

Autoreferat

dr Stefan Borodziuk

Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy
Warszawa 2014

Spis treści

	Str.
1. Zyciorys naukowy	3
2. Zatrudnienie w instytucjach naukowych	3
3. Informacje o opublikowanych pracach	3
3.1. Artykuły opublikowane przed uzyskaniem stopnia doktora	3
3.2. Artykuły opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora	4
4. Statystyka	7
5. Wykaz komunikatów konferencyjnych	7
6. Patenty	12
7. Udział w projektach badawczych	14
8. Działalność dydaktyczna	14
9. Działalność organizacyjna	14
10. Przebieg pracy naukowej	14
11. Wskazanie głównego osiągnięcia naukowego	16
12. Inne osiągnięcia naukowo – badawcze	41
12.1. Generacja strumieni plazmowych	41

1. Życiorys naukowy

Stefan Borodziuk

Data urodzenia: 04.03.1944 r

Adres domowy: Warszawa, Al. Jana Pawła II 78 m 23

Wykształcenie:

Stopień magistra – VII.1967 r. Uniwersytet Warszawski – Wydział Matematyki i Fizyki

Stopień doktora – XII.1990 – Wojskowa Akademia Techniczna - Wydział Chemii i Fizyki Technicznej, Warszawa

2. Zatrudnienie w instytucjach naukowych

1967 – asystent w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa,

1969-1975 – starszy asystent w Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa,

1976 – obecnie – adiunkt w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, Warszawa

3. Informacje o opublikowanych pracach

3.1. Artykuły opublikowane przed uzyskaniem stopnia doktora:

- w czasopismach znajdujących się na liście Thomson Reuters Master Journal List (tzw. „lista filadelfijska”):

1. **S. Borodziuk**, J. Dąbrowski, *On the Calculations of D_A in the Phase-Shift Approximation*, Acta Phys. Polonica B2, 615 (1971). (IF = 1.027 - aktualna wartość). Mój udział procentowy szacuję na 70 %. Mój wkład w powstanie tej teoretycznej pracy polegał na realizacji planu zaproponowanego przez prof. Janusza Dąbrowskiego, tzn. wykonaniu stosownych obliczeń, dyskusji otrzymanych wyników i napisaniu tekstu publikacji.
2. **S. Borodziuk**, J. Kostecki, *Studies of hypervelocity impact problem by means of laser-target experiments—a new approach*, Laser and Particle Beams 8 (1-2), 241-245 (1990). (IF = 1.62 - aktualna wartość). Mój udział procentowy szacuję na 70 %. Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu nowej metody analizy problemu zderzeń szybkich cząstek z tarczą stałociałową (osłoną sondy kosmicznej), wykonaniu obliczeń, dyskusji otrzymanych wyników i napisaniu tekstu publikacji.

Artykuły w innych czasopismach niefiladelfijskich:

3. **S. Borodziuk**, R. Miklaszewski, Z. Składanowski, *Badanie numeryczne plazmy wytworzonej w eksperymencie „tarcza płaska – dwie przeciwbieżne wiązki laserowe”*, Biuletyn WAT XXV, nr 10 (290), 1976. Mój udział procentowy szacuję na ~ 50 % (konceptcja pracy, przygotowanie kodu numerycznego, opracowanie założeń, dyskusja wyników i współudział w napisaniu tekstu).
4. **S. Borodziuk**, S. Kaliski, Z. Składanowski, *Compression of Plexiglass by profiled, opposite laser beams*, Journal of Technical Physics 18, 171-180 (1977). Mój udział ~ 35 % (wykonanie części pracy dot. modelowania numerycznego – obliczenia, dyskusja wyników, napisanie tekstu).
5. **S. Borodziuk**, S. Denus, J. Farny, J. Kostecki, S. Nagraba, P. Parys, J. Wołowski, *Laser simulation of impact of comet dust particles against the cosmic probe shield*, Journal of Technical Physics 28 (1), 401 (1987). Mój udział ~ 50% (konceptcja pracy, wykonanie obliczeń, napisanie tekstu publikacji).

6. S **Borodziuk**, J Kostecki, j. Marczak, *Laser simulation of impact of particles and foil acceleration*, Proc. SPIE Vol. 859 Laser Technology 11, 140 (1987). Mój udział ~ 50% (koncepcja pracy, wykonanie obliczeń, napisanie tekstu publikacji).

3.2 Artykuły opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora - w czasopismach z listy Thomson Reuters Master Journal (lista filadelfijska):

7. S. **Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, K. Rohlena, J. Ullschmied, M. Kalal, J. Limpouch, P. Pisarczyk: *Application of laser simulation method for the analysis of crater formation experiment on PALS laser*. Czechoslovak J. Phys. **53**, 799-810 (2003). IF = 0.263. Praca włączona do cyklu hab. (B1). Mój udział procentowy szacuję na ~ 60%.
8. T. Pisarczyk, S. **Borodziuk**, A. Kasperczuk, K. Jungwirth, B. Kralikova, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, J. Ullschmied, M. Kalal, J. Limpouch, and P. Pisarczyk: *Application of the Laser Simulation Method of Crater Creation in the Laser-Al Solid Target Experiment on the PALS Facility*. Journal of High Temperature Material Processes **7** (2), 319-326 (2003). Mój udział ~40 % (koncepcja i wykonanie teoretycznej części pracy, współudział w napisaniu tekstu).
9. S. **Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, N.N. Demchenko, S.Yu. Guskov and V.B.Rozanov, M. Kalal, J. Limpouch, J. Ullschmied, V.N. Kondrashov, P. Pisarczyk: *Application of the 3-frame interferometry and the crater replica method for investigation of laser accelerated macroparticles interacting with massive targets in the PALS experiment*. Optica Applicata **34** (3), 385-403 (2004). IF = 0.308. Praca włączona do cyklu hab. (B2). Mój udział ~ 40%.
10. S. **Borodziuk**, Ya. Doskach, S. Gus'kov, K. Jungwirth, M. Kalal, A. Kasperczuk, B. Kralikova, E. Krousky, J. Limpouch, K. Masek, M. Pfeifer, P. Pisarczyk, T. Pisarczyk, K. Rohlena, V. Rozanov, J. Skala, J. Ullschmied: *Experimental and theoretical investigations of craters formation in an aluminum target in a PALS experiment*. Nukleonika **49** (1), 7-14 (2004). IF = 0.167. Praca włączona do cyklu hab. (B3). Mój udział ~ 40%.
11. S. **Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, S. Gus'kov, J. Ullschmied, B. Kralikova, K. Rohlena, J. Skala, M. Kalal, P. Pisarczyk: *Investigation of plasma ablation and crater formation processes in the Prague Asterix Laser System laser facility*. Optica Applicata **34** (1), 31-42 (2004). IF = 0.308. Praca włączona do cyklu hab. (B4). Mój udział ~ 40%.
12. T. Pisarczyk, S. **Borodziuk**, A. Kasperczuk, N.N. Demchenko, S.Yu. Guskov, V.B. Rozanov, M. Kalal, J. Limpouch, K. Jungwirth, B. Kralikova, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, J. Ullschmied, V.N. Kondrashov, P. Pisarczyk: *Experimental and theoretical studies of the crater formation process on PALS experiments*. Czechoslovak Journal of Physics **54**, suppl. C, 403-408 (2004). IF = 0.292. Mój udział ~40 % (koncepcja pracy, wykonanie teoretycznej części pracy, współudział w napisaniu tekstu).
13. S. Gus'kov, S. **Borodziuk**, M. Kalal, A. Kasperczuk, B. Kralikova, E. Krousky, J. Limpouch, K. Masek, P. Pisarczyk, T. Pisarczyk, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, J. Ullschmied: *Shock wave generation and crater formation in solids by a short laser pulse interaction*. Quantum Electronic **34** (11), 989-1003 (2004). IF = 0.811. Praca włączona do cyklu hab. (B5). Mój udział ~ 25%.
14. M. Kalal, J. Limpouch, S. **Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, N.N. Demchenko, S.Yu. Guskov, V.B. Rozanov, K. Rohlena, J. Skala, J. Ullschmied, V.N. Kondrashov, P. Pisarczyk: *Investigation of the wavelength influence of the efficiency of macroparticles acceleration and craters creation in the PALS double targets*

