de la densidad crítica. Trabajos anteriores han explotado la pre-pulso que a menudo acompaña a un pulso de láser de alta potencia para preparar de alguna manera el plasma y optimizar sus condiciones para la aceleración de iones, pero en estos esquemas se utilizan pulsos de láser de la misma polarización ((49), (48)).

Lo siguiente es lo mismo que ha aparecido antes. No tiene sentido repetirlo

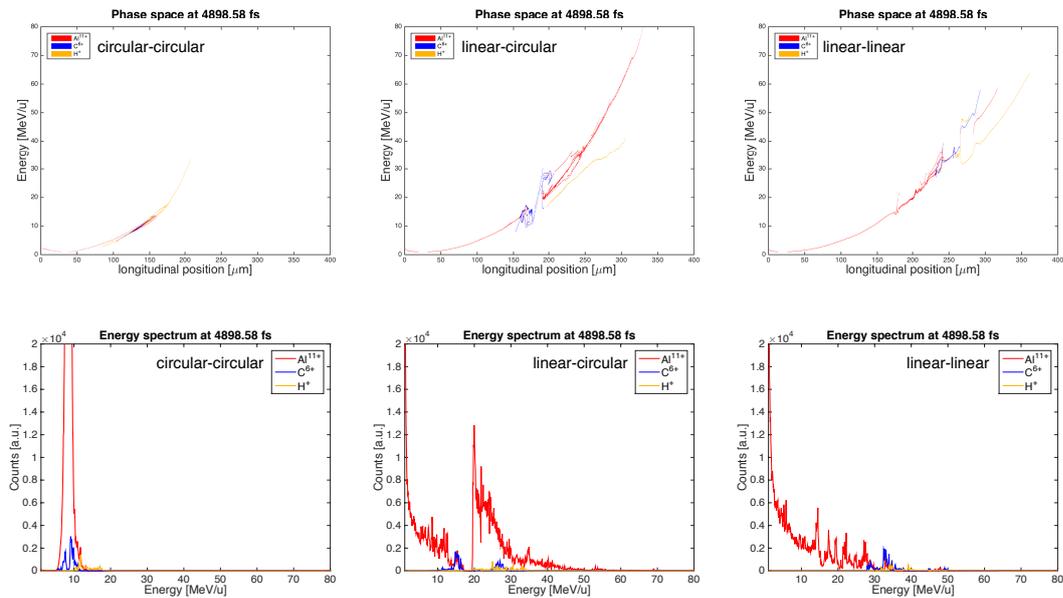
Las simulaciones con el código OSIRIS se llevaron a cabo en primer lugar para el pulso doble polarizados linealmente en el régimen de picosegundos. Estas simulaciones se compararon con los resultados experimentales y numéricos de EPOCH presentan en la primera parte del capítulo con el fin de validarlos. La polarización del pulso principal, entonces se cambió a circular para probar la idea propuesta anteriormente en un conjunto de condiciones similares a las utilizadas en los experimentos reportados previamente. Simulaciones con pulsos de femtosegundos se llevaron a cabo para investigar la viabilidad de este nuevo esquema con Ti: láseres de zafiro. Con el fin de encontrar las condiciones óptimas, las simulaciones con diferentes duraciones de pulso, retrasos de pulso y espesor previsto se llevaron a cabo.

### 3.1 Resumen

Se propone un nuevo mecanismo para la aceleración eficaz de iones pesados. Mediante el uso de una configuración de pulso doble, se pueden generar partículas de alta energía con intensidades moderadas. Los espectros de iones son muy estrechos y se

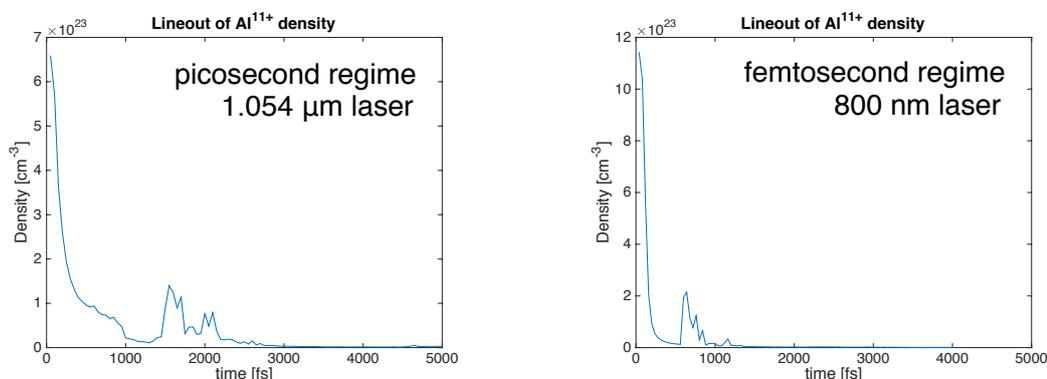
### 3. INTERACCIÓN DE DOBLE PULSO CON BLANCOS SÓLIDOS FINOS

observa una aceleración eficiente de los iones más pesados como lo demuestra el adelantamiento de los iones en comparación a los protones. Esta idea fue motivada por el trabajo experimental en aceleración de iones con un pulso doble con un retardo fijo en VULCAN. Mientras que se utilizó experimentalmente un doble pulso de configuración lineal-lineal, la simulación PIC se ha realizado con un pulso doble de polarización mixta. Un pre-pulso de polarización lineal es un motor ideal para la expansión del plasma, y un pulso principal polarizado circularmente puede generar un choque fuerte en el plasma acelerando así los iones pesados a altas energías. Este esquema novedoso se demostró en primer lugar en el régimen de picosegundos, pero nuestro estudio muestra que este mecanismo también es accesible con pulsos de femtosegundos más cortos. Sin embargo, el esquema es de momento difícil de implementar experimentalmente debido a la complicación de ajustar dos pulsos con el retardo y las polarizaciones adecuadas con los sistemas láser existentes.



