

Nur Khasanah, M. Sc.



Percepatan Proton

DARI INTERAKSI PULSA LASER
INTENSITAS TINGGI

DENGAN GRAFIN TERSUSPENSI

Editor: Lalu Sahrul Hudha, M. Si.

Percepatan Proton

DARI INTERAKSI PULSA LASER
INTENSITAS TINGGI
DENGAN GRAFIN TERSUSPENSI

Buku Referensi yang berjudul "Percepatan Proton dari Interaksi Pulsa Laser Intensitas Tinggi dengan Grafin Tersuspensi" merupakan buku yang mengulas tentang eksperimen laboratorium untuk memproduksi berkas energi proton/ion dari interaksi pulsa laser dengan grafin tersuspensi. Berkas energi proton/ion ini berperan penting dalam sistem diagnostic skala nanometer. Di dalam buku ini juga dijelaskan mengenai sintesis grafin tersuspensi, setup eksperimen, dan beberapa parameter fasilitas laser yang digunakan untuk menghasilkan berkas energi proton/ion. Selain itu, buku ini juga menganalisis hasil detektor proton/ion. Eksperimen yang dilakukan ini memberikan informasi penting tentang parameter-parameter yang diperlukan untuk penelitian selanjutnya.



☎ 0858 5343 1992
✉ eurekaediaaksara@gmail.com
📍 Jl. Banjaran RT.20 RW.10
Bojongsari - Purbalingga 53362

ISBN 978-623-5251-75-2



**PERCEPATAN PROTON DARI INTERAKSI
PULSA LASER INTENSITAS TINGGI
DENGAN GRAFIN TERSUSPENSI**

Nur Khasanah, M. Sc.



eureka
media aksara

PENERBIT CV.EUREKA MEDIA AKSARA

**PERCEPATAN PROTON DARI INTERAKSI PULSA LASER
INTENSITAS TINGGI DENGAN GRAFIN TERSUSPENSI**

Penulis : Nur Khasanah, M.Sc.

Editor : Lalu Sahrul Hudha, M. Si.

Desain Sampul : Eri Setiawan

Tata Letak : Sakti Aditya, S.Pd., Gr.

ISBN : 978-623-5251-75-2

Diterbitkan oleh : **EUREKA MEDIA AKSARA, MARET 2022**
ANGGOTA IKAPI JAWA TENGAH
NO. 225/JTE/2021

Redaksi:

Jalan Banjaran, Desa Banjaran RT 20 RW 10 Kecamatan Bojongsari
Kabupaten Purbalingga Telp. 0858-5343-1992

Surel : eurekamediaaksara@gmail.com

Cetakan Pertama : 2022

All right reserved

Hak Cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun dan dengan cara apapun, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya tanpa seizin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan hanya ke hadirat Allah *Azza wa Jalla*, karena berkat limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga Buku Referensi dengan judul “ *Percepatan Proton dari Interaksi Pulsa Laser Intensitas Tinggi dengan Grafin Tersuspensi*” ini dapat terselesaikan. Selanjutnya shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada junjungan alam Nabi Muhammad *Shallallahu 'Alaihi Wasallam* yang menuntun peneliti kepada jalan yang benar.

Buku Referensi ini terdiri atas 6 bab, yaitu bab Pendahuluan, Percepatan laser-proton, Grafin, Eksperimen dan Sistem Diagnostik, Percepatan Proton dari Laser, serta Penutup. Pada bab pendahuluan dijelaskan tentang laboratorium astrofisika, percepatan proton, dan grafin tersuspensi. Pada bab Percepatan Laser-Proton dijelaskan tentang laser intensitas tinggi, plasma yang dihasilkan laser, RCF sebagai detektor proton, dan SRIM. Pada bab Grafin dijelaskan tentang karakteristik grafin, sintesis grafin tersuspensi, dan karakterisasi grafin tersuspensi. Sedangkan pada bab Eksperimen dan Sistem Diagnostik dijelaskan tentang desain eksperimen dan monitor target, penyangga grafin tersuspensi, dan penyangga detektor. Pada bab Percepatan Proton oleh Laser dijelaskan tentang tembakan laser pada target grafin dan pengamatan grafin tersuspensi. Pada bab penutup terdapat rekomendasi eksperimen untuk percepatan proton dari interaksi laser dan material.

Buku ini mengupas secara detail baik secara teori dan praktik berdasarkan hasil eksperimen dan studi literatur tentang produksi Percepatan Proton dari Interaksi Pulsa Laser Intensitas Tinggi dengan Grafin Tersuspensi.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan buku ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk kesempurnaan isi buku ini. Akhirnya semoga buku ini dapat digunakan sebagai referensi dalam dunia pendidikan.