- experiment. Czechoslovak Journal of Physics **54**, suppl. C, 415-420 (2004). IF = 0.292. Praca włączona do cyklu hab. (B6). Mój udział ~ 35%.
15. **S. Borodziuk**, N. N. Demczenko, S. Yu. Gus'kov, K. Jungwirth, M. Kalal, A. Kasperczuk, V. N. Kondrashov, E. Krousky, J. Limpouch, K. Masek, P. Pisarczyk, T. Pisarczyk, M. Pfeifer, K. Rohlena, V. B. Rozanov, J. Skala, and J. Ullschmied: *High power laser interaction with single and double layer targets*. Optica Applicata **35** (2), 242-262 (2005). IF = 0.459. Praca włączona do cyklu hab. (B7). Mój udział ~ 50%.
 16. S. Yu. Gus'kov, **S. Borodziuk**, M. Kalal, A. Kasperczuk, V. N. Kondrashov, J. Limpouch, P. Pisarczyk, T. Pisarczyk, K. Rohlena, J. Skala, and J. Ullschmied: *Investigation of shock wave loading and crater creation by means of single and double targets in the PALS-laser experiment*. Journal of Russian Laser Research **26** (3), 228-244 (2005). IF = 0.500. Praca włączona do cyklu hab. (B8). Mój udział ~ 30%.
 17. A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, K. Rohlena, and J. Skala, H. Hora: *Stable dense plasma jets produced at laser power densities around 10^{14} W/cm²*. Physics of Plasma **13**, 062704 (2006). IF = 2.258. Praca włączona do cyklu „Jets” (J2) Mój udział ~ 25%.
 18. Ph. Nicolai, V. T. Tikhonchuk, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, K. Rohlena, and J. Ullschmied: *Plasma jets produced in a single laser beam interaction with a planar target*. Physics of Plasma **13**, 062701 (2006). IF = 2.258. Praca włączona do cyklu „Jets” (J3). Mój udział ~ 10%.
 19. S. Yu. Gus'kov, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, M. Kalal, J. Limpouch, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, P. Pisarczyk : *Efficiency of ablative loading of material upon the fast-electron transfer of absorbed laser energy*. Quantum Electronics **36** (5), 429-434 (2006). IF = 0.860. Mój udział ~ 20% (analiza i dyskusja wyników eksperymentu, współudział w pisaniu tekstu)
 20. Ph. Nicolai, V. T. Tikhonchuk, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, K. Rohlena, J. Ullschmied: *How produce a plasma jet using a single and low energy laser beam*. Astrophysics and Space Science, DOI 10.1007/s10509-006-9222-9 (2006). IF = 0.771. Praca włączona do cyklu „Jets” (J4). Mój udział ~ 10%.
 21. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, S. Yu. Gus'kov, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, M. Kalal, J. Limpouch, and P. Pisarczyk: *Study of the conditions for the effective energy transfer in a process of acceleration and collision of the thin metal disks with the massive target*. The European Physical Journal D **41**, 311-317 (2007). IF=1.828. Praca włączona do cyklu hab. (B9). Mój udział ~ 60%.
 22. A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, and **S. Borodziuk**, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, P. Pisarczyk: *The influence of target irradiation conditions on the parameters of laser-produced plasma jets*. Physics of Plasmas **14**, 032701 (2007). IF = 2.325. Praca włączona do cyklu „Jets” (J5). Mój udział ~ 25%.
 23. A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, S. Yu. Gus'kov, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, M. Kalal, J. Limpouch, P. Pisarczyk: *Plasma jet generation by flyer disk collision with massive target*. Optica Applicata **XXXVII**, No. 1-2 (2007). IF = 0.284. Praca włączona do cyklu „Jets” (J6). Mój udział ~ 25%.
 24. A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk: *Interferometric investigations of influence of target irradiation on the parameters of laser-produced plasma jets*. Laser and Particle Beams **25**, 425-433 (2007). IF = 4.696. Praca włączona do cyklu „Jets” (J7). Mój udział ~ 25%.

25. S. Yu. Gus'kov, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, J. Skala, and P. Pisarczyk: *Energy of a Shock Wave Generated in Different Metals under Irradiation by a High-Power Laser Pulse*, Journal of Experimental and Theoretical Physics, **105** (4), 793–802 (2007). IF = 1.075. Mój udział ~ 20% (analiza i interpretacja wyników eksperymentu, współudział w pisaniu tekstu).
26. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk: *Reversed scheme of thin foil acceleration*. Applied Physics Letters **93**, 101502 (2008). IF = 3.726. Praca włączona do cyklu hab. (B10). Mój udział ~ 70%. Praca opublikowana również w **Virtual Journal of Ultrafast Science (October 2008)**.
27. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, T. Chodukowski, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk: *Cavity pressure acceleration: An efficient laser-based method of production of high-velocity macroparticles*. Applied Physics Letters **95**, 231501/1-3 (2009). IF = 3.554. Praca włączona do cyklu hab. (B11). Mój udział ~ 70%. Praca opublikowana również w **Virtual Journal of Ultrafast Science (January 2010)**.
28. J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Pisarczyk, T. Chodukowski, E. Krousky, K. Masek, J. Skala, J. Ullschmied, and Yong-Joo Rhee, *Highly efficient acceleration and collimation of high-density plasma using laser-induced cavity pressure*, Appl. Phys. Lett. **96**, 251502 (2010). IF = 3,82. Mój udział ~ 20% (współudział w zaplanowaniu eksperymentu, wykonanie części obliczeń, analiza i interpretacja otrzymanych wyników).
29. A.Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, P. Parys J.Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk, *Interaction of two plasma jets produced successively from Cu target*, Laser and Particle Beams **28**, 497-504 (2010). IF = 3,656. Praca włączona do cyklu „Jets” (J8). Mój udział ~ 10%.
30. A.Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, S. Yu. Gus'kov, N. N. Demchenko, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala and P. Pisarczyk, *Influence of low atomic number plasma component on the formation of laser- produced plasma jets*, Physics of Plasmas **17** 114505, (2010). IF = 2,32. Praca włączona do cyklu „Jets” (J9). Mój udział ~ 10%.
31. A.Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, S. Yu. Gus'Kov, N. N. Demchenko, D Klir, J Kravarik, P Kubes, K Rezac, J Ullschmied, E Krousky, K Masek, M Pfeifer, K Rohlena, J Skala and P Pisarczyk: *Interaction of a laser-produced copper plasma jet with ambient plastic plasma*. Plasma Phys. Control. Fusion **53**, 095003 (2011). IF = 2,425. Praca włączona do cyklu „Jets” (J10). Mój udział ~ 10%.
32. **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, Z. Kalinowska, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Ullschmied, E. Krousky, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk: *Forward and backward cavity pressure acceleration of macroparticles* . Applied Physics Letters **99**, 231501 (2011). IF =3,844. Praca włączona do cyklu hab. (B12). Mój udział ~ 70%.
33. J. Badziak, S. Jabłoński, T. Pisarczyk, P. Rączka, E. Krousky, R. Liska, M Kucharik, T. Chodukowski, Z. Kalinowska, P. Parys, M. Rosiński, **S. Borodziuk**, J. Ullschmied: *Highly efficient accelerator of dense matter using laser-induced cavity pressure acceleration*, Physics of Plasmas **19**, 053105 (2012). IF = 2,147. Mój udział ~ 10% (analiza i dyskusja otrzymanych wyników).
34. T. Pisarczyk, S. Yu. Gus'kov, Z. Kalinowska, J. Badziak, D. Batani, L. Antonelli, G. Folpini, Y. Maheut, F. Baffigi, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, G. Cristoforetti, N.N.