**Figure 3.1: Comparativa de pulso doble - régimen de picosegundos** - Comparativa de resultados de simulación con polarizaciones circular-circular, lineal-circular y lineal-lineal. Excepto las diferentes polarizaciones, las simulaciones se realizaron en condiciones idénticas. Se muestran los espacios de fase y los espectros de energía correspondiente.

En esta configuración, al principio, un pulso de polarización lineal de intensidad moderada calienta la población de electrones haciendo que el blanco sobredenso se ex-



**Figure 3.2: Evolución de la densidad de carga en régimen de femtosegundos y picosegundos** - Evolución de la densidad de los iones de aluminio en el tiempo con la configuración de doble pulso de polarización mixta en régimen de femtosegundo (izquierda) y de picosegundos (derecha).

panda y arrastrando los iones detrás para preservar la cuasi-neutralidad del plasma. En el blanco de varias especies los iones más ligeros lideran el grupo de iones como en el escenario TNSA. Después de un tiempo de retardo de alrededor de un picosegundo, un segundo pulso láser de mayor intensidad con polarización circular genera un choque sin colisiones en el plasma pre-expandido y casi crítico que acelera eficazmente los iones restantes, produciendo un haz cuasi-monoenergético que, en las condiciones adecuadas, puede adelantar al paquete de protones. Las simulaciones muestran la generación de haces cuasi-monoenergéticos de iones pesados a 10-100s MeV por nucleón, con intensidades moderadas de  $2 \times 10^{21} \text{ Wcm}^{-2}$ , relajando considerablemente las condiciones requeridas para el mecanismo de hole boring.

### 3. INTERACCIÓN DE DOBLE PULSO CON BLANCOS SÓLIDOS FINOS

---

## 4

# Conclusión y perspectivas

## 4.1 Conclusión

Esta memoria de tesis muestra un trabajo de investigación de aceleración de iones generada con láser en láminas ultrafinas. Los objetivos principales de la investigación eran encontrar las condiciones de la interacción láser-plasma que maximicen la energía de los iones y minimicen la dispersión de energías, acercándolos a los parámetros que requieren aplicaciones como la terapia de hadrones. Se han caracterizado los efectos que determinan y limitan los parámetros del haz de iones que se puede conseguir en este tipo de interacciones. Esto incluye la comprensión del inicio de la transparencia inducida relativísticamente, el transporte de electrones en el plasma, el desarrollo de inestabilidades y la aparición de múltiples mecanismos de aceleración. Además, se han obtenido estimaciones para posibles experimentos de aceleración de iones con el láser VEGA y los requisitos para optimizar su uso en este contexto. En particular, se han investigado esquemas de pulso único y pulso doble.

### **Estudio numérico de interacciones de pulsos únicos con blancos sólidos ultrafinos**

Se ha demostrado que pueden acelerarse iones de forma eficiente hasta energías de 100 MeV/u en el esquema de Aceleración por Presión de Radiación (RPA) usando pulsos de femtosegundo con polarización circular. La producción del haz de iones depende de forma sensible del espesor y la composición del blanco. Se han encontrado condiciones óptimas para la aceleración para láminas de DLC (diamond-like carbon) de

#### 4. CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

---

40 nanómetros de espesor. Sin embargo, quedan varios problemas que deben resolverse todavía. Simulaciones de alta resolución muestran el desarrollo de inestabilidades transversales que también se han observado experimentalmente. Aparecen estructuras con forma de burbuja en el perfil de densidad espacial de los haces de iones, que son un claro síntoma de la formación de inestabilidades de tipo Rayleigh-Taylor.

##### **Investigación experimental de la dinámica de electrones en el inicio de la transparencia inducida relativísticamente**

Además del mecanismo de aceleración por presión de radiación (RPA) hay otros esquemas de aceleración en la región del inicio de la transparencia inducida relativísticamente (RIT), por ejemplo el "Breakout Afterburner" (BOA). Dado que las intensidades de los sistemas láser actuales no son suficientes para acelerar iones directamente, la transferencia de energía entre el láser y los iones se realiza siempre a través los electrones del plasma. Por ello es necesario un conocimiento profundo de la dinámica de los electrones. La dinámica colectiva de los electrones en una lámina en régimen de transparencia inducida relativísticamente cuando incide sobre ella un pulso linealmente polarizado muestra una dependencia tipo  $\cos(2\theta)$ , siendo  $\theta$  el ángulo entre el momento radial del electrón y el eje de polarización del láser. Esto se manifiesta en una formación de doble lóbulo en la distribución de la densidad de electrones. Se ha demostrado que el perfil del haz de electrones es sensible a la dirección de polarización del láser y al porcentaje de la energía del láser que se transmite a través del blanco.

