

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Det finns mer än 30 000 partikelacceleratorer runt om i världen. De används bläck annat för forskning på materiens minsta beståndsdelar, men har också andra viktiga användningsområden såsom att undersöka materialegenskaper, producera högupplösta bilder av biologiska och kemiska prov samt att diagnosticera och behandla cancer och andra sjukdomar.

Höga partikelenergi er behövs för att föra forskningen framåt. Idag erhålls högst energi hos elektroner i radiofrekvensacceleratorer. Dessa acceleratorer är uppbyggda av metallkammare över vilka man lägger ett elektriskt fält som styr och accelererar elektronerna. Dock begränsas radiofrekvensacceleratorer av att metallväggarna inte tål hur starka elektriska fält som helst. För att nå högre energier, som närmar sig ljushastigheten, behöver man därför bygga större acceleratorer som accelererar partiklarna över längre sträckor.

Laserdrivna acceleratorer har inte samma begränsningar. Accelerationen sker i ett plasma som tål elektriska fält tusen gånger starkare än de som används i konventionella acceleratorer, vilket innebär att partiklarna kan nå samma energier på en tusendel av sträckan. På högeffektsfaciliteten vid Laser Center i Lund utförs experiment på laser wakefield-acceleration (LWFA). Elektronerna når energier på 300 miljoner elektronvolt, motsvarande 99.999861% av ljushastigheten, på några få millimeter. På MAX IV i Lund accelereras elektroner till energier som är tio gånger högre, 3 miljarder elektronvolt, men dessa måste accelereras över 300 meter.

Hur kan då en laserpuls användas för att accelerera elektroner? Ett plasma kan liknas vid en flytande "soppa" av negativt laddade elektroner och positivt laddade joner. När en högintensiv laserpuls fokuseras i plasmat utsätts laddningarna för en kraft, den ponderomotiva kraften. Eftersom elektronerna har mycket mindre massa än jonerna knuffas de undan av kraften och lämnar kvar ett område med enbart joner. Detta liknar hur det bildas en sänka i kölvattnet efter en båt som rör sig över en stilla sjö. För en roddbåt är effekten inte så stor, men den starka kraften av en motorbåt

lämnar en djup sänka efter sig. På liknande sätt kommer en högin-tensiv laserpuls att trycka under elektroner med stor kraft, vilket gör att ett område av positivt laddade joner följer efter laserpulsens så länge den är tillräckligt stark för att driva bort elektronerna.

Omfördelningen av elektroner i plasmat ger upphov till en vågrörelse, så att olika områden i plasmat är omväxlande positivt eller negativt laddade. Detta bildar mycket starka elektriska fält. Om en elektron fastnar i det positivt laddade området bakom laserpulsens, som en surfare bakom en motorbåt, kommer den att accelereras och följa efter laserpulsens.

Samtidigt som elektronerna rör sig i laserns riktning med en hastighet nära ljushastigheten kommer de att röra sig i sicksack från sida till sida. En accelererande laddning ger alltid ifrån sig strålning. Elektronens svängningar producerar röntgenstrålning som kallas betatron-röntgenstrålning. Denna strålning produceras på synkrotron-anläggningar när elektroner tvingas att vrida sig genom en bana med omväxlande positiva och negativa magnetiska fält. Detta moment är inte nödvändigt när elektroner accelereras med hjälp av en plasmavåg - LWFA producerar både en elektronstråle och röntgenstrålning på samma gång.

Laserpulserna som skapas i högeffektsfaciliteten vid Lunds lasercentrum har elektromagnetiska fält som är tiotusen gånger starkare än de fält som binder elektronen till kärnan i en väteatom. När laserpulsens fokuseras i vätgas omvandlas gasen till ett plasma som kan användas för LWFA.

Under experimenten som beskrivs i denna avhandling justerades laserpulsens och gasens för att få bättre kontroll över elektronstrålen och röntgenstrålningen, och för att bättre kunna undersöka mekanismerna som styr processen. Dessutom utfördes flera experiment för att undersöka eventuella tillämpningar av röntgenstrålningen - en röntgentomografi av en liten insekt, en avbildning av mikrometerstrukturen hos en aluminium-kisellegering, samt ett test av en röntgenspektrometer utformad för att mäta egenskaperna hos ett material när det övergår till ett plasma.

Även om elektronenergierna som erhålls vid laser-plasma nu är jämförbara med energier som kan erhållas med konventionella accelerators är LWFA ännu inte en fullt utvecklad teknik. Det krävs ytterligare landvinningar för att kunna åstadkomma stabilitet, kvalitet och praktisk styrning av laser wakefield-acceleration. Nya milstolpar nås dock hela tiden, och LWFA är på god väg att bli ett etablerat forskningsområde och en potentiell kandidat till nästa generations partikelaccelerator.