- Demchenko, L. A. Gizzi, A. Kasperczuk, P. Koester, E. Krousky, L. Labate, P. Parys, M. Pfeifer, O. Renner, M. Smid, M. Rosinski, J. Skala, R. Dudzak, and J. Ullschmied, P. Pisarczyk, *Pre-plasma effect on energy transfer from laser beam to shock wave generated in solid target*, *Physics of Plasmas* 21, 012708 (2014). IF = 2,376. Mój udział ~ 10% (analiza i dyskusja otrzymanych wyników).
35. Z. Kalinowska, T. Pisarczyk, J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, A. Kasperczuk, S. Yu. Gus'kov, N.N. Demchenko, J. Ullschmied, O. Renner, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Skala, M. Smid and P. Pisarczyk, *The interferometric studies of the pre-plasma influence on the laser energy transfer to the shock wave with the use two-layers planar target* - zaakceptowana do druku w *Physica Scripta* (2014). Mój udział ~ 15%. (analiza i interpretacja otrzymanych wyników).

Artykuły w innych czasopismach niefiladelfijskich:

36. **S. Borodziuk**, J. Kostecki, *Ablative acceleration and energy transfer in a laser-foil—foil system*, *Journal of Technical Physics* 32 (1), 79-85 (1991). Mój udział ~ 90% (konceptcja pracy, wykonanie modelowania numerycznego, analiza otrzymanych wyników, napisanie tekstu).
37. **S. Borodziuk**, J. Kostecki, *Production of hyperfast projectiles by the method of laser ablative acceleration of thin foils*, *Journal of Technical Physics* 32 (1), 73-78 (1991). Mój udział ~ 75% (konceptcja pracy, wykonanie modelowania numerycznego, analiza otrzymanych wyników, napisanie tekstu publikacji).
38. **S. Borodziuk**, J. Kostecki, *Laser acceleration of thin foils: influence of heavy coatings on an acceleration velocity*, *Proc. SPIE 2202, Laser Technology IV: Research Trends, Instrumentation, and Applications in Metrology and Materials Processing*, 556-560 (1995). Mój udział ~ 70%. (konceptcja pracy, wykonanie obliczeń, analiza otrzymanych wyników, napisanie tekstu publikacji).
39. **S. Borodziuk**, J. Kostecki, *Laser generation of ultrahigh pressures*, *Journal of Technical Physics* 36 (2), 173-180 (1995). Mój udział ~ 90% (konceptcja pracy, wykonanie modelowania numerycznego, analiza otrzymanych wyników, napisanie tekstu publikacji).
40. S. Yu. Gus'kov, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, M. Kalal, J. Limpouch, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, P. Pisarczyk: *Efektivnost ablatsionnovo nagrudzenia vishchiestva pri pierenose poglashchenoj lazernoj energii bystryimi elektronami*. *Kvantovaya Elektronika* 36 (5), 429-434 (2006). Mój udział ~ 10% (analiza i dyskusja wyników eksperymentu).

4. Statystyka

Całkowita liczba publikacji—**40**, w tym **34** po uzyskaniu stopnia doktora.

Sumaryczny impact factor dla wszystkich publikacji IF = **47.315** (bez uwzględnienia poz. 1, 2 i 35), w tym:

dla publikacji po doktoracie IF = 47.315 (bez uwzględnienia poz. 35).

Jako pierwszy autor - liczba publikacji = 19

Publikacje naukowe opisane w bazie:

Web of Science: liczba publikacji: **33**, liczba cytowań: **212**, bez autocytowań: **160**, Indeks Hirsza: **8**

Scopus: liczba publikacji: **45**, liczba cytowań: **210**, Indeks Hirsza: **8**

Google Scholar: liczba publikacji: **63**, liczba cytowań: **292**, Indeks Hirsza: **9**

5. Komunikaty i prezentacje na konferencjach naukowych

1. S. Denus, **S. Borodziuk**, J. Farny, R. Jarocki, A. Kalbarczyk, W. Mróz, S. Nagraba, Z. Składanowski, *Investigation of the anomalous effects In laser-produced plasmas*, VIII-th Conference on Quantum Electronics and Nonlinear Optics (EKON-78), Poznań 1978.
2. **Borodziuk S.**, Chłodziński J., Denus S., Farny J., Kostecki J., Mamczur M., Nagraba S., Nowak-Goroszczenko A., Parys P., Rycyk A., Wilczyński A., Wołowski J., *Laserowa symulacja uderzeń drobin pyłu kometowego w osłonę sondy kosmicznej*, I Sympozjum Techniki Laserowej, Toruń, 25 – 27 czerwiec, 1984.
3. S. Denus, **S. Borodziuk**, J. Farny, J. Kostecki, M. Mamczur, A. Woryna, *Interaction of the Nd-glass laser radiation with thin foils and slab Al targets*, 17 th ECLIM, Rome, November 18-22, 1985.
4. **S. Borodziuk**, J. Kostecki, J. Marczak, *Laser simulation of impact of particles and foil acceleration*, Laser technology II; Proceedings of the Meeting, Szczecin, Poland, Sept. 7-10, 1987 (A89-11841 02-36). Bellingham, WA, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1988, p. 140-145.
5. **S. Borodziuk**, J. Kostecki, 15 th European Conference on Controlled Fusion and Plasma Heating, Dubrownik, Yugoslavia, 1988 May 16-20, Vo. 12B, part III, pp. 1301 – 1304.
6. **S. Borodziuk**, J. Kostecki, *Laser ablative acceleration of targets as an alternative method in studying of hypervelocity impact problem*, Proc. 19th ECLIM, Madrid 3-7 Oct. 1988.
7. **S. Borodziuk**, J. Kostecki, *Wykorzystanie napędzonego laserem fragment folii jako szybkiego mikropocisku do badania efektów z tarczą stalociałową*, Sympozjum PLAZMA '88, Jachranka, 21 – 25 Listopada 1988.
8. Kostecki J., **Borodziuk S.**, *Studies of thin foils acceleration by Nd Glass laser*, 1st Symposium of Plasma Diagnostic, Białowieża, October 2-6, 1989.
9. **Borodziuk S.**, Farny J., Fiedorowicz H., Kostecki J., Patron Z., Pawłowicz W., Wołowski J., *Laser plasma research AT IPPLM*, Warsaw, Poland. International Workshop on Laser-Plasma Interaction, Indore, India, 30 Nov – 5 Dec, 1989.
10. **S. Borodziuk**, J. Kostecki, *Laser irradiation of thin foils – diagnostics and application for studying of hypervelocity impact problem and surface phenomena*, 20 th ECLIM, Schliersee, January 22-26, Book of Abstracts P-103, 1990.
11. **S. Borodziuk**, J. Farny, J. Kostecki, W. Mróz, A. Nowak-Goroszczenko, A.A. Erokhin, Ya. A. Zakharenkov, *Ion diagnostic in investigation of laser interaction with high Z plasma*, 20 th ECLIM, Schliersee, January 22-26, Book of Abstracts P-50, 1990.
12. **S. Borodziuk**, Farny J., Fiedorowicz H., Kostecki J., Mróz W., Nowak-Goroszczenko A., Parys P., Patron Z., Ulianowicz A., Wołowski J., *Investigations of Al thin foils accelerations by Nd glass laser radiation*, 20 th ECLIM, Schliersee, January 22-26, Book of Abstracts P-100, 1990.
13. **S. Borodziuk**, J. Kostecki, *Wykorzystanie lasera Nd do otrzymywania superszybkich mikropocisków metodą ablacyjnego napędzania cienkich folii*, III Sympozjum Techniki Laserowej, Szczecin, 24 – 27 wrzesień, 1990.
14. **S. Borodziuk**, J. Kostecki, *Laser acceleration of thin foils and studying of physical effects accompanying their impact with massive targets*, 21st ECLIM, Warsaw, October 21 – 25, 1991, Book of Proceedings 134, 1991.
15. **S. Borodziuk**, J. Kostecki, *Damages of the Solid Target Surface Irradiated by Nanosecond Nd Laser Pulses*, International Symposium PLASMA'97, Jarnołtówek near Opole, June 10-12, 1997.