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| KATA PENGANTAR | iii |
| DAFTAR ISI..... | iv |
| DAFTAR GAMBAR..... | v |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| A. Laboratorium Astrofisika..... | 1 |
| B. Percepatan Proton..... | 4 |
| C. Grafin Tersuspensi..... | 6 |
| BAB 2 PERCEPATAN LASER-PROTON..... | 9 |
| A. Laser Intensitas Tinggi (Fasilitas Laser NCU 100 TW) | 9 |
| B. Plasma yang Dihasilkan Laser..... | 10 |
| C. RCF sebagai Detektor Proton..... | 12 |
| D. SRIM | 14 |
| BAB 3 GRAFIN..... | 18 |
| A. Karakteristik Grafin..... | 18 |
| B. Sintesis Grafin Tersuspensi..... | 19 |
| C. Karakterisasi Grafin Tersuspensi | 21 |
| 1. Karakterisasi dengan <i>Scanning Electron Microscopy</i> | |
| (SEM) | 21 |
| 2. Karakterisasi dengan <i>Force Microscopy</i> (AFM)..... | 24 |
| 3. Karakterisasi dengan Spektroskopi Raman | 25 |
| BAB 4 EKSPERIMEN DAN SISTEM DIAGNOSTIK | 29 |
| A. Desain Eksperimen dan Monitor Target..... | 29 |
| B. Penyangga Grafin Tersuspensi..... | 32 |
| C. Penyangga Detektor | 34 |
| BAB 5 PERCEPATAN PROTON OLEH LASER | 36 |
| A. Tembakan Laser pada Target Grafin | 36 |
| B. Pengamatan Grafin Tersuspensi | 41 |
| BAB 6 PENUTUP | 48 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 50 |
| GLOSARIUM | 59 |
| TENTANG PENULIS | 60 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 1.1 Serangkaian gambar emisi yang diambil dengan framing camera [12] | 2 |
| Gambar 1.2 Tampilan tampak samping dari radiodiagnostik proton yang menunjukkan evolusi struktur medan elektromagnetik[17] | 3 |
| Gambar 1.3 Gambar deflektometri kisi proton dari interaksi target aluminium diambil 100 ps, 500 ps, dan 800 ps setelah sinar pemanas tiba di permukaan target [18] | 4 |
| Gambar 1.4 Energi proton maksimum dari keping target yang sangat tipis yang diukur pada berbagai fasilitas laser fasilitas [26] | 6 |
| Gambar 1.5 Grafin yang tersuspensi dalam substrat yang berlubang | 7 |
| | |
| Gambar 2.1 Skema dari RPA..... | 11 |
| Gambar 2.2 Struktur dasar RCF (tipe HD-810) [44] | 13 |
| Gambar 2.3 RCF dalam tumpukan [44] | 13 |
| Gambar 2.4 Tampilan software SRIM..... | 15 |
| Gambar 2.5 Ion stopping dan tabel jangkauan di Al foil | 16 |
| Gambar 2.6 Ion stopping dan tabel jangkauan di RCF | 17 |
| | |
| Gambar 3.1 Atom karbon dalam lapisan grafin diatur dalam kisi Honeycomb [31] | 19 |
| Gambar 3.2 (a) Tiga tahap proses pemanasan RTCVD, (b) Ilustrasi proses transfer bubbling grafin dari tembaga, dan (c) Fabrikasi grafin tersuspensi ... | 20 |
| Gambar 3.3 (a) Gambar skema grafin tersuspensi pada lubang dan (b) Substrat dari grafin tersuspensi. | 21 |
| Gambar 3.4 Skema dasar dari SEM..... | 22 |

| | |
|--|----|
| Gambar 3.5 (a) Gambar SEM dari SLG dan (b) Gambar SEM dari film grafin 4-L disuspensi pada lubang 500 μm . | 23 |
| Gambar 3.6 Gambar 1. 10 Skema dasar dari AFM | 24 |
| Gambar 3.7 Gambar AFM dan profil penampang di tepi (a) SLG dan (b) Film grafin tersuspensi 4-L | 25 |
| Gambar 3.8 Spektrum Raman dari tepi grafin, menunjukkan fitur Raman utama, puncak D, G dan G0 diambil dengan energi eksitasi laser sebesar 2,41 eV [40] | 27 |
| Gambar 3.9 Spektrum Raman diperoleh sepanjang garis dalam grafin empat lapis yang disuspensi melintasi lubang 250 μm | 28 |
| | |
| Gambar 4.1 Pengaturan eksperimen di stasiun eksperimen. Laser utama melewati di chamber dan difokuskan oleh OAP ke target (garis merah). Laser dioda digunakan untuk monitor target (garis ungu). Sinar probe digunakan untuk diagnostik transversal atau shadowgraphy | 30 |
| Gambar 4.2 Skema eksperimen. Laser terfokus menyinari yang grafin tersuspensi. Proton dihasilkan dari sisi belakang dan dideteksi oleh tumpukan RCF. | 30 |
| Gambar 4.3 (a) Gambar kanal ionisasi di TCC dengan diagnostic transversal, (b) Gambar tampak samping target substrat dengan diagnostik transversal, dan (c) Gambar lubang oleh monitor target. | 32 |
| Gambar 4.4 (a) Substrat grafin lapisan 2-L dan (b) substrat 4-L grafin. | 33 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.5 (a) Tampak samping dari penyangga target dan manipulator target dan (b) Tampak depan dari penyangga target dan manipulator target | 34 |
| Gambar 4.6 RCF yang dibungkus dengan Alumunium foil.. | 35 |
| Gambar 4.7 Penyangga detektor. (a) Ukuran penyangga RCF, (b) Tampak belakang penyangga RCF, dan (c) Tampak depan penyangga RCF..... | 35 |
| | |
| Gambar 5.1 Tidak ada sinyal di RCF ke 1, 2, 3, dan 4. Tapi, sinyalnya muncul di RCF ke-5 untuk kasus 1 ... | 37 |
| Gambar 5.2 Ada tanda putih (burn mark) pada Aluminium foil untuk case 1..... | 38 |
| Gambar 5.3 Daya henti pada RCF | 39 |
| Gambar 5.4 Tidak ada sinyal di RCF ke 1, 2, 3, dan 4. Tapi, sinyalnya juga muncul di RCF ke-5 untuk kasus 2..... | 40 |
| Gambar 5.5 Ada 2 tanda putih (tanda terbakar) pada Aluminium foil untuk kasus 2..... | 41 |
| Gambar 5.6 Skema dari grafin tersuspensi | 41 |
| Gambar 5.7 Gambar grafin tertutup sepenuhnya | 42 |
| Gambar 5.8 Pengukuran Raman dan OM di 7 lubang target yang ditembak dengan energi laser tinggi..... | 43 |
| Gambar 5.9 Pengukuran OM di beberapa grafin tersuspensi | 44 |
| Gambar 5.10 Pengukuran Raman pada substrat | 45 |
| Gambar 5.11 Hasil OM dari grafin tersuspensi sebelum dan sesudah pengujian 1 untuk diperiksa efek pemompaan pada kerusakan grafin tersuspensi | 46 |
| Gambar 5.12 Hasil OM dari grafin tersuspensi sebelum dan sesudah pengujian 2 untuk diperiksa efek pemompaan pada kerusakan grafin tersuspensi | 47 |