POPULAR SCIENTIFIC SUMMARY

There are more than 30,000 particle accelerators around the world. They are used to investigate the composition of matter on the most fundamental level, but they also play an important role in the characterization of materials, in the imaging of biological and chemical samples, and in the diagnosis and treatment of cancer and other diseases.

Higher particle energies are required to explore new materials and in novel chemical and medical applications. So far, the highest particle energies have been achieved by accelerating electrons in radio-frequency cavities. These are metallic chambers in which an electromagnetic field is applied to steer and accelerate electrons. However, the metallic walls of the radio-frequency cavities can be destroyed if the applied electromagnetic field is too high, limiting the accelerating force. As a result, the closer the particle velocity is to the speed of light, the longer the acceleration cavity must be.

This limit can be overcome using laser-driven particle acceleration. The plasma produced can support accelerating fields over one thousand times stronger than those in conventional particle accelerators, allowing the same energy to be transferred to the particles in a distance less than one thousand shorter. For example, in the experiments on laser-wakefield acceleration (LWFA) performed in the Lund high-power laser facility (Sweden), electrons are accelerated to energies of 300 million electronvolts, which corresponds to an electron travelling at 99.999861% of the speed of light, in a distance of a few millimetres. The electrons accelerated at the MAX-IV synchrotron facility, also in Lund, can reach energies ten times higher, 3 billion electronvolts, but they have to be accelerated over a distance of 300 metres.

The question is, how a laser pulse can be used to accelerate electrons. A plasma can be regarded of a fluid consisting of electrons and ions, or a “soup” of charges. When a high-intensity laser pulse is focused in a plasma, the variations in laser intensity generate a force on the charges called the ponderomotive force. The electrons, which are much lighter than the ions, are expelled by the force of the laser leaving a track behind the pulse called the wake, just like an aeroplane travelling through a cloud, or a boat on a lake.

A rowing boat leaves a weak wake, while the stronger force of a motorboat creates a deeper wave. In a similar way, a high-intensity laser pulse will expel the electrons along its direction of propagation leaving an electron-free region behind. The plasma wave propagates with the laser as long as the pulse is strong enough to drive the wake. The modulation of the electron distribution in the plasma, where the ions remain stationary, creates alternating negatively and positively charged regions, which produces very high accelerating fields. If an electron is trapped in the plasma wake, like a surfer in the wake of a motorboat, it will be accelerated and follow the laser pulse.

Furthermore, while the electrons follow the laser pulse at almost the speed of light, they also zigzag from side to side. An accelerated charge always emits radiation, so the electron oscillations produce X-ray pulses, known as betatron X-rays. This kind of radiation is produced at synchrotron facilities by forcing the electrons to “wobble” when propagating through a series of magnetic dipoles where positive and negative magnetic fields are alternated. However, this is not necessary for electrons accelerated in the plasma wave. LWFA generates an electron beam and an X-ray pulse simultaneously.

At the Lund high-power laser facility, the electromagnetic field of the laser pulse can be ten thousand times higher than the Coulomb field that binds an electron to the hydrogen atom. When the laser pulse is focused in hydrogen gas, the gas becomes a plasma and LWFA takes place.

During the work described in this thesis, the laser pulse and the gas were manipulated in order to obtain better control of the electron beam and the X-ray radiation, and to provide a better understanding of the physical mechanisms involved. Moreover, several experiments were carried out to investigate the possibility of applying the X-ray pulses, for X-ray tomography of a small insect, imaging of an aluminium-silicon alloy to resolve micrometre structures, and test an X-ray spectrometer designed to measure the properties of matter during the transition to a plasma.

Although the electron energies obtained in the laser-plasma interaction are now comparable to the energies achieved with conventional accelerators, LWFA is not yet a mature technology. Improvements are required to obtain better stability, quality and more practical operation of laser wakefield accelerators. However, new milestones are being reached, and LWFA is becoming established on the roadmap for particle accelerator research and development.

RESUMEN DIVULGATIVO

Existen más de 30000 aceleradores de partículas en el mundo, que permiten investigar la constitución de la materia en el nivel más fundamental, pero que también juegan un importante papel en la caracterización de materiales, en la imagen de muestras biológicas y químicas, y en el diagnóstico y tratamiento de cáncer y otras enfermedades.