16. T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, S. Gus'kov, I.Ya. Doskach, V. Rozanov, J. Ullschmied, K. Jungwirth, B. Kralikova, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, M. Kalal, J. Limpouch, P. Pisarczyk; *Experimental and Theoretical Investigations of Craters Formation in Solids in PALS Experiments*. CD of Proceedings, PLASMA 2003, September 9 – 12, Warsaw, Poland (2003).
17. T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, K. Jungwirth, B. Kralikova, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, J. Ullschmied, M. Kalal, J. Limpouch, P. Pisarczyk; *Application of the Laser Simulation Method of Crater Creation in the Laser-Al Solid Target Experiment on the PALS Facility*, French – Polish Seminar on Plasma, Bordeaux, France (2003).
18. T. Pisarczyk, S. Gus'kov, I.Ya. Doskach, A. Kasperczuk, **S. Borodziuk**, M. Kalal, E. Krousky, J. Limpouch, K. Masek, P. Pisarczyk, K. Rohlena, V. Rozanov, J. Ullschmied. *Experimental and Theoretical Investigations of Craters Formation in Solid Targets Under the Action of Powerful Laser Pulse*. CCPPA 2003 First Cairo Conference on Plasma Physics and Applications **34**, 251-254, October 11 - 15, Cairo, Egypt (2003).
19. S. Yu Gus'kov, **S. Borodziuk**, N.N.Demchenko, K. Jungwirth, M.Kalal, A. Kasperczuk, V.N.Kondrashov, J.Limpouch, T. Pisarczyk, P.Pisarczyk, K.Rohlena, V.B.Rozanov, J.Skala and J.Ullschmied. *Ablation loading efficiency and shock wave generation driven by powerful laser pulse of different wavelengths*. 28 th ECLIM, 266-270, September 6 – 10, Roma (2004).
20. T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, N.N. Demchenko, S.Yu. Guskov, M. Kalal, A. Kasperczuk, V.N. Kondrashov, J. Limpouch, P. Pisarczyk, K. Rohlena, V.B. Rozanov, J. Skala, and J. M. Kalal, **S. Borodziuk**, N. N. Demchenko, S. Yu. Gus'kov, K. Jungwirth, A. Kasperczuk, Ullschmied: *Energy transfer and shock wave generation at the collision of laser-driven macroparticle*. 28 th ECLIM, 465-469, September 6 – 10, Roma (2004).
21. M. Kalal, **S. Borodziuk**, N. N. Demchenko, S. Yu. Gus'kov, K. Jungwirth, A. Kasperczuk, V. N. Kondrashov, B. Kralikova, E. Krousky, J. Limpouch, K. Masek, P.Pisarczyk, T. Pisarczyk, M. Pfeifer, K. Rohlena, V.B. Rozanov, J.Skala, and J. Ullschmied, "High power laser interaction with single and double layer targets", 28 th ECLIM, 249-260. September, 6 th- 10 th 2004 , Roma.
22. Kasperczuk, **S. Borodziuk**, N.N. Demchenko, S.Yu.Guskov, M.Kalal, V.N. Kondrashov, B.Kralikova, E.Krousky, J.Limpouch, K.Masek, M.Pfeifer, P.Pisarczyk, T.Pisarczyk, K.Rohlena, V.B.Rozanov, J.Skala, and J.Ullschmied: *Investigation of crater creation efficiency by means of single and double targets in the PALS experiment*. 31st EPS Conference on Plasma Phys., ECA **28G**, P- 5.067 London (2004).
23. T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, N.N.Demchenko, S.Yu.Guskov, M.Kalal, A. Kasperczuk, V.N.Kondrashov, B.Kralikova, E.Krousky, J.Limpouch, K.Masek, M.Pfeifer, P.Pisarczyk, , K.Rohlena, V.B.Rozanov, J.Skala, and J.Ullschmied: *Experimental and theoretical investigations of the crater formation process by means of double-target technique*. 31st EPS Conference on Plasma Phys. London, ECA **28G**, P- 5.066, London (2004).
24. T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, N.N.Demchenko, S.Yu.Gus'kov, K. Jungwirth, M.Kalal, A.Kasperczuk, V.N.Kondrashov, B.Kralikova, E.Krousky, J.Limpouch, K.Masek, M.Pfeifer, P.Pisarczyk, K.Rohlena, V.B.Rozanov, J.Skala, and J.Ullschmied : *Optical investigation of flyer disk acceleration and collision with massive target on the PALS laser facility*. 32 nd EPS Conference on Plasma Physics 8 th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets, P1-141, June 27– July 1, Tarragona (2005).
25. **S. Borodziuk**, N.N. Demchenko, S.Yu. Gus'kov, K. Jungwirth, M.Kalal, A.Kasperczuk, B.Kralikova, E.Krousky, V.N.Kondrashov, J.Limpouch, K.Masek,

- M.Pfeifer, P. Pisarczyk, T. Pisarczyk, K. Rohlena, V.B. Rozanov, J. Skala, and J.Ullschmied: *Numerical modelling of strong shock waves and craters for the experiments using single and double solid targets irradiated by high power iodine laser (PALS)*. 32nd EPS Conference on Plasma Physics 8th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets, P1-142, June 27– July 1, Tarragona (2005).
26. Pisarczyk T., Borodziuk S., Demchenko N. N., Gus'kov S. Yu., Jungwirth K., Kálal M., Kasperczuk A., Kondrashov V. N., Králiková B., Krouský E., Limpouch J., Mašek M., Pfeifer M., Pisarczyk P., Rohlena K., Rozanov V. B., Skála J., Ullschmied J.: *Optical investigation of flyer disk acceleration and collision with massive target on the PALS laser facility*. Plasma Physics and Controlled Fusion Combined with the 8th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets /32./. Mulhouse: EPS, 2005 - (Pick, R.) P-1.141. ISBN 2-914771-24-X. - (Europhysics Conference Abstracts. 29C).
 27. T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, N.N.Demchenko, S.Yu.Gus'kov, K. Jungwirth, M.Kalal, A.Kasperczuk, B.Kralikova, E.Krousky, J.Limpouch, K.Masek, P.Pisarczyk, M.Pfeifer, K.Rohlena, V.B.Rozanov, J.Skala, and J.Ullschmied : *Optical investigations of powerful laser actions on massive and flyer targets*. International Conference Plasma 2005 & 3rd GPPD & 5th FPSTP, I-11, September 6-9, Opole-Turawa (2005).
 28. A.Kasperczuk, **S. Borodziuk**, N.N.Demchenko, S.Yu.Gus'kov, K. Jungwirth, M.Kalal, B.Kralikova, E.Krousky, J.Limpouch, K.Masek, P.Pisarczyk, T. Pisarczyk, M.Pfeifer, K.Rohlena, V.B.Rozanov, J.Skala, and J.Ullschmied: *Plasma and shock generation by indirect laser pulse action*. International Conference Plasma 2005 & 3rd GPPD & 5th FPSTP, P4-01, September 6-9, Opole-Turawa (2005).
 29. **S. Borodziuk**, N.N.Demchenko, S.Yu.Gus'kov, K. Jungwirth, M.Kalal, A.Kasperczuk, B.Kralikova, E.Krousky, J.Limpouch, K.Masek, P.Pisarczyk, T. Pisarczyk, M.Pfeifer, K.Rohlena, V.B.Rozanov, J.Skala, and J.Ullschmied. *Flyer target acceleration and energy transfer at its collision with massive targets*. International Conference Plasma 2005 & 3rd GPPD & 5th FPSTP, P4-08, September 6-9, Opole-Turawa (2005).
 30. Nicolai Ph., Tikhonchuk V.T., Kasperczuk A., Pisarczyk T., **Borodziuk S.**, Rohlena K., Ullschmied J.: *How produce a plasma jet using a single and low energy laser beam*; HEDLA 6th International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics, March 11-14, 2006, Rice University, Houston, Texas.
 31. A.Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, E.Krousky, K.Masek, M.Pfeifer, K.Rohlena, J.Skala, J.Ullschmied, H. Hora: *Plasma jets generation by means of interaction of defocused laser beam with metallic targets of different mass density*. 33rd EPS Conference on Plasma Phys., Rome, June 19-23, ECA **30I**, P-1.009 (2006).
 32. S. Yu Gus'kov, **S. Borodziuk**, N.N.Demchenko, K. Jungwirth, M.Kalal, A.Kasperczuk, B.Kralikova, E.Krousky, J.Limpouch, K.Masek, M.Pfeifer, P.Pisarczyk, T. Pisarczyk, K.Rohlena, V.B.Rozanov, J.Skala, J.Ullschmied: *Impact efficiency of the energy transfer in the problem of fast ignition*. Proc. of 29th ECLIM, 232-237, June 11-16.Madrid, Spain (2006).
 33. T. Pisarczyk, A.Kasperczuk, **S. Borodziuk**, Ph. Nicolai, V.Tikhonchuk, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K.Rohlena, J. Skala, H. Hora, and P. Pisarczyk: *Investigations of plasma jets produced by action of a defocused laser beam on planar Metallic targets*. Proc. of 29th ECLIM, 441-446, June 11-16.Madrid, Spain (2006).
 34. A.Kasperczuk, **S. Borodziuk**, T. Pisarczyk, S. Yu Gus'kov, J.Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K.Rohlena, J. Skala, M.Kalal, J.Limpouch, and P.Pisarczyk: *Laser driven acceleration and collision of thin metal disks with massive targets*:

- effective energy transfer condition studies. Proc. of 29th ECLIM, 584-589, June 11-16. Madrid, Spain (2006).*
35. T. Pisarczyk, A. Kasperczuk, **S. Borodziuk**, Ph. Nicolai, V. Tikhonchuk, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, H. Hora, and P. Pisarczyk. *Investigations of plasma jets produced by action of a defocused laser beam on planar metallic targets. 5th Kudowa Summer School, September 18-22 Kudowa Zdroj (2006).*
 36. T. Pisarczyk, A. Kasperczuk, **S. Borodziuk**, Ph. Nicolai, V. Tikhonchuk, , E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, J. Ullschmied, P. Pisarczyk, *Laser driven jet, 34th EPS'2007, Warsaw, July 02-06, Warsaw, Poland (2007).*
 37. T. Pisarczyk, A. Kasperczuk, **S. Borodziuk**, Ph. Nicolai, X. Ribeyre , C. Stenz, V. Tikhonchuk, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, M. Kalal, D. Klir, J. Kravarik, P. Kubes, and P. Pisarczyk. *Formation of plasma jets and thei interaction with ambient media. 6th Kudowa Summer School, September 18-20, Kudowa Zdroj (2007).*
 38. T. Pisarczyk, A. Kasperczuk, **S. Borodziuk**, Ph. Nicolai, X. Ribeyre, C. Stenz, V. Tikhonchuk, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, L. Juha, J. Ullschmied, M. Kalal, D. Klir, J. Kravarik, P. Kubes, P. Pisarczyk, *Laser driver radiative jest for astrophysical and ICF applications, International Conference on Research and Applications of Plasmas PLASMA 2007, combined with the 4th German-Polish Conference on Plasma Diagnostics for Fusion and Applications and the 6th French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratory, Greifswald, Germany, October 16-19, 2007.*
 39. T. Pisarczyk, A. Kasperczuk, **S. Borodziuk**, M. Kalal, S.Yu. Guskov, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk: *Investigations of acceleration and collision of planar flyer targets with massive target on the PALS experiment. 30th European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM 2008), August 31-September 5, Darmstadt (2008).*
 40. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, T. Chodukowski, J. Ullschmied , E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk: *Indirect two-step method of acceleration, applied to metallic foils of different thickness, 36th EPS Conference on Plasma Phys., Sofia, June 28 - July 3, P1-004 (2009).*
 41. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, T. Chodukowski, J. Ullschmied , E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk. *Metoda efektywnego napędzania makrocząstek do prędkości powyżej 1×10^7 cm/s, XL Zjazd Fizyków Polskich, 6 – 11.09.2009, Kraków.*
 42. J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Pisarczyk, T. Chodukowski, E. Krousky, K. Masek, J. Skala, J. Ullschmied: *Highly efficient acceleration and collimation of high-density plasma using laser-induced cavity pressure, IFSA International Conference 2009, San Francisco (2009).*
 43. J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, A. Kasperczuk, P. Parys, T. Pisarczyk, M. Rosiński, J. Wołowski, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, J. Ullschmied, M. Kalal, Ph. Nikolai, V.T. Tikhonchuk, Ch. Stenz, P. Pisarczyk. *Investigations of laser-produced plasma jet formation and laser driven macroparticles acceleration for ICF and laboratory astrophysics applications. LaserLab User Meeting, February 22 – 23, Paris, (2010).*
 44. J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Pisarczyk, A. Kasperczuk, T. Chodukowski, S. Jablonski, P. Parys, M. Rosinski, J. Wołowski, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, J. Skala, and P. Pisarczyk. *Laser acceleration and collimation of dense*

- plasma using laser-induced cavity pressure acceleration (LICPA)*. 37th EPS Conference on Plasma Physics P4.217 (2010).
45. A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, N.N. Demchenko, S.Yu. Guskov, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk. *Plastic plasma influence on formation of laser-produced copper plasma jet*. 37th EPS Conference on Plasma Physics P5.218 (2010).
 46. T. Pisarczyk, A. Kasperczuk, J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, P. Parys, M. Rosinski, J. Wolowski, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk: *Plasma jet creation by direct and indirect irradiations of conically shaped foils*. 37th EPS Conference on Plasma Physics P4.226 (2010).
 47. A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, P. Parys, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk, *Interaction of two Cu plasma jets produced succesively from the cylindrically shaped massive target*, 31st European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM 2010), P80, September 6- 10, Budapest (2010).
 48. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, T. Chodukowski, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk. *Cavity Pressure Acceleration – an efficient laser-based method of production of high- velocity macroparticles*. 31st European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM 2010), P97, September 6-10, Budapest (2010).
 49. **S. Borodziuk**, J. Badziak, T. Chodukowski, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, Z. Kalinowska, J. Ullschmied, E. Krousky, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk: *Forward and Backward Cavity Pressure Acceleration of Macroparticles*, Proc. of 7th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, Bordeaux, France, September 12-16, PTu-3 (2011).
 50. J. Badziak, T. Pisarczyk, T. Chodukowski, **S. Borodziuk**, S. Jabłoński, Z. Kalinowska, A. Kasperczuk, P. Parys, P. Rączka, M. Rosiński, J. Wołowski, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Skala, J. Ullschmied, R. Liska, M. Kucharik, K. Tomaszewski, P. Pisarczyk and Yong-Joo Rhee: *Laser induced cavity pressure acceleration—a novel highly efficient scheme of acceleration of dense matter*. 38th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 26.06-02.07.2011, Strasburg, France.
 51. T. Chodukowski, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, **S. Borodziuk**, S.Yu. Gus'kov, N. N. Demchenko, D. Klir, J. Kravarik, P. Kubes, K. Rezac, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, P. Pisarczyk. *Investigations of interaction of axially symmetrical light plastic plasma with heavy copper plasma*, Proc. of 7th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, PMo-9, Bordeaux, France, September 12-16, PMo-9 (2011).
 52. J. Badziak, T. Pisarczyk, T. Chodukowski, S. Jablonski, Z. Kalinowska, P. Parys, P. Rączka, M. Rosinski, **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, J. Wolowski, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Skala, J. Ullschmied, R. Liska, M. Kucharik, K. Tomaszewski, P. Pisarczyk, Yong-Joo Rhee, *Highly efficient acceleration of dense plasma in the LICPA accelerator*, Plasma Science (ICOPS), 2012/7/8, 2012 Abstracts IEEE, 2D-5.
 53. P. Rączka, J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, S. Jabłoński, Z. Kalinowska, A. Kasperczuk, P. Parys, P. Rączka, M. Rosiński, and J. Wołowski: *Report on works performed by IPPLM within the Inertial Fusion Energy Keep in-Touch Activity in 2011*. Meeting of IFE_KiT WG, 09-11.11.2011, Brussels, Belgium.
 54. T. Pisarczyk, A. Kasperczuk, J. Badziak, T. Chodukowski, **S. Borodziuk**, Z. Kalinowska, P. Parys, M. Rosiński, J. Wołowski, O. Renner, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Skala, J. Ullschmied, S. Yu. Gus'kov, N.N. Demchenko, P. Pisarczyk. *Recent investigations of laser-produced plasma jet formation and laser driven macroparticle acceleration for ICF and laboratory astrophysics applications*. LaserLab2 User Meeting, February 16 – 17, Szeged (2012).