**PERCEPATAN PROTON DARI
INTERAKSI PULSA LASER
INTENSITAS TINGGI DENGAN
GRAFIN TERSUSPENSI**



BAB 1 | PENDAHULUAN

A. Laboratorium Astrofisika

Eksperimen laboratorium dapat menjadi alat pelengkap untuk mengamati atau menyelidiki fenomena di luar angkasa dan fenomena astrofisika. Misalnya, jet plasma [1, 2, 3], guncangan tanpa tumbukan [4, 5, 6, 7], ketidakstabilan hidrodinamik[8], dan rekoneksi magnetik [12] telah diselidiki di laboratorium dengan laser daya tinggi. Rekoneksi magnetik adalah salah satu fenomena mendasar di alam semesta, seperti subbadai magnetosfer, aurora, bintang dan jilatan api matahari, dan anginnya. Medan magnet adalah besaran penting dalam banyak eksperimen yang disebutkan di atas dalam laboratorium astrofisika, dan juga fenomena luar angkasa/astrofisika. Gelembung magnet dapat dihasilkan karena efek baroklinik termal atau efek Biermann dengan penyinaran target padat dengan sinar laser daya tinggi [13, 14]. Jika beberapa gelembung dibuat dengan beberapa penyinaran dengan titik fokus kecil, gelembung akan mengembang satu sama lain, meremas medan magnet yang berlawanan bersamanya dan mendorong untuk terjadi rekoneksi [15, 16]. Pengamatan evolusi spasial dan temporal rekoneksi magnetik dalam plasma yang dihasilkan dari interaksi laser telah dilakukan. Eksperimen dilakukan dengan fasilitas laser Gekko XII (GXII) di Osaka University. Penyinaran target tipis CH (ketebalan 10 m) dengan sinar laser utama (energi 120 J, panjang gelombang 31 nm, durasi pulsa 500 ps, titik fokus 300 pada FWHM, intensitas pada target 4×10^{14} W/cm²).

BAB

2

PERCEPATAN LASER-PROTON

A. Laser Intensitas Tinggi (Fasilitas Laser NCU 100 TW)

Laser telah menjadi salah satu alat yang paling penting dalam fisika eksperimental karena dapat dikontrol secara tepat, menghasilkan radiasi yang terdefinisi dengan baik, dan dapat memberikan kondisi eksperimental yang stabil. Terdapat bermacam-macam laser yang digunakan untuk aplikasi yang berbeda-beda, namun semua laser memiliki prinsip kerja yang sama. Pada tahun 1985, Donna Strickland dan Gerard Mourou mendemonstrasikan chirped pulse amplification (CPA) untuk laser [27] dan sukses meningkatkan intensitas laser hingga level terawatt, bahkan setelah itu mampu meningkatkan intensitas laser hingga level petawatt. Pada CPA, laser pulsa pendek direntangkan dalam durasi pulsa sebelum media penguatan menggunakan sepasang kisi-kisi yang disusun sehingga komponen frekuensi yang lebih tinggi dari pulsa laser bergerak dengan panjang jalur yang lebih panjang. Setelah melewati sepasang kisi tersebut, durasi pulsa laser diperluas dengan factor 103 hingga 105, dan karenanya intensitasnya cukup rendah dibandingkan dengan batas intensitas media penguatan. Setelah dikuatkan dengan faktor 106 atau lebih, pulsa laser yang diperpanjang dikompresi kembali ke lebar pulsa asli melalui proses pembalikan peregangan. Dengan teknik CPA, puncak daya keluaran pulsa laser dapat mencapai magnitude yang lebih besar dari sebelumnya [28], yang pada dasarnya mengarah pada kemungkinan mempercepat partikel dengan laser intensitas tinggi.

BAB

3

GRAFIN

A. Karakteristik Grafir

Grafir, monolayer atom karbon terikat sp^2 , adalah material kuasi dua dimensi (2D). Grafir telah menarik minat besar karena struktur pita dan sifat fisiknya yang khas. Struktur kristal grafir membentuk kisi flat Honeycomb, di mana setiap atom karbon membentuk ikatan kovalen dengan tiga atom tetangga seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. 1. Jarak antara atom berdekatan adalah 1,42 Angstrom. Mengukur ketebalan grafir bukanlah hal yang mudah, dan metode yang digunakan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap hasil pengukuran ketebalan grafir. Namun, sebuah pilihan intuisi adalah menentukan ketebalan melalui jarak lapisan dalam grafit, yaitu $d=3,35$ Angstrom. Akurasi *Atomic Force Microscopy* (AFM) mengkonfirmasi bahwa nilai ini adalah referensi yang akurat.