##### **Investigación experimental de interacciones de doble pulso con blancos sólidos ultrafinos**

En el marco de esta tesis, se ha estudiado también la interacción de un doble pulso láser con blancos sólidos. Muchos mecanismos de aceleración de iones dependen sensiblemente de la longitud de escala del plasma. Por ello un pre-pulso bien controlado puede preparar el plasma para maximizar la consiguiente aceleración por el pulso principal. En esta línea, se ha estudiado una posible mejora en las energías de los iones generados en láminas ultrafinas en régimen RIT. En el caso de un doble pulso, durante el tiempo total de interacción hay una evolución entre distintos mecanismos de aceleración y para estudiarlos se han separado las diferentes componentes angulares del haz de iones. Se ha demostrado que la expansión controlada del blanco variando el perfil

de intensidad de la primera parte del pulso produce un chorro de plasma expandido que permite un mejor acoplamiento energético con los protones.

### **Investigaciones numéricas de aceleración de iones con pulsos dobles de polarización mixta**

Con el uso de simulaciones de partícula-en-celda (PIC) hemos identificado un esquema novedoso de aceleración con pulsos dobles: la aceleración de iones por choque sin colisiones con pulsos de polarización mixta. Un primer pulso polarizado linealmente de intensidad moderada calienta la población de electrones haciendo que el blanco sobredenso se expanda y arrastre a los iones para preservar la cuasi-neutralidad. Después de un retardo de alrededor de un picosegundo, un segundo pulso de láser de mayor intensidad y polarización circular produce un choque sin colisiones en el plasma pre-expandido y casi crítico que acelera eficazmente los iones restantes. Este esquema prevé la generación de iones pesados de energías  $> 100$  MeV/u con intensidades de  $10^{21}$  Wcm<sup>-2</sup>.

### **Rendimiento y requisitos para experimentos de aceleración de iones en VEGA**

Finalmente, los resultados obtenidos y las leyes de escala existentes en la bibliografía nos han servido para estimar las capacidades del láser VEGA en términos de aceleración de iones. La duración del pulso ultracorto, su ultra-alta intensidad y el alto contraste hacen de VEGA un sistema ideal para acelerar iones en el esquema de aceleración por presión de radiación. Además las tres salidas independientes permiten la implementación de esquemas de doble pulso, lo que podría proporcionar una vía a la aceleración eficiente de iones pesados. A pesar de la idoneidad del sistema VEGA para la aceleración de, se necesita un gran esfuerzo en términos de diseño e implementación de las geometrías de los experimentos, de la fabricación y la optimización de blancos, y de los sistemas de diagnóstico para lograr haces de iones que sean útiles para las aplicaciones. Esto se discutirá en la siguiente sección.

## 4. CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

---

### 4.2 Perspectivas

A día de hoy, el comportamiento de una lámina estándar de pocas -  $\mu$  m de espesor irradiada con pulsos láser de contraste "normal" ( $10^6:1$ ) ha sido ampliamente estudiado y se entiende relativamente bien. La tendencia general es utilizar blancos más finos y mayor contraste de pulso. Se han probado muchas ideas y técnicas, incluyendo el uso de blancos mejorados, la polarización circular, técnicas de mejora de contraste, la aceleración en varias etapas y con varios pulsos, etc.

Llegar a la etapa final de desarrollo del esquema RPA es probablemente el objetivo más importante a largo plazo para el campo de la investigación de aceleración de iones con láser. Esto incluye la confección a medida del pulso de láser y de la diana, evitando o explotando inestabilidades, encontrando las condiciones óptimas, etc. El logro de haces de iones casi monoenergéticos es esencial para algunas de las aplicaciones propuestas de las fuentes de iones generadas con láser, como la terapia de iones.

Se trata de alcanzar y optimizar los mecanismos de aceleración que predicen los espectros monoenergéticos (explosión de Coulomb de blancos de doble capa y clusters, aceleración por presión de radiación, y hole boring), y/o el desarrollo de técnicas de monocromatización para el haz de iones (rotación de fase (51), microlente generada por láser (52), o imanes permanentes y solenoides ((53), (54), (55), (56)). La interacción con blancos gaseosos y líquidos permitiría trabajar a mayores tasas de repetición. Por ello, es necesario identificar y demostrar experimentalmente mecanismos de aceleración eficientes en la interacción de pulsos láser con plasmas subdensos. Un blanco inicialmente sólido también puede convertirse en crítico o incluso subdenso debido a un pre-pulso o la amplificación de la emisión espontánea(ASE) (en blancos de pocas micras de espesor) (57) o por el pedestal de picosegundos/femtosegundos (en blancos de nanómetros de espesor) ((58), (59)), por lo que es necesario además la demostración de los mecanismos de aceleración de iones en el régimen subdenso.