55. J. Badziak, S. Jabłoński, T. Pisarczyk, P. Rączka, T. Chodukowski, **S. Borodziuk**, Z. Kalinowska, P. Parys, M. Rosiński, J. Wołowski, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Skala, J. Ullschmied, R. Liska, M. Kucharik, K. Tomaszewski, P. Pisarczyk, Yong-Joo Rhee. *Highly Efficient Laser-Induced Cavity Pressure Acceleration of Dense Plasma*. Proc. 39th EPS Conference & 16th Int. Congress on Plasma Physics, Stockholm, July 2 – 6, O2.204 (2012).
56. **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, Z. Kalinowska, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Ullschmied, E. Krousky, J. Skala, P. Pisarczyk. *Fast and dense macroparticles accelerated by iodine laser radiation of PALS*. ECLIM, Warsaw, September 10 – 14, P2 (2012).
57. T. Pisarczyk, Z. Kalinowska, J. Badziak, A. Kasperczuk, **S. Borodziuk**, M. Rosiński, P. Parys, T. Chodukowski, S. Yu. Gus'kov, N.N. Demchenko, D. Batani, L. Antonelli, P. Koester, L. A. Gizzi, L. Labate, G. Cristoforetti, F. Baffigi, J. Ullschmied, E. Krousky, M. Pfeifer, O. Renner, M. Smid, J. Skala, and P. Pisarczyk, *Investigation of energy transfer from PALS iodine laser beam to shock*, 40th EPS Conference on Plasma Physics, Stockholm 18-24 July, 2013.

6. Patenty

Sposób laserowej akceleracji mikropocisków

polegający na oświetleniu cienkiej tarczy umieszczonej na wejściu kanału prowadzącego akceleratora plazmy za pomocą intensywnej wiązki lasera i przyspieszeniu tej tarczy do dużych prędkości.

Zgłoszenie patentowe wynalazku Nr PL389465-A1.

Autorzy: J. Badziak, **S. Borodziuk**.

7. Udział w projektach badawczych

1. Projekt badawczy LaserLab-III Nr PALS 001776 w ramach 7. PR UE na temat: „*Mutual interactions of laser-produced plasmas with different atomic numbers in axially symmetric geometry*”. Termin realizacji 2012. Wykonawca.
2. Projekt badawczy SPB-M Nr 2443/7.PR/2012/2 na temat: „*Badanie wzajemnego oddziaływania dwóch osiowo symetrycznych strumieni plazmy o różnych liczbach atomowych, wytwarzanych impulsem lasera PALS*”. Termin realizacji 2012. Wykonawca.
3. Projekt badawczy LaserLab-II Nr PALS 001552 w ramach 7. PR UE na temat: „*Plasma jets interaction with plasmas and other jet*”. Termin realizacji 2010-2011. Wykonawca.
4. Projekt badawczy SPB-M Nr 2031/7.PR/2011/2 na temat: „*Wytwarzanie strumieni plazmowych i ich oddziaływanie z plazmą i innymi strumieniami plazmowymi*”. Termin realizacji 2011. Wykonawca.
5. Projekt badawczy SPB-M Nr 2017/7.PR/2011/2 na temat: „*Prace badawcze i technologiczne na rzecz Wspólnoty EURATOM - Analiza najnowszych wariantów syntezy t-j z inercyjnym utrzymaniem plazmy na podstawie wyników eksperymentów i symulacji numerycznych – kontynuacja poprzednich badań. Badania nowej wersji „szybkiego zapłonu” z zastosowaniem ablacyjno-ciśnieniowego napędzania makrocząstki*”. Termin realizacji 2011. Główny wykonawca.
6. Projekt badawczy NCN Nr N N202 130639 na temat: „*Sprawdzenie nowych koncepcji wytwarzania strumieni plazmowych i ich przydatności dla realizacji inercyjnej syntezy laserowej i zastosowań astrofizycznych*”. Termin realizacji projektu: 2.09.2010-01.01.2012 Wykonawca.

7. Projekt badawczy "Badanie laserowej akceleracji i kolimacji gęstej plazmy" skierowany do MNiSzW Termin realizacji projektu: 2010 Główny wykonawca.
8. Projekt badawczy SPB-M Nr 1539/7. PR UE/2010/7 na temat: „Wytwarzanie strumieni plazmowych i ich oddziaływanie z plazmą i innymi strumieniami plazmowymi.” Termin realizacji 2010. Wykonawca.
9. Projekt badawczy SPB-M Nr 1374/7.PR EURATOM UE/2010/7 na temat: „„Prace badawcze i technologiczne na rzecz Wspólnoty Euratom”- Analiza najnowszych wariantów syntezy t-j z inercyjnym utrzymaniem plazmy na podstawie wyników eksperymentów i symulacji numerycznych – kontynuacja poprzednich badań. Badania nowej wersji „szybkiego zapłonu” z zastosowaniem ablacyjno-ciśnieniowego napędzania makroczołki”. Termin realizacji 2010. Wykonawca.
10. Projekt badawczy **MNiSzW** Nr N N202 076635 na temat: „Badanie transformacji rozkładu intensywności promieniowania laserowego oświetlającego maszyną tarczę spowodowanej wpływem plazmy ablacyjnej”. Termin realizacji projektu: 26.08.2008r - 25.12.2009. Wykonawca.
11. Projekt badawczy SPB-M Nr 1026/7.PR-EURATOM UE/2009/7 na temat: „„Prace badawcze i technologiczne na rzecz Wspólnoty EURATOM”- Badanie plazmy laserowej do realizacji syntezy inercyjnej. Termin realizacji 2009. Wykonawca.
12. Projekt badawczy SPB-M (Nr kontraktu No FU06-CT-2006-00430) na temat: „Skoordynowane badania strumieni plazmowych wytwarzanych laserem do realizacji koncepcji szybkiego zapłonu w tarczach termojądrowych”. Termin realizacji 2008. Wykonawca.
13. Projekt badawczy SPB-M (Nr kontraktu No FU06-CT-2006-00430) na temat: „Formowanie strumieni plazmowych i ich oddziaływanie z otoczeniem”. Termin realizacji 2007. Wykonawca.
14. Projekt badawczy LaserLab Nr PALS 001326/Nicolai w ramach 6. PR UE na temat: „Plasma jet generation, characterization and their interaction with a gas cloud”. Termin realizacji 2007. Wykonawca.
15. Projekt badawczy LaserLab Nr PALS 001189 w ramach 6. PR UE na temat: „Investigation of plasma ablation and crater formation processes using multilayer targets in the PALS laser facility experiment”. Continuation of PALS 001073. Termin realizacji 2006. Główny wykonawca.
16. Projekt badawczy LaserLab Nr PALS 001073 w ramach 6. PR UE na temat: „Investigation of plasma ablation and crater formation processes using multilayer targets in the PALS laser facility experiment”. Termin realizacji 2005. Główny wykonawca.
17. Projekt badawczy SPB-M Nr 41/EURATOM/2005/7 (kontraktu No FU06-CT-2004-0081) na temat: „Generacja fal uderzeniowych, transport energii i tworzenie krateru przez impuls lasera dużej mocy w wielowarstwowych mediach na eksperymencie PALS”. Termin realizacji 2005-2006. Główny wykonawca.
18. Projekt badawczy KBN Nr 3 T10B 024 27 na temat: „Badanie procesów generacji fal uderzeniowych i tworzenia kraterów w tarczach wielowarstwowych za pomocą impulsu laserowego dużej mocy”. Termin realizacji projektu: 4.10.2004 - 3.02.2006. Główny wykonawca.

8. Działalność dydaktyczna

W latach 1970 – 1976 prowadziłem zajęcia dydaktyczne (ćwiczenia laboratoryjne i rachunkowe oraz wykłady) dla słuchaczy Wojskowej Akademii Technicznej, w tym: **wykład „Fizyka jądrowa”** dla słuchaczy V roku Wydz. Chemii i Fizyki Technicznej.