Untuk tujuan eksperimen, sangat diperlukan untuk memperhatikan sifat optik dasar dari grafir tersuspensi. Grafir adalah material yang berbentuk 2D untuk bahan karbon dari semua dimensi lainnya. Jika kita membungkus grafir, maka akan menjadi bola bucky yang berdimensi 0D. Jika kita menggulung grafir, maka akan menjadi nanotube 1D. Kemudian, jika kita menumpuk grafir, maka akan menjadi grafit yang berdimensi 3D seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. 1. Sebagai material dua dimensi, grafir menampilkan beberapa sifat mengejutkan dan menawarkan banyak peluang untuk pemodelan teoretis yang akurat.

BAB 4 | EKSPERIMEN DAN SISTEM DIAGNOSTIK

A. Desain Eksperimen dan Monitor Target

Eksperimen ini dilakukan dengan menggunakan fasilitas laser 100 TW di National Central University, Taiwan. Pengaturan eksperimen ditunjukkan pada Gambar 4. 1.. Peneliti menggunakan sinar laser utama (energi 1 J, panjang gelombang 810 nm, durasi pulsa 40 fs, titik fokus 10 μm pada FWHM, puncak intensitas $1 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$). 99,9 persen dari 100 TW laser digunakan untuk laser utama untuk menyinari target. 0,1 persen dari 100 TW laser digunakan untuk sinar probe. Laser utama difokuskan pada target center chamber (TCC) oleh Off-Axis Parabola (OAP). Pengukuran dari titik fokus FWHM dilakukan dalam transmisi pada energi laser rendah, dengan menggunakan lensa cembung dan CCD. Target grafin yang tersuspensi diradiasi dari arah depan target. Gambar 4. 2 menunjukkan skema skema di mana laser yang difokuskan menyinari grafin tersuspensi dan dihasilkan proton yang akan dikumpulkan oleh tumpukan RCF di sisi belakang.

BAB 5 | PERCEPATAN PROTON OLEH LASER

A. Tembakan Laser pada Target Grafin

Gambar 5. 1 menunjukkan hasil pemindaian RCF (kasus 1). Setelah tembakan laser utama pada target grafin tersuspensi, tidak ada sinyal di RCF ke-1, ke-2, ke-3, dan ke-4. Tapi, sinyalnya muncul di RCF ke-5. Selain itu, ada tanda putih (tanda terbakar) di Aluminium foil untuk kasus 1. Permukaan aluminium foil dapat terbakar karena sinar laser. Di sisi lain, setelah laser utama menembak target grafin tersuspensi untuk kasus 2, hasilnya hampir mirip dengan hasil kasus 1. Sinyal juga muncul di RCF ke-5 (kasus 2), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. 4. Rentang energi dari daya penghenti ion di Aluminium foil dan RCF diperkirakan dengan menggunakan software *stopping and range of ions in matters* (SRIM). SRIM memungkinkan peneliti untuk menentukan energi ion yang sesuai dengan tumpukan RCF. Pada detektor RCF yang diamati selama percobaan, menggunakan grafin tersuspensi 2 nm dan 4 nm, peneliti dapat melihat sinyal di film ke-5, yang sesuai dengan energi karbon 160 MeV (lihat Gambar 5. 3 untuk detail tentang energi yang disimpan oleh ion ke dalam RCF ke-5). Peneliti hanya dapat melihat sinyal di film ke-5, ini mungkin karena pancaran ion monoenergi. Untuk mengkonfirmasi berkas ion monoenergi, peneliti harus mengamati energi ion yang disimpan dengan *Software Electron Gamma Shower* (EGS) atau *Particle and Heavy Ion Transport* (PHITS).

BAB

6

PENUTUP

Telah dihasilkan grafin tersuspensi sebagai target berkas energi ion yang diproduksi dengan pulsa laser yang intens, seperti fasilitas laser NCU 100 TW. Berdasarkan karakterisasi spektroskopi SEM, AFM, dan Raman, kerataan permukaan, ketebalan, yaitu, jumlah lapisan, dan kualitas grafin telah dikonfirmasi. Peneliti mengembangkan eksperimen akselerasi proton di stasiun 4 di fasilitas laser NCU 100 TW. Dengan menyinari grafin tersuspensi dengan pulsa laser yang intens, peneliti berhasil memperoleh berkas energi ion. Untuk mendeteksi berkas ion, peneliti menggunakan lebih banyak RCF yang ditumpuk berlapis-lapis. Sinyal dalam RCF menunjukkan bahwa interaksi laser pulsa pendek yang intens dengan grafin tersuspensi dapat menghasilkan berkas energi ion energik. Telah diperkirakan energi total berkas ion dengan kode SRIM. Perkiraan energi karbon sekitar 160 MeV.