Una vía prometedora es el uso de un chorro pulsado de gas a alta presión como blanco. Un chorro de gas auto-renovable es ideal para aplicaciones donde se requiere una aceleración de iones repetitiva. Además, es menos exigente en términos de energía láser y contraste de pulso, y ofrece una serie de ventajas adicionales como la densidad ajustable, la composición libre de contaminantes, y el funcionamiento sin residuos. En cualquier caso, es necesario encontrar el perfil óptimo de densidad para demostrar la

escalabilidad de la aceleración en plasmas con densidades cercanas a la crítica en el caso de láseres de más potencia, y buscar condiciones que lleven a espectros de iones cuasi-monoenergéticos.

Otra posible línea de investigación interesante es combinar varias técnicas de aceleración inducida por láser. Por ejemplo, sería deseable la combinación de un pulso láser limpio (contraste ultra-alto) focalizado a un tamaño submicrométrico en una lámina de doble capa con el concepto de blancos de masa limitada (MLT). Cualquier avance en la tecnología de aceleración de iones con láser depende del desarrollo y optimización de los blancos al menos en igual medida que de la propia tecnología.

La tendencia general es usar blancos más finos que requieren contrastes de pulso mayores y blancos compuestos de varias capas y con geometrías complicadas. Encontrar el diseño óptimo para unos parámetros del láser determinado es una tarea difícil que requiere modelos analíticos, gran cantidad de simulaciones (60) y experimentos. Sin todo ese trabajo de optimización no se podrá explotar totalmente el potencial de estos blancos de última generación.

Un camino para la optimización y el control de la aceleración de iones con láser es la adaptación activa de los pulsos láser (optimización de su perfil temporal en diferentes escalas de tiempo, perfil espacial, polarización, etc.) Hace falta mucho trabajo teórico y experimental para explotar al máximo las posibilidades de los láseres disponibles. Otra posibilidad que hasta ahora ha recibido relativamente poca atención en los experimentos es el empleo de esquemas de irradiación multi-pulso. La división del haz y su recombinación (49)) puede aumentar el máximo de energía de protones y la eficiencia de conversión. Además, las partes de baja energía de los espectros de protones en la dirección perpendicular al blanco pueden ser suprimidas con los retardos adecuados. La aceleración de protones en dos etapas también permite controlar espectralmente el haz de protones (61). La parte central del haz de protones acelerados en el primer blanco y estirada en el tiempo por la dispersión del tiempo de vuelo se puede modificar con los campos transitorios en un segundo blanco. Así, una parte del espectro, controlable con el retardo óptico entre los dos pulsos láser, puede ser suprimida; parte de los protones de una región espectral particular pueden acelerarse más, mientras que los otros se frenan.

Un mayor desarrollo de estas técnicas de varios pulsos y/o de varias etapas puede permitir la aceleración de protones e iones con ancho de banda de energía relativa-

#### 4. CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

---

mente pequeño y una divergencia de haz estrecha hasta altas energías, sin necesidad de aumentar la energía total del láser. Del mismo modo, mecanismos como el propuesto de aceleración de choque sin colisiones propuesta con un láser de pulso doble con polarización mixta son prometedores para la exploración futura.

La medida de las propiedades del haz de iones en el rango de energía de 100 MeV/nucleón es un problema potencial debido a la menor desviación por los campos del detector y a una señal de fondo intensa causada por los electrones, rayos X, neutrones y pulsos electromagnéticos, generados de forma simultánea. El rango de energía de los detectores utilizados actualmente con fuentes láser debería extenderse (62), o los detectores utilizados en aceleradores convencionales deben modificarse de manera apropiada. Además, los detectores idealmente deberían ofrecer capacidad 'on-line' con el fin de hacer frente a la creciente tasa de repetición disponible en los láseres de alta potencia actuales.

Por ahora, las fuentes de iones generados con láser tienen algunas limitaciones que impiden su uso en varias aplicaciones prometedoras como la terapia de hadrones. Estas cuestiones deben abordarse a fin de que esta técnica llegue a ser comparable o mejor que la convencional. A pesar de todo, los resultados obtenidos en experimentos y simulaciones muestran que hay varios esquemas de aceleración prometedores que pueden conducir a la generación de haces de iones de alta calidad.