9. Prace organizacyjne

1. Członek komitetu organizacyjnego konferencji **ECLIM 1975**, Rynia
2. Członek komitetu organizacyjnego konferencji **ECLIM 1991**, Warszawa
3. Sekretarz komitetu organizacyjnego konferencji **PLASMA 1995**, Warszawa
4. Sekretarz komitetu organizacyjnego konferencji **PLASMA 2001**, Warszawa

10. Przebieg pracy naukowej

Praca magisterska pt. „Energia wiązania C^{12} ” Praca teoretyczna, dotyczyła jądrowego zagadnienia trzech ciał. Jej celem było policzenie energii wiązania jądra C^{12} . Zastosowano metodę wariacyjną Ritza. Dla C^{12} przyjęto model trzech cząstek α . Użyty został potencjał nielokalny separowalny.

Oryginalnym dokonaniem pracy było wyprowadzenie poprawnego wyrażenia na energię potencjalną rozważanego układu. Praca była cytowana w publikacji: L. P. Kok, “Comparison Between Exact and Variational Triton Calculation”, IC/68/11 International Centre for Theoretical Physics, Trieste.

Problematyka, którą się zajmowałem przed doktoratem dotyczyła przede wszystkim modelowania numerycznego eksperymentów typu „laser – tarcza”. W początkowym okresie były to głównie eksperymenty kompresyjne wykonywane w różnych geometriach (płaskiej, sferycznej, stożkowej) ¹.

W latach osiemdziesiątych IFPiLM brał udział w międzynarodowym programie VEGA (badania związane z przelotem komety Halleya). W ramach tego programu w IFPiLM i w kilku innych europejskich instytutach plazmowych prowadzono badania dotyczące skutków oddziaływania pyłu kometowego z osłonami sztucznych satelitów. W tym celu niezbędne było „wyprodukowanie” superszybkich cząstek, aby zderzając je z odpowiednią tarczą masywną (osłoną) mierzyć powstałe w takim procesie krateru.

Powszechnie stosowaną do tego celu była metoda symulacyjna („Laser Simulation Method” - LSM), w której – na podstawie parametrów impulsu laserowego (intensywność, czas trwania i średnica ogniska) – „produkowano” hipotetyczną cząstkę, określano jej prędkość i prawa skalowania (objętość względna wytwarzanych kraterów w funkcji prędkości). IFPiLM – jako jedyny – zastosował odmienną metodę. Zaproponowałem, aby zamiast cząstki hipotetycznej w badaniach używać rzeczywistej cząstki materialnej wytwarzanej w procesie akceleracji cienkiej folii „Laser Ablation Acceleration Method” (LAAM – laserowa metoda akceleracji ablacyjnej). Napędzony fragment folii był już realną materialną cząstką (zimnym zgęstkiem plazmowym), której prędkość można było zmierzyć eksperymentalnie. Eksperyment uzupełniało modelowanie numeryczne wykonane za pomocą własnego programu hydrodynamicznego „PLANAR”.

¹ **S. Borodziuk**, S Kaliski, Z Składanowski, Compression of Plexiglass by profiled, opposite laser beams, Journal of Technical Physics 18, 171-180 (1977).

**Napędzony fragment folii = superszybka makrocząstka, tzn.
laser może pełnić rolę akceleratora**

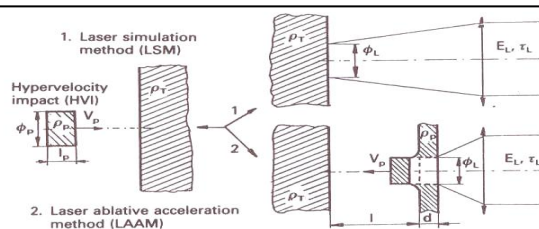


FIGURE 1. Graphic comparison of impact of fast macroparticles on the target with LAAM and LSM.

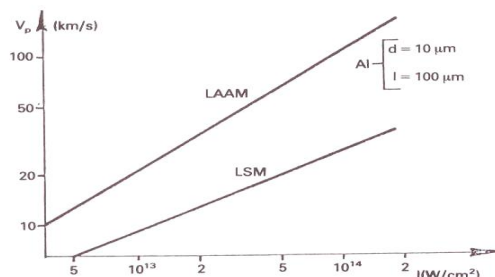


FIGURE 2. Possibility of achieving higher velocities of LAAM in comparison with LSM

S. Borodziuk and J. Kostecki, Studies of hyper-velocity impact problem by means of laser – target experiments – A new approach; Laser and Particle Beams 8 (1-2) 241-245(1990).

Rys. 1. Metoda badania zderzeń superszybkich cząstek w eksperymentach „laser–tarcza”.

Takie podejście było czymś nowym, niestosowanym wcześniej. Wykorzystanie lasera, jako akceleratora makrocząstek/mikropocisków stwarzało możliwość przeprowadzenia badań w znacznie szerszym zakresie i pozwalało wejść w obszar prędkości, jakie faktycznie miały miejsce w przypadku komety Halley’a, albowiem jej prędkość względem Ziemi wynosiła 80 km/s. Zastosowanie metody symulacyjnej – w przypadku lasera Nd, którym dysponowaliśmy w Instytucie – pozwalało uzyskać prędkości „hipotetycznej” cząstki < 20 km/s, a więc zdecydowanie poniżej potrzeb. W eksperymencie z foliami, poprzez zmianę grubości zastosowanej folii, uzyskaliśmy prawa skalowania dla rzeczywistych materialnych makrocząstek w obszarze 10 -100 km/s.

Praca doktorska:

„Teoretyczne modelowanie procesów fizycznych w plazmie wytwarzanej w tarczy płaskiej za pomocą impulsu lasera Nd”

Praca obroniona z wyróżnieniem. Główne dokonania pracy to:

- opracowanie kodu hydrodynamicznego PLANAR do numerycznego modelowania eksperymentów plazmowych
- analiza różnego rodzaju eksperymentów „laser – tarcza” (głównie eksperymenty kompresyjne)
- numeryczne symulacje problemu zderzania superszybkich mikropocisków („hypervelocity impact problem” - program VEGA)

11. Wskazanie głównego osiągnięcia naukowego.

Jako główne osiągnięcie naukowe wskazuję jednotematyczny cykl publikacji:

Laserowa akceleracja materii – poszukiwanie wysokowydajnych metod wytwarzania superszybkich makrocząstek i strumieni zimnej plazmy

Tematyka akceleracji obiektów plazmowych, jak to już wspomniano wyżej, pojawiła się w IFPiLM w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia – głównie w aspekcie programu „VEGA”. W badaniach tych uczestniczyłem od samego początku a moją rolą było przede wszystkim proponowanie konkretnych eksperymentów, modelowanie numeryczne i teoretyczna analiza wyników, również pisanie tekstów raportów i publikacji oraz przygotowywanie komunikatów konferencyjnych. W "klasycznym" schemacie akceleracji ablacyjnej cienkich folii, ekspandująca w kierunku lasera plazma napędza pozostałą część tarczy foliowej do wysokiej prędkości – podobnie jak ma to miejsce w rakiecie. Eksperymenty tego typu były realizowane w ramach programów badawczych syntezy laserowej w celu lepszego zrozumienia oddziaływania laser – plazma i analizy procesów przyspieszania. Początkowo, eksperymenty tego typu były wykonywane z uwagi na ich prostotę, albo też - równolegle, bądź zamiast tych z implodującymi mikrosferami. Tarcze foliowe i dyskowe mają tę zaletę, że można diagnozować po obu stronach. Można więc łatwo zmierzyć główne parametry charakteryzujące zachowanie hydrodynamiczne tego rodzaju tarcz, tj. prędkość i stopień ablacji, jak również określić być może najważniejszy w kontekście zastosowań fuzji inercyjnej (ICF) parametr – wydajność hydrodynamiczną procesu konwersji (zdefiniowany jako stosunek energii kinetycznej napędzonej folii/dysku do zabsorbowanej energii laserowej). Inną ważną cechą jest to, że przyspieszony fragment folii lub dysk folii może być traktowany jako superszybki mikropocisk. **Ten "oczywisty" (obecnie!!!) fakt został wykorzystany do budowy prostego laserowego akceleratora i zastosowania go jako bardzo użytecznego narzędzia do badania różnych problemów fizycznych w wielu późniejszych eksperymentach akceleracyjnych (np. ²).** Najbardziej oczekiwanym i pożądanym wynikiem eksperymentu akceleracyjnego jest zwykle otrzymanie bardzo szybkiego mikropocisku, który jednocześnie zachował (albo jeszcze lepiej – zwiększył) swoją gęstość i równocześnie – uzyskał wysoką energię kinetyczną. Innymi słowy, oznacza to, że wydajność hydrodynamiczna procesu konwersji zaabsorbowanej energii lasera w energię kinetyczną również powinna być wysoka. I to jest duży problem, aby ten warunek mógł być spełniony. W większości doświadczeń akceleracji ablacyjnej cienkich folii, wydajność hydrodynamiczna była niższa niż 10 %, co odpowiada ablacji ~ 20% masy początkowej. Z teoretycznego punktu widzenia hydrodynamiczna wydajność procesu przyspieszania cienkiej folii może osiągnąć (dla wystarczająco mocnej wiązki lasera) maksymalną wartość 65 % (model „zimnej rakiety”), a to oznacza, że 80% masy folii musi zostać odparowane pod wpływem światła laserowego. Pozostała część folii (20%) będzie mogła osiągnąć dużą prędkość, lecz będzie miała małą masę i niską gęstość - z powodu szybkiej ekspansji w półprzestrzeń. W rzeczywistym eksperymencie ablacyjnym przyspieszania cienkiej tarczy foliowej model zimnej rakiety nie jest realizowany, a hydrodynamiczna wydajność procesu akceleracji jest o wiele niższa - ze względu na fakt, że znaczna część zaabsorbowanej energii impulsu lasera ogrzewa ekspandującą plazmę, co nie przekłada się bezpośrednio na napędzanie cienkiej folii.