Setelah ditembak dengan laser, dilakukan pengamatan grafin tersuspensi dengan Spektroskopi OM dan Raman. Berdasarkan hasil spektroskopi OM dan Raman, semua grafin tersuspensi lainnya rusak. Harus dipertimbangkan bahwa tekanan radiasi dari laser dapat mempengaruhi grafin tersuspensi lainnya yang tidak ditembak dengan laser. Eksperimen yang dilakukan ini memberikan informasi penting tentang parameter-parameter yang diperlukan untuk penelitian selanjutnya. Namun demikian, detektor menunjukkan beberapa sinyal yang menarik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Gregory, B. Loupiau, J. Waugh, P. Barroso, S. Bouquet, E. Brambrink, S. Dono, E. Falize, J. Howe, Y. Kuramitsu, R. Kodama, M. Koenig, C. Michaut, S. Myers, W. Nazarov, M. Notley, A. Oya, S. Pikuz, M. le Gloahec, Y. Sakawa, C. Spindloe, M. Streeter, L. Wilson, N. Woolsey, Astrophysical jet experiments, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 50. doi:10.1088/0741-3335/50/12/124039. Araujo, Ives Solano., Veit, Eliane Angela., Moreira, Marco Antonio. 2008. *Physics Students' Performance Using Computational Modelling Activities to Improve Kinematics Graphs Interpretation*. doi:10.1016/j.compedu.2006.11.004.
- [2] Y. Kuramitsu, Y. Sakawa, J. N. Waugh, C. D. Gregory, T. Morita, S. Dono, H. Aoki, H. Tanji, B. Loupiau, M. Koenig, N. Woolsey, H. Takabe, Jet formation in counterstreaming collisionless plasmas, *The Astrophysical Journal Letters* 707 (2) (2009) L137. URL <http://stacks.iop.org/1538-4357/707/i=2/a=L137>
- [3] C. D. Gregory, B. Loupiau, J. Waugh, S. Dono, S. Bouquet, E. Falize, Y. Kuramitsu, C. Michaut, W. Nazarov, S. A. Pikuz, Y. Sakawa, N. C. Woolsey, M. Koenig, Laserdriven plasma jets propagating in an ambient gas studied with optical and proton diagnostics, *Physics of Plasmas* 17 (5) (2010) 052708. doi:10.1063/1.3431094.
- [4] T. Morita, Y. Sakawa, Y. Kuramitsu, S. Dono, H. Aoki, H. Tanji, T. N. Kato, Y. T. Li, Y. Zhang, X. Liu, J. Y. Zhong, H. Takabe, J. Zhang, Collisionless shock generation in high-speed counterstreaming plasma flows by a high-power laser, *Physics of Plasmas* 17 (12) (2010) 122702. arXiv:<http://dx.doi.org/10.1063/1.3524269>, doi:10.1063/1.3524269. URL <http://dx.doi.org/10.1063/1.3524269>
- [5] Y. Kuramitsu, Y. Sakawa, T. Morita, C. D. Gregory, J. N. Waugh, S. Dono, H. Aoki, H. Tanji, M. Koenig, N. Woolsey, H. Takabe, Time evolution of collisionless shock in counterstreaming laser-produced plasmas, *Phys. Rev. Lett.*

- 106 (2011) 175002. doi:10.1103/PhysRevLett.106.175002. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.106.175002>
- [6] Y. Kuramitsu, Y. Sakawa, S. Dono, C. D. Gregory, S. A. Pikuz, B. Loupias, M. Koenig, J. N. Waugh, N. Woolsey, T. Morita, T. Moritaka, T. Sano, Y. Matsumoto, A. Mizuta, N. Ohnishi, H. Takabe, Kelvin-helmholtz turbulence associated with collisionless shocks in laser produced plasmas, *Phys. Rev. Lett.* 108 (2012) 195004. doi:10.1103/PhysRevLett.108.195004. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.108.195004>
- [7] Y. Sakawa, T. Morita, Y. Kuramitsu, H. Takabe, Collisionless electrostatic shock generation using high-energy laser systems, *Advances in Physics: X* 1 (3) (2016) 425{443. arXiv:<http://dx.doi.org/10.1080/23746149.2016.1213660>, doi:10.1080/23746149.2016.1213660. URL <http://dx.doi.org/10.1080/23746149.2016.1213660>
- [8] Y. Kuramitsu, A. Mizuta, Y. Sakawa, H. Tanji, T. Ide, T. Sano, M. Koenig, A. Ravasio, A. Pelka, H. Takabe, C. D. Gregory, N. Woolsey, T. Moritaka, S. Matsukiyo, Y. Matsumoto, N. Ohnishi, Time evolution of kelvin-helmholtz vortices associated with collisionless shocks in laser-produced plasmas, *The Astrophysical Journal* 828 (2) (2016) 93. URL <http://stacks.iop.org/0004-637X/828/i=2/a=93>
- [9] Y. Kuramitsu, N. Nakanii, K. Kondo, Y. Sakawa, Y. Mori, E. Miura, K. Tsuji, K. Kimura, S. Fukumochi, M. Kashihara, T. Tanimoto, H. Nakamura, T. Ishikura, K. Takeda, M. Tampo, R. Kodama, Y. Penelitagawa, K. Mima, K. A. Tanaka, M. Hoshino, H. Takabe, Model experiment of cosmic ray acceleration due to an incoherent wakefield induced by an intense laser pulse, *Physics of Plasmas* 18 (1) (2011) 010701. arXiv:<http://dx.doi.org/10.1063/1.3528434>, doi:10.1063/1.3528434. URL <http://dx.doi.org/10.1063/1.3528434>
- [10] Y. Kuramitsu, N. Nakanii, K. Kondo, Y. Sakawa, Y. Mori, E. Miura, K. Tsuji, K. Kimura, S. Fukumochi, M. Kashihara, T. Tanimoto, H. Nakamura, T. Ishikura, K. Takeda, M. Tampo, R. Kodama, Y. Penelitagawa, K. Mima,