# Bibliografía

- [1] ALBERT EINSTEIN. **The Quantum Theory of Radiation.** *Physikalische Zeitschrift*, **18**(121):63–77, March 1917. 1
- [2] A L SCHAWLOW AND C H TOWNES. **Infrared and Optical Masers.** *Phys. Rev.*, **112**:1940–1949, 1958. 1
- [3] T H MAIMAN. **Stimulated Optical Radiation in Ruby.** *Nature*, **187**:494, August 1960. 1
- [4] F J MCCLUNG AND R W HELLWARTH. **Giant Optical Pulses from Ruby.** *Applied Optics*, **1**(101):103–105, September 1962. 1
- [5] L E HARGROVE, R L FORK, AND M A POLLACK. **Locking of he-ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation.** Technical report, July 1964. 1
- [6] DONNA STRICKLAND AND GERARD MOUROU. **Compression of amplified chirped optical pulses.** *Optics Communications*, **55**(6):447–449, 1985. 1
- [7] ROLF WIDERÖE. **Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen.** *Archiv für Elektrotechnik*, **21**(4):387–406, August 1928. 2
- [8] ERNEST O LAWRENCE AND M STANLEY LIVINGSTON. **The production of high speed light ions without the use of high voltages.** *Phys. Rev.*, **40**:19–35, 1932. 2
- [9] V I VEKSLER. **The principle of coherent acceleration of charged particles.** *The Soviet Journal of Atomic Energy*, 1957. 2
- [10] T TAJIMA AND J M DAWSON. **Laser electron accelerator.** *Physical Review Letters*, **43**(4):267, 1979. 2
- [11] VICTOR MALKA, JÉRÔME FAURE, YANN A GAUDUEL, ERIK LEFEBVRE, ANTOINE ROUSSE, AND KIM TA PHUOC. **Principles and applications of compact laser–plasma accelerators.** *Nature Physics*, **4**(6):447–453, 2008. 2
- [12] HIROYUKI DAIDO, MAMIKO NISHIUCHI, AND ALEXANDER S PIROZHKOV. **Review of laser-driven ion sources and their applications.** *Reports on Progress in Physics*, **75**(5):056401, April 2012. 2
- [13] R A SNAVELY, M H KEY, S P HATCHETT, T E COWAN, M ROTH, T W PHILLIPS, M A STOYER, E A HENRY, T C SANGSTER, AND M S SINGH. **Intense high-energy proton beams from petawatt-laser irradiation of solids.** *Physical Review Letters*, **85**(14):2945, 2000. 3
- [14] S A GAILLARD, T KLUGE, K A FLIPPO, M BUSSMANN, B GALL, T LOCKARD, M GEISSEL, D T OFFERMANN, M SCHOLLMEIER, Y SENTOKU, AND T E COWAN. **Increased laser-accelerated proton energies via direct laser-light-pressure acceleration of electrons in microcone targets.** *Physics of Plasmas*, **18**(5):056710, 2011. 3, 15
- [15] A MACKINNON, Y SENTOKU, P PATEL, D PRICE, S HATCHETT, M KEY, D ANDERSON, R SNAVELY, AND R FREEMAN. **Enhancement of Proton Acceleration by Hot-Electron Recirculation in Thin Foils Irradiated by Ultraintense Laser Pulses.** *Physical Review Letters*, **88**(21):215006, May 2002. 3
- [16] P MCKENNA, K W D LEDINGHAM, T MCCANNY, R P SINGHAL, I SPENCER, E L CLARK, F N BEG, K KRUSHELNICK, M S WEI, J GALY, J MAGILL, R J CLARKE, K L LANCASTER, P A NORREYS, K SPOHR, AND R CHAPMAN. **Effect of target heating on ion-induced reactions in high-intensity laser–plasma interactions.** *Applied Physics Letters*, **83**(14):2763, 2003. 3
- [17] M BORGESI, J FUCHS, S V BULANOV, A J MACKINNON, P K PATEL, AND M ROTH. **Fast ion generation by high-intensity laser irradiation of solid targets and applications.** *Fusion Science and Technology*, **49**(3):412–439, 2006. 3
- [18] L YIN, B J ALBRIGHT, K J BOWERS, D JUNG, J C FERNÁNDEZ, AND B M HEGELICH. **Three-Dimensional Dynamics of Breakout Afterburner Ion Acceleration Using High-Contrast Short-Pulse Laser and Nanoscale Targets.** *Physical Review Letters*, **107**(4):045003, July 2011. 3
- [19] BENGT ELIASSON, CHUAN S LIU, XI SHAO, ROALD Z SAGDEEV, AND PADMA K SHUKLA. **Laser Radiation Pressure Acceleration of Monoenergetic Protons in an Ultra-Thin Foil.** **1188**:35, 2009. 3
- [20] A HENIG, D KIEFER, K MARKEY, D GAUTIER, K FLIPPO, S LETZRING, R JOHNSON, T SHIMADA, L YIN, B ALBRIGHT, K BOWERS, J FERNÁNDEZ, S RYKOVANOV, H C WU, M ZEPF, D JUNG, V LIECHTENSTEIN, J SCHREIBER, D HABS, AND B HEGELICH. **Enhanced Laser-Driven Ion Acceleration in the Relativistic Transparency Regime.** *Physical Review Letters*, **103**(4):045002, July 2009. 3
- [21] QINGCAO LIU, MENG LIU, TONGPU YU, PENGJI DING, ZUOYE LIU, SHAOHUA SUN, XIAOLIANG LIU, XING LU, ZEQUIN GUO, AND BITAO HU. **Effect of target composition on proton acceleration in ultraintense laser-thin foil interaction.** *Physics of Plasmas*, **19**(9):093108, 2012. 3
- [22] ROBERT R WILSON. **Radiological use of fast protons.** *Radiology*, **47**:487–491, 1946. 4
- [23] KEN LEDINGHAM, PAUL BOLTON, NAOYA SHIKAZONO, AND C M MA. **Towards Laser Driven Hadron Cancer Radiotherapy: A Review of Progress.** *Applied Sciences*, **4**(3):402–443, September 2014. 4, 5
- [24] LINDSEY A TORRE, FREDDIE BRAY, REBECCA L SIEGEL, JACQUES FERLAY, JOANNIE LORTET-TIEULENT, AND AHMEDIN JEMAL. **Global cancer statistics, 2012.** *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, **65**(2):87–108, February 2015. 4