Partículas de energías cada vez más elevadas son necesarias para explorar nuevos materiales o nuevas aplicaciones en química o medicina. Hasta ahora, las energías de partículas más altas han sido alcanzadas mediante la aceleración de electrones en cavidades de radiofrecuencia. Estas consisten en cámaras metálicas en donde se aplica un campo electromagnético que empuja a los electrones y los acelera. Sin embargo las paredes metálicas de la cavidad de radiofrecuencia pueden dañarse o destruirse si el campo electromagnético aplicado es demasiado alto, lo que limita la fuerza de aceleración que afecta al electrón. Debido a ello, cuando más cercana a la velocidad de la luz sea la velocidad de la partícula, más larga se requiere que sea la cavidad aceleradora.

Los aceleradores de partículas inducidos por láser superan dicho límite. El plasma puede soportar campos de aceleración más de mil veces más altos que en un acelerador de partículas convencional, transfiriendo la misma energía a las partículas en una distancia varios miles de veces más corta. Por ejemplo, en los experimentos de aceleración en la estela láser (LWFA) que se llevan a cabo en Lund (Suecia), los electrones son acelerados a energías de 300 millones de electrónvoltios, lo que equivale al electrón viajando a 99.999861% la velocidad de la luz, en unos pocos milímetros. Los electrones que se aceleran en el sincrotrón MAX-IV, también en Lund, pueden alcanzar diez veces más energía, 3000 millones de electrónvoltios, pero necesitan acelerarse a lo largo de 300 metros.

Pero, ¿cómo puede un pulso láser acelerar electrones? El plasma no es más que un fluido de electrones e iones, como una “sopa” de cargas eléctricas. Cuando un pulso láser ultra intenso se focaliza en un plasma, las variaciones en la intensidad del láser generan una fuerza que empuja a las cargas, llamada fuerza ponderomotriz. Los electrones, que son mucho más ligeros que los iones, salen despedidos

debido a la fuerza del pulso láser, dejando tras de sí una estela, tal y como un avión al cruzar una nube, o un barco en la superficie de un lago.

Un barco de remo produce una estela muy débil, pero la fuerza de un barco a motor contra el agua crea una ola profunda. Del mismo modo, un pulso láser ultra intenso expulsa los electrones a medida que se propaga en el plasma, dejando tras de sí una región libre de electrones. La onda de plasma se propaga con el láser siempre y cuando el pulso sea lo suficientemente intenso como seguir produciendo la estela. En esta modulación del plasma, las cargas eléctricas crean campos de aceleración extremadamente altos. Si un electrón es atrapado dentro de la estela en el plasma, como un surfista en la estela de un barco a motor, será acelerado y seguirá al pulso láser.

Pero esto no es todo. Mientras los electrones siguen al pulso láser con una velocidad cercana a la velocidad de la luz, también zigzaguean de un lado a otro. La aceleración de una carga eléctrica siempre emite radiación, de forma que las oscilaciones de los electrones producen un pulso de rayos X, conocido como rayos X de betatrón. En sincrotrones, este tipo de radiación se produce forzando a los electrones a serpentear mientras se propagan a través de un conjunto de dipolos magnéticos, en los que los polos norte y sur se alternan. Pero esto no es necesario cuando los electrones se aceleran en la onda de plasma. LWFA genera, simultáneamente, un pulso de electrones y un pulso de rayos X.

En la universidad de Lund, el campo eléctrico de un pulso láser puede ser más de diez mil veces mayor que el campo eléctrico de Coulomb que liga a un electrón al átomo de hidrógeno. Por tanto, cuando el láser se enfoca en hidrógeno gaseoso, el gas se convierte en plasma y se produce LWFA.

Durante el trabajo presentado en esta tesis, el pulso láser y el gas se manipulan para obtener un mejor control del haz de electrones y de la radiación de rayos X, y para comprender mejor los fenómenos físicos que conllevan. Además, se han llevado a cabo varios experimentos para demostrar posibles aplicaciones de los pulsos de rayos X, incluyendo tomografía de rayos X de un pequeño insecto, imagen de una aleación de aluminio y silicio con resolución micrométrica, y estudio de un espectrómetro de rayos X capaz de medir propiedades de la materia en su transición a plasma.

Aunque las energías de los electrones que se obtienen en interacciones láser-plasma son cada vez más comparables a las disponibles en aceleradores convencionales, LWFA no puede considerarse todavía una tecnología madura. Los investigadores deben aún mejorar cuestiones relacionadas con una mejor estabilidad y calidad del haz de electrones, y un desempeño de la técnica de aceleración más práctico. Sin embargo, nuevos logros se alcanzan cada año, lo que sitúa a LWFA en la hoja de ruta de la investigación y el desarrollo de aceleradores de partículas.