- K. A. Tanaka, M. Hoshino, H. Takabe, Experimental evidence of nonthermal acceleration of relativistic electrons by an intensive laser pulse, *Phys. Rev. E* 83 (2011) 026401. doi:10.1103/PhysRevE.83.026401. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.83.026401>
- [11] Y. Kuramitsu, H.-H. Chu, L.-N. Hau, S.-H. Chen, Y.-L. Liu, C. Y. Hsieh, Y. Sakawa, T. Hideaki, J. Wang, Relativistic plasma astrophysics with intense lasers, *High Energy Density Physics* 17 (2015) 198{202. doi:10.1016/j.hedp.2014.11.005.
- [12] N. Khasanah, C. Peng, C. Chen, T. Huang, N. Bolouki, T. Moritaka, Y. Hara, H. Shimogawara, T. Sano, Y. Sakawa, Y. Sato, K. Tomita, K. Uchino, S. Matsukiyo, Y. Shoji, S. Tomita, S. Tomiya, R. Yamazaki, M. Koenig, Y. Kuramitsu, Spatial and temporal plasma evolutions of magnetic reconnection in laser produced plasmas, *High Energy Density Physics* 23 (2017) doi:https://doi.org/10.1016/j.hedp.2017.02.004. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574181817300095>
- [13] S. Naoz, R. Narayan, Generation of primordial magnetic fields on linear overdensity scales, *Phys. Rev. Lett.* 111 (2013) 051303. doi:10.1103/PhysRevLett.111.051303. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.111.051303>
- [14] G. Gregori, A. Ravasio, C. Murphy, K. Schaar, A. Baird, A. Bell, A. BenuzziMounaix, R. Bingham, C. Constantin, R. Drake, M. Edwards, E. Everson, C. Gregory, Y. Kuramitsu, W. Lau, J. Mithen, C. Niemann, H. Park, B. Remington, B. Reville, A. Robinson, D. Ryutov, Y. Sakawa, S. Yang, N. Woolsey, M. Koenig, F. Miniati, Generation of scaled protogalactic seed magnetic fields in laser-produced shock waves, *Nature* 481 (7382) (2012) 480{483. doi:10.1038/nature10747
- [15] W. Fox, A. Bhattacharjee, K. Germaschewski, Fast magnetic reconnection in laser-produced plasma bubbles, *Phys. Rev. Lett.* 106 (2011) 215003. doi:10.1103/PhysRevLett.106.215003. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.106.215003>

- [16] P. M. Nilson, L. Willingale, M. C. Kaluza, C. Kamperidis, S. Minardi, M. S. Wei, P. Fernandes, M. Notley, S. Bandyopadhyay, M. Sherlock, R. J. Kingham, M. Tatarakis, Z. Najmudin, W. Rozmus, R. G. Evans, M. G. Haines, A. E. Dangor, K. Krushelnick, Magnetic reconnection and plasma dynamics in two beam laser-solid interactions, *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 255001. doi:10.1103/PhysRevLett.97.255001.
URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.97.255001>
- [17] N. L. Kugland, D. D. Ryutov, P.-Y. Chang, R. P. Drake, G. Fiksel, D. H. Froula, S. H. Glenzer, G. Gregori, M. Grosskopf, M. Koenig, Y. Kuramitsu, C. Kuranz, M. C. Levy, E. Liang, J. Meinecke, F. Miniati, T. Morita, A. Pelka, C. Plechaty, R. Presura, A. Ravasio, B. A. Remington, B. Reville, J. S. Ross, Y. Sakawa, A. Spitkovsky, H. Takabe, H.-S. Park, Self-organized electromagnetic field structures in laser-produced counter-streaming plasmas, *Nature Physics* 8 (2012) 809{812. doi:10.1038/nphys2434.
- [18] P. Nilson, L. Willingale, M. Kaluza, C. Kamperidis, S. Minardi, M. Wei, P. Fernandes, M. Notley, S. Bandyopadhyay, M. Sherlock, R. Kingham, M. Tatarakis, Z. Najmudin, W. Rozmus, R. Evans, M. Haines, A. Dangor, K. Krushelnick, Magnetic reconnection and plasma dynamics in two-beam laser-solid interactions, *Physical Review Letters* 97 (25). doi:10.1103/PhysRevLett.97.255001.
- [19] S. A. Gaillard, T. Kluge, K. A. Flippo, M. Bussmann, B. Gall, T. Lockard, M. Geissel, D. T. Offermann, M. Schollmeier, Y. Sentoku, T. E. Cowan, Increased laser-accelerated proton energies via direct laser-light-pressure acceleration of electrons in microcone targets, *Physics of Plasmas* 18 (5) (2011) 056710.
arXiv:<http://dx.doi.org/10.1063/1.3575624>,
doi:10.1063/1.3575624.
URL <http://dx.doi.org/10.1063/1.3575624>
- [20] T. Esirkepov, M. Borghesi, S. V. Bulanov, G. Mourou, T. Tajima, Highly efficient relativistic-ion generation in the laser-piston regime, *Phys. Rev. Lett.* 92 (2004) 175003.

doi:10.1103/PhysRevLett.92.175003. URL
<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.92.175003>

- [21] X. Q. Yan, C. Lin, Z. M. Sheng, Z. Y. Guo, B. C. Liu, Y. R. Lu, J. X. Fang, J. E. Chen, Generating high-current monoenergetic proton beams by a circularly polarized laser pulse in the phase-stable acceleration regime, *Phys. Rev. Lett.* 100 (2008) 135003.

doi:10.1103/PhysRevLett.100.135003.