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [25] A BRAHME, R LEWENSOHN, U RINGBORG, U AMALDI, F GERARDI, AND S ROSSI. **Design of a centre for biologically optimised light ion therapy in Stockholm.** *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B*, **184**:1–20, December 2001. 5
- [26] T HABERER. **Accelerators for Americas Future.** *Symmetry Magazine*, pages 1–8, August 2010. 6
- [27] S V BULANOV AND V S KHOROSHKOV. **Feasibility of Using Laser Ion Accelerators in Proton Therapy.** *Plasma Physics Reports*, **28**:1–5, May 2002. 6
- [28] S V BULANOV, T ZH ESIRKEPOV, F F KAMENETS, Y KATO, A V KUZNETSOV, K NISHIHARA, F PEGORARO, T TAJIMA, AND V S KHOROSHKOV. **Generation of High-Quality Charged Particle Beams during the Acceleration of Ions by High-Power Laser Radiation.** *Plasma Physics Reports*, **28**:1–18, December 2002. 6
- [29] STEPAN S BULANOV, ANDREI BRANTOV, VALERY YU BYCHENKOV, VLADIMIR CHYVKOV, GALINA KALINCHENKO, TAKESHI MATSUOKA, PASCAL ROUSSEAU, STEPHEN REED, VICTOR YANOVSKY, AND KARL KRUSHELNICK. **Accelerating protons to therapeutic energies with ultraintense, ultraclean, and ultrashort laser pulses.** *Medical physics*, **35**:1770, 2008. 6
- [30] E FOURKAL, B SHAHINE, M DING, J S LI, T TAJIMA, AND C M MA. **Particle in cell simulation of laser-accelerated proton beams for radiation therapy.** *Medical physics*, **29**(12):2788, 2002. 6
- [31] E FOURKAL, J S LI, M DING, T TAJIMA, AND C M MA. **Particle selection for laser-accelerated proton therapy feasibility study.** *Medical physics*, **30**(7):1660, 2003. 6
- [32] WEI LUO, EUGENE FOURKAL, JINSHENG LI, AND CHANG-MING MA. **Particle selection and beam collimation system for laser-accelerated proton beam therapy.** *Medical physics*, **32**(3):794, 2005. 6
- [33] E FOURKAL, J S LI, W XIONG, A NAHUM, AND C M MA. *Intensity modulated radiation therapy using laser-accelerated protons: a Monte Carlo dosimetric study.* Institute of Physics Publishing, 2003. 6
- [34] VICTOR MALKA, SVEN FRITZLER, ERIK LEFEBVRE, EMMANUEL D'HUMIÈRES, RÉGIS FERRAND, GEORGES GRILLON, CLAUDE ALBARET, SAMUEL MEYRONEINC, JEAN-PAUL CHAMBARET, ANDRÉ ANTONETTI, AND DANIELÉ HULIN. **Practicability of protontherapy using compact laser systems.** *Medical physics*, **31**(6):1587, 2004. 6
- [35] MASAO MURAKAMI, YOSHIO HISHIKAWA, SATOSHI MIYAJIMA, YOSHIKO OKAZAKI, KENNETH L SUTHERLAND, MITSUYUKI ABE, SERGEI V BULANOV, HIROYUKI DAIDO, TIMUR ZH ESIRKEPOV, JAMES KOGA, MITSURU YAMAGIWA, AND TOSHIKI TAJIMA. **Radiotherapy using a laser proton accelerator.** *arXiv.org*, April 2008. 6
- [36] S C WILKS, A B LANGDON, T E COWAN, M ROTH, M SINGH, S HATCHETT, M H KEY, D PENNINGTON, A MACKINNON, AND R A SNAVELY. **Energetic proton generation in ultraintense laser–solid interactions.** *Physics of Plasmas*, **8**(2):542, 2001. 9
- [37] L ROBSON, P T SIMPSON, R J CLARKE, K W D LEDINGHAM, F LINDAU, O LUNDH, T MCCANNY, P MORA, D NEELY, C G WAHLSTRÖM, M ZEPF, AND P MCKENNA. **Scaling of proton acceleration driven by petawatt-laser–plasma interactions.** *Nature Physics*, **3**(1):58–62, December 2006. 9, 15
- [38] ANDREA MACCHI AND CARLO BENEDETTI. **ARTICLE IN PRESS.** *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, **A**, **620**(1):41–45, August 2010. 9
- [39] T ESIRKEPOV, M BORGHESI, S BULANOV, G MOUROU, AND T TAJIMA. **Highly Efficient Relativistic-Ion Generation in the Laser-Piston Regime.** *Physical Review Letters*, **92**(17):175003, April 2004. 10
- [40] A P L ROBINSON, M ZEPF, S KAR, R G EVANS, AND C BELLEI. **Radiation Pressure Acceleration of Thin Foils with Circularly Polarized Laser Pulses.** *New Journal of Physics*, August 2008. 10
- [41] CHARLOTTE A J PALMER, N P DOVER, I POGORELSKY, M BABZIEN, G I DUDNIKOVA, M ISPIRIYAN, M N POLYANSKIY, J SCHREIBER, P SHKOLNIKOV, V YAKIMENKO, AND Z NAJMUDIN. **Monoenergetic Proton Beams Accelerated by a Radiation Pressure Driven Shock.** *Physical Review Letters*, **106**(1):014801, January 2011. 10
- [42] L YIN, B J ALBRIGHT, D JUNG, R C SHAH, S PALANIYAPPAN, K J BOWERS, A HENIG, J C FERNÁNDEZ, AND B M HEGELICH. **Break-out afterburner ion acceleration in the longer laser pulse length regime.** *Physics of Plasmas*, **18**(6):063103, 2011. 10
- [43] L YIN, B J ALBRIGHT, B M HEGELICH, AND J C FERNÁNDEZ. **GeV laser ion acceleration from ultrathin targets: The laser break-out afterburner.** *Laser and Particle Beams*, **24**(2):291, 2006. 10
- [44] M KALUZA, J SCHREIBER, M I K SANTALA, G D TSAKIRIS, K EIDMANN, J MEYER-TER VEHN, AND K J WITTE. **Influence of the Laser Prepulse on Proton Acceleration in Thin-Foil Experiments.** *Physical Review Letters*, **93**(4):045003, July 2004. 15
- [45] A YOGO, H DAIDO, S V BULANOV, K NEMOTO, Y OISHI, T NAYUKI, T FUJII, K OGURA, S ORIMO, A SAGISAKA, J L MA, T ZH ESIRKEPOV, M MORI, M NISHIUCHI, A S PIROZHKOV, S NAKAMURA, A NODA, H NAGATOMO, T KIMURA, AND T TAJIMA. **Laser ion acceleration via control of the near-critical density target.** *Physical Review E*, **77**(1):016401, January 2008. 15
- [46] A HENIG, S STEINKE, M SCHNÜRER, T SOKOLLIK, R HÖRLEIN, D KIEFER, D JUNG, J SCHREIBER, B M HEGELICH, X Q YAN, J MEYER-TER VEHN, T TAJIMA, P V NICKLES, W SANDNER, AND D HABS. **Radiation-Pressure Acceleration of Ion Beams Driven by Circularly Polarized Laser Pulses.** *Physical Review Letters*, **103**(24):245003, December 2009. 15
- [47] Y OISHI, T NAYUKI, T FUJII, Y TAKIZAWA, X WANG, T YAMAZAKI, K NEMOTO, T KAYOJI, T SEKIYA, K HORIOKA, Y OKANO, Y HIRONAKA, K G NAKAMURA, K KONDO, AND A A ANDREEV. **Dependence on laser intensity and pulse duration in proton acceleration by irradiation of ultrashort laser pulses on a Cu foil target.** *Physics of Plasmas*, **12**(7):073102, 2005. 15