URL

<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.100.135003>

- [22] A. Henig, S. Steinke, M. Schürer, T. Sokollik, R. Hørlein, D. Kiefer, D. Jung, J. Schreiber, B. M. Hegelich, X. Q. Yan, J. Meyer-ter Vehn, T. Tajima, P. V. Nickles, W. Sandner, D. Habs, Radiation-pressure acceleration of ion beams driven by circularly polarized laser pulses, *Phys. Rev. Lett.* 103 (2009) 245003.

doi:10.1103/PhysRevLett.103.245003.

URL

<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.103.245003>

- [23] A. Macchi, S. Veghini, T. V. Liseykina, F. Pegoraro, Radiation pressure acceleration of ultrathin foils, *New Journal of Physics* 12 (4) (2010) 045013. URL <http://stacks.iop.org/1367-2630/12/i=4/a=045013>

- [24] S. Kar, K. F. Kakolee, B. Qiao, A. Macchi, M. Cerchez, D. Doria, M. Geissler, P. McKenna, D. Neely, J. Osterholz, R. Prasad, K. Quinn, B. Ramakrishna, G. Sarri, O. Willi, X. Y. Yuan, M. Zepf, M. Borghesi, Ion acceleration in multispecies targets driven by intense laser radiation pressure, *Phys. Rev. Lett.* 109 (2012) 185006.

doi:10.1103/PhysRevLett.109.185006.

URL

<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.109.185006>

- [25] T.-C. Liu, X. Shao, C.-S. Liu, B. Eliasson, J. Wang, S.-H. Chen, Enhancement of proton energy by polarization switch in laser acceleration of multi-ion foils, *Physics*

URL <http://dx.doi.org/10.1063/1.4826510>

- [26] G. M. Petrov, C. McGuffey, A. G. R. Thomas, K. Krushelnick, F. N. Beg, Proton acceleration from high-contrast short pulse lasers interacting with sub-micron thin foils, *Journal of Applied Physics* 119 (5) (2016) 053302.
arXiv:<http://dx.doi.org/10.1063/1.4941318>,
doi:10.1063/1.4941318.
URL <http://dx.doi.org/10.1063/1.4941318>
- [27] D. Strickland, G. Mourou, Compression of amplified chirped optical pulses, *Optics Communications* 55 (1985) 447{449.
doi:10.1016/0030-4018(85)90151-8
- [28] S. Backus, C. G. D. III, M. M. Murnane, H. C. Kapteyn, High power ultrafast lasers, *Review of Scientific Instruments* 69 (3) (1998) 1207{1223. arXiv:<http://dx.doi.org/10.1063/1.1148795>,
doi:10.1063/1.1148795.
URL <http://dx.doi.org/10.1063/1.1148795>
- [29] T.-S. Hung, C.-H. Yang, J. Wang, S.-y. Chen, J.-Y. Lin, H.-h. Chu, A 110-tw multiple-beam laser system with a 5-tw wavelength-tunable auxiliary beam for versatile control of laser-plasma interaction, *Applied Physics B* 117 (4) (2014) 1189{1200.
doi:10.1007/s00340-014-5943-6.
URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00340-014-5943-6>
- [30] C. J. Shearer, A. D. Slattery, A. J. Stapleton, J. G. Shapter, C. T. Gibson, Accurate thickness measurement of grafyn, *Nanotechnology* 27 (12) (2016) 125704.
URL <http://stacks.iop.org/0957-4484/27/i=12/a=125704>
- [31] A. K. Geim, K. S. Novoselov, The rise of grafyn, *Nat Mater* 6 (3) (2007) 183{191.
doi:10.1038/nmat1849.
URL <http://dx.doi.org/10.1038/nmat1849>
- [32] X. Li, W. Cai, J. An, S. Kim, J. Nah, D. Yang, R. Piner, A. Velamakanni, I. Jung, E. Tutuc, S. K. Banerjee, L. Colombo, R. S. Ruoff, Large-area synthesis of highquality and uniform grafyn films on copper foils, *Science* 324 (5932) (2009) 1312{1314.
arXiv:<http://science.sciencemag.org/content/324/5932/1312>

.full.pdf,
doi:10.1126/science.1171245.
URL <http://science.sciencemag.org/content/324/5932/1312>

- [33] X. Li, C. W. Magnuson, A. Venugopal, J. An, J. W. Suk, B. Han, M. Borysiak, W. Cai, A. Velamakanni, Y. Zhu, L. Fu, E. M. Vogel, E. Voelkl, L. Colombo, R. S. Ruoff, Grafyn films with large domain size by a two-step chemical vapor deposition process, *Nano Letters* 10 (11) (2010) 4328{4334, pMID: 20957985.
arXiv:<http://dx.doi.org/10.1021/nl101629g>,
doi:10.1021/nl101629g.
URL <http://dx.doi.org/10.1021/nl101629g>
- [34] J. M. Wofford, S. Nie, K. F. McCarty, N. C. Bartelt, O. D. Dubon,
Grafyn islands on cu foils: The interplay between shape, orientation, and defects, *Nano Letters* 10 (12) (2010) 4890{4896, pMID: 20979362
arXiv:<http://dx.doi.org/10.1021/nl102788f>,
doi:10.1021/nl102788f.
URL <http://dx.doi.org/10.1021/nl102788f>
- [35] M.-C. Chuang, W.-Y. Woon, Nucleation and growth dynamics of grafyn on oxygen exposed copper substrate, *Carbon* 103 (2016) 384 {390.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.03.049>.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000862231630238X>
- [36] Y. Wang, Y. Zheng, X. Xu, E. Dubuisson, Q. Bao, J. Lu, K. P. Loh, Electrochemical delamination of cvd-grown grafyn film: Toward the recyclable use of copper catalyst, *ACS Nano* 5 (12) (2011) 9927{9933, pMID: 22034835.
arXiv:<http://dx.doi.org/10.1021/nn203700w>,
doi:10.1021/nn203700w.
URL <http://dx.doi.org/10.1021/nn203700w>
- [37] L. Gao, W. Ren, H. Xu, L. Jin, Z. Wang, T. Ma, L.-P. Ma, Z. Zhang, Q. Fu, L.-M. Peng, X. Bao, H.-M. Cheng, Repeated growth and bubbling transfer of grafyn with millimetre-size