- [48] A ROBINSON, M SHERLOCK, AND P NORREYS. **Artificial Collimation of Fast-Electron Beams with Two Laser Pulses.** *Physical Review Letters*, **100**(2):025002, January 2008. 15, 17
- [49] K MARKEY, P MCKENNA, C M BRENNER, D C CARROLL, M M GÜNTHER, K HARRES, S KAR, K LANCASTER, F NÜRNBERG, M N QUINN, A P L ROBINSON, M ROTH, M ZEPF, AND D NEELY. **Spectral Enhancement in the Double Pulse Regime of Laser Proton Acceleration.** *Physical Review Letters*, **105**(19):195008, November 2010. 15, 17, 25
- [50] H HABARA, K LANCASTER, S KARSCH, C MURPHY, P NORREYS, R EVANS, M BORGHESI, L ROMAGNANI, M ZEPF, T NORIMATSU, Y TOYAMA, R KODAMA, J KING, R SNAVELY, K AKLI, B ZHANG, R FREEMAN, S HATCHETT, A MACKINNON, P PATEL, M KEY, C STOECKL, R STEPHENS, R FONSECA, AND L SILVA. **Ion acceleration from the shock front induced by hole boring in ultraintense laser-plasma interactions.** *Physical Review E*, **70**(4):046414, October 2004. 15
- [51] SHU NAKAMURA, MASAHIRO IKEGAMI, YOSHIHISA IWASHITA, TOSHIYUKI SHIRAI, HIROMU TONGU, HIKARU SOUDA, HIROYUKI DAIDO, MICHIAKI MORI, MASATAKA KADO, AKITO SAGISAKA, KOICHI OGURA, MAMIKO NISHIUCHI, SATOSHI ORIMO, YUKIO HAYASHI, AKIFUMI YOGO, ALEXANDER S PIROZHKO, SERGEI V BULANOV, TIMUR ESIRKEPOV, AKIRA NAGASHIMA, TOYOAKI KIMURA, TOSHIKI TAJIMA, TAKESHI TAKEUCHI, ATSUSHI FUKUMI, ZHONG LI, AND AKIRA NODA. **High-Quality Laser-Produced Proton Beam Realized by the Application of a Synchronous RF Electric Field.** *Japanese Journal of Applied Physics*, **46**(No. 29):L717–L720, July 2007. 24
- [52] T TONCIAN. **Ultrafast Laser-Driven Microlens to Focus and Energy-Select Mega-Electron Volt Protons.** *Science*, **312**(5772):410–413, April 2006. 24
- [53] M SCHOLLMEIER, S BECKER, M GEISSEL, K FLIPPO, A BLAŽEVIĆ, S GAILLARD, D GAUTIER, F GRÜNER, K HARRES, M KIMMEL, F NÜRNBERG, P RAMBO, U SCHRAMM, J SCHREIBER, J SCHÜTRUMPF, J SCHWARZ, N TAHIR, B ATHERTON, D HABS, B HEGELICH, AND M ROTH. **Controlled Transport and Focusing of Laser-Accelerated Protons with Miniature Magnetic Devices.** *Physical Review Letters*, **101**(5):055004, August 2008. 24
- [54] S TER-AVETISYAN, M SCHNÜRER, R POLSTER, P V NICKLES, AND W SANDNER. **First demonstration of collimation and monochromatisation of a laser accelerated proton burst.** *Laser and Particle Beams*, **26**(04):637, November 2008. 24
- [55] M NISHIUCHI, I DAITO, M IKEGAMI, H DAIDO, M MORI, S ORIMO, K OGURA, A SAGISAKA, A YOGO, A S PIROZHKO, H SUGIYAMA, H KIRIYAMA, H OKADA, S KANAZAWA, S KONDO, T SHIMOMURA, M TANOUÉ, Y NAKAI, H SASAO, D WAKAI, H SAKAKI, P BOLTON, I W CHOI, J H SUNG, J LEE, Y OISHI, T FUJII, K NEMOTO, H SOUDA, A NODA, Y ISEKI, AND T YOSHIYUKI. **Focusing and spectral enhancement of a repetition-rated, laser-driven, divergent multi-MeV proton beam using permanent quadrupole magnets.** *Applied Physics Letters*, **94**(6):061107, 2009. 24
- [56] M NISHIUCHI, H SAKAKI, T HORI, P R BOLTON, K OGURA, A SAGISAKA, A YOGO, M MORI, S ORIMO, A S PIROZHKO, I DAITO, H KIRIYAMA, H OKADA, S KANAZAWA, S KONDO, T SHIMOMURA, M TANOUÉ, Y NAKAI, H SASAO, D WAKAI, H DAIDO, K KONDO, H SOUDA, H TONGU, A NODA, Y ISEKI, T NAGAFUCHI, K MAEDA, K HANAWA, T YOSHIYUKI, AND T SHIRAI. **Measured and simulated transport of 1.9 MeV laser-accelerated proton bunches through an integrated test beam line at 1 Hz.** *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, **13**(7):071304, July 2010. 24
- [57] K MATSUKADO, T ESIRKEPOV, K KINOSHITA, H DAIDO, T UTSUMI, Z LI, A FUKUMI, Y HAYASHI, S ORIMO, M NISHIUCHI, S V BULANOV, T TAJIMA, A NODA, Y IWASHITA, T SHIRAI, T TAKEUCHI, S NAKAMURA, A YAMAZAKI, M IKEGAMI, T MIHARA, A MORITA, M UESAKA, K YOSHI, T WATANABE, T HOSOKAI, A ZHIDKOV, A OGATA, Y WADA, AND T KUBOTA. **Energetic Protons from a Few-Micron Metallic Foil Evaporated by an Intense Laser Pulse.** *Physical Review Letters*, **91**(21):215001, November 2003. 24
- [58] P ANTICI, J FUCHS, E D'HUMIÈRES, E LEFEBVRE, M BORGHESI, E BRAMBRINK, C A CECCHETTI, S GAILLARD, L ROMAGNANI, Y SENTOKU, T TONCIAN, O WILLI, P AUDEBERT, AND H PÉPIN. **Energetic protons generated by ultra-high contrast laser pulses interacting with ultrathin targets.** *Physics of Plasmas*, **14**(3):030701, 2007. 24
- [59] P ANTICI, J FUCHS, E D'HUMIÈRES, J ROBICHE, E BRAMBRINK, S ATZENI, A SCHIAVI, Y SENTOKU, P AUDEBERT, AND H PÉPIN. **Laser acceleration of high-energy protons in variable density plasmas.** *New Journal of Physics*, **11**(2):023038, February 2009. 24
- [60] HIDEO NAGATOMO, TOMOYUKI JOHZAKI, KUNIOKI MIMA, AND HITOSHI SAKAGAMI. **Multi-scale Simulations for Laser Plasma Physics.** pages 243–250. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, October 2009. 25
- [61] S M PFOTENHAUER, O JÄCKEL, J POLZ, S STEINKE, H-P SCHLENVOIGT, J HEYMANN, A P L ROBINSON, AND M C KALUZA. **A cascaded laser acceleration scheme for the generation of spectrally controlled proton beams.** *New Journal of Physics*, **12**(10):103009, October 2010. 25
- [62] D JUNG, R HÖRLEIN, D KIEFER, S LETZRING, D C GAUTIER, U SCHRAMM, C HÜBSCH, R ÖHM, B J ALBRIGHT, J C FERNÁNDEZ, D HABS, AND B M HEGELICH. **Development of a high resolution and high dispersion Thomson parabola.** *Review of Scientific Instruments*, **82**(1):013306, 2011. 26