- single-crystal grains using platinum, *Nature Communications* 3 (2012) 699. doi:10.1038/ncomms1702.
- [38] Y.-M. Chen, S.-M. He, C.-H. Huang, C.-C. Huang, W.-P. Shih, C.-L. Chu, J. Kong, J. Li, C.-Y. Su, Ultra-large suspended grafin as a highly elastic membrane for capacitive pressure sensors, *Nanoscale* 8 (2016) 3555{3564}. doi:10.1039/C5NR08668J.
URL <http://dx.doi.org/10.1039/C5NR08668J>
- [39] G. Binnig, C. F. Quate, C. Gerber, Atomic force microscope, *Phys. Rev. Lett.* 56 (1986) 930{933}. doi:10.1103/PhysRevLett.56.930.
URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.56.930>
- [40] L. Malard, M. Pimenta, G. Dresselhaus, M. Dresselhaus, Raman spectroscopy in grafin, *Physics Reports* 473 (5) (2009) 51 { 87}.
doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2009.02.003.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157309000520>
- [41] S. G. Bochkarev, G. V. Golovin, D. S. Uryupina, S. A. Shulyapov, A. V. Andriyash, V. Y. Bychenkov, A. B. Savel'ev, Effect of a short weak prepulse on lasertriggered front-surface heavy-ion acceleration, *Physics of Plasmas* 19 (10) (2012) 103101.arXiv:http://dx.doi.org/10.1063/1.4757216, doi:10.1063/1.4757216.
URL <http://dx.doi.org/10.1063/1.4757216>
- [42] D. Jung, L. Yin, B. J. Albright, D. C. Gautier, R. H'orlein, D. Kiefer, A. Henig, R. Johnson, S. Letzring, S. Palaniyappan, R. Shah, T. Shimada, X. Q. Yan, K. J. Bowers, T. Tajima, J. C. Fern'andez, D. Habs, B. M. Hegelich, Monoenergetic ion beam generation by driving ion solitary waves with circularly polarized laser light, *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011) 115002. doi:10.1103/PhysRevLett.107.115002.
URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.107.115002>
- [43] T.-S. Hung, C.-H. Yang, J. Wang, S.-y. Chen, J.-Y. Lin, H.-h. Chu, A 110-tw multiplebeam laser system with a 5-tw

wavelength-tunable auxiliary beam for versatile control of laser-plasma interaction, Applied Physics B 117 (4) (2014) 1189{1200

- [44] P. Antici, Laser-acceleration of high-energy short proton beams and applications, These de Doctorat de I Ecole Polytechnique.

GLOSARIUM

P

Proton : Partikel bermuatan positif penyusun inti atom dengan besar muatan sama seperti elektron, yaitu sebesar $1,6 \times 10^{-19} \text{C}$ dengan massa $1,67262 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

Pulsa Laser : pancaran sinar laser dalam rentang waktu yang singkat dan terjadi secara periodik

L

Laser : berasal dari kata *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* merupakan perangkat yang menghasilkan pancaran radiasi elektromagnetik yang koheren, berintensitas tinggi, dan lintasan lurus melalui mekanisme penguatan cahaya oleh emisi radiasi yang terstimulasi

I

Intensitas : Besaran fisis yang menyatakan daya yang dipancarkan tiap satuan luas.

G

Grafin : Grafin merupakan alotrop karbon yang berbentuk lembaran datar tipis di mana setiap atom karbon memiliki ikatan sp^2 dan dikemas rapat dalam bentuk kisi kristal seperti sarang lebah.

TENTANG PENULIS



Nur Khasanah lahir pada tanggal 30 Januari 1993 di Lumajang, Jawa Timur. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Sumberejo I (1999-2005), SMPN I Pasirian (2005-2008), dan SMAN 2 Lumajang (2008-2011). Pada tahun 2011, penulis meneruskan sekolah ke jenjang S1 di Program studi S1 Fisika Universitas Brawijaya. Pada tahun 2015 S2 di Department of Physics di National Central

University, Taiwan. Selama kuliah penulis pernah aktif sebagai Tim Pembina Olimpiade MtsN 1 Malang. Dalam Bidang Penelitian, penulis pernah meneliti tentang radiasi neutron di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) Jakarta. Selain itu, penulis pernah menjadi staf peneliti pada High-Field Physics and Ultrafast Technology Laboratory, Taiwan. Saat ini Penulis aktif sebagai Dosen Tadris Fisika Fakultas Tarbiyah dan Keguruan Universitas Islam Negeri Mataram. Mata kuliah yang diampu oleh penulis antara lain Fisika Medis, Fisika Statistik, Fisika Kuantum dan Fisika Astronomi.