Na początku lat dziewięćdziesiątych została zaproponowana idea tzw. szybkiego zapłonu ^{3, 4}. Był to nowy ważny kierunek badań plazmowych w kontekście zastosowań syntezowych. Zgodnie z tą koncepcją kompresja sferycznego pelletu (mikrosfery) i grzanie gęstego rdzenia powinny być realizowane oddzielnie, co pozwala zredukować ilość energii niezbędnej do

² S. Borodziuk, J. Kostecki, Studies of hypervelocity impact problem by means of laser-target experiments—a new approach, *Laser and Particle Beams* 8 (1-2), 241-245 (1990).

³ N.G. Basov, Y. Guskov, and L. P. Feoktistov, *J. Soviet Laser Research* 13, 396 (1992).

⁴ M. Tabak, J. Hammer, M.E. Glinsky, W.L. Kruer, S.C. Wilks, J. Woodworth, E.M. Campbell, M.D. Perry, and R.J. Mason, *Phys. Plasma* s1, 1626 (1994).

uzyskania pozytywnego bilansu energetycznego w eksperymencie fuzyjnym - w porównaniu do konwencjonalnego układu z zapłonem centralnym. Wstępnie skompresowany rdzeń może być podgrzany do temperatur termojądrowych na kilka sposobów. Można do tego celu wykorzystać wiązkę wysokoenergetycznych cząstek (elektronów, protonów, jonów), bądź też odpowiednio wyprofilowaną falę uderzeniową („shock ignition”). Stosunkowo nową koncepcją jest tzw. „Impact Fast Ignition” (IFI) ⁵, kiedy to rolę zapalnika inicjującego rozwój reakcji termojądrowych spełnia strumień szybkich makrocząstek. Laserowa akceleracja makrocząstek/strumieni plazmowych jest bardzo ważnym elementem w zastosowaniach fuzyjnych a w szczególności w problemie IFI. Podstawowym problemem jest znalezienie wysokowydajnego nośnika („drivera”), który byłby zdolny do dostarczenia intensywnego impulsu energetycznego do odpowiednio skonstruowanej tarczy termojądrowej. I takim „driverem” może być bardzo szybka makrocząstka, która zderzając się z tarczą stałocielową przekazuje jej swoją energię kinetyczną.

Prace z cyklu habilitacyjnego generalnie wpisują się w ten wątek badawczy. Wszystkie eksperymenty, które były fundamentem tych prac - były realizowane wykorzystując układ laserowy znajdujący się w Pradze (PALS Research Centre, ASCR, 18200 Prague 8, Czech Republic). Było to możliwe dzięki temu, że na początku obecnego stulecia grupa fizyków z IFPiLM uzyskała dostęp do tego urządzenia, co stworzyło szanse realizacji nowych, interesujących, bardziej wszechstronnych i aktualnych badań w obszarze plazmy laserowej. PALS (Prague Asterix Laser System) - duży laser jodowy pozwala generować energię rzędu 600 J w impulsie subnanosekundowym ($\tau \sim 250\text{-}300$ ps). Eksperymenty prowadzone na PALS zaowocowały w kolejnych latach dużą ilością zrealizowanych programów badawczych i publikacjami w najlepszych czasopismach plazmowych. Pojawiła się szansa włączenia w międzynarodowy nurt badań związanych z akceleracją makrocząstek i strumieni plazmowych w kontekście zastosowań fuzyjnych. Prace ujęte w tym cyklu powstały dzięki eksperymentom wykonanym na PALS i zajmują się akceleracją makrocząstek/mikropocisków/strumieni plazmowych i fizyką procesów z tą akceleracją związanych. Stanowiły one znaczącą część szerokiego zakresu badań plazmy laserowej wykonywanych w grupie kierowanej przez prof. Tadeusza Pisarczyka, który przygotował też odpowiednie programy badawcze i uzyskał dla nich finansowanie. Bardzo ważnym projektem, który umożliwił grupie realizację badań plazmowych na układzie PALS był pierwszy projekt nr PALS/013 uzyskany w ramach konsorcjum Laser Lab-Europe w ramach 5 programu ramowego EU.

Projekt ten dotyczył zainstalowania najpierw trzykanałowego układu polaro-interferometrycznego a następnie wielokadrowego układu interferometrycznego i wykorzystania go do nowatorskich badań plazmy generowanej laserem. W sumie, w okresie ponad dziesięciu lat (od 2002 r.) grupa wykonała badania w oparciu o ponad 20 zatwierdzonych projektów finansowanych przez LaserLab-Europe, KBN, MNiSzW, NCN oraz projektów „keep-in-touch” activity w ramach programu Asocjacji EURATOM - IFPiLM dofinansowywanego także przez Komisję Europejską. Habilitant uczestniczył w realizacji zdecydowanej większości (18) ww. projektów.

Jednotematyczny cykl publikacji związany z powyższą tematyką obejmuje następujące publikacje:

- B1. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk., K. Rohlena, J. Ullschmied, M. Kalal, J. Limpouch, P. Pisarczyk, Application of laser simulation method for the analysis of crater formation experiment on PALS laser, Czechoslovak J. Phys. 53 pp. 799-810 (2003).

⁵ M. Murakami and H. Nagatomo, , *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 44, 67–75 (2005)

- B2. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, N. N. Demchenko, S. Yu. Gus'kov, V. B. Rozanov, M. Kalal, J. Limpouch, J. Ullschmied, K. Rohlena, J. Skala, V. N. Kondrashov, P. Pisarczyk: Application of the 3-frame interferometry and the crater replica method for investigation of laser accelerated macroparticles interacting with massive targets in the Prague Asterix Laser System (PALS) experiment, *Optica Applicata* 34,: 385-403, 2004.
- B3. **S. Borodziuk**, I. Ya. Doshch, S. Gus'kov, K. Jungwirth, M. Kalal, A. Kasperczuk, B. Kralikova, E. Krousky, J. Limpouch, K. Masek, M. Pfeifer, P. Pisarczyk, T. Pisarczyk, K. Rohlena, V. Rozanov, J. Skala, J. Ullschmied: Experimental and theoretical investigations of crater formation in an aluminium target in a PALS experiment, *Nukleonika* 49, 7-14, 2004.
- B4. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, S. Gus'kov, J. Ullschmied, B. Kralikova, K. Rohlena, J. Skala, M. Kalal, P. Pisarczyk, Investigation of plasma ablation and crater formation processes in the Prague Asterix Laser System laser facility, *Optica Applicata* 34 (1), 31-42, 2004.
- B5. S. Yu. Gus'kov, **Borodziuk S**, Kalal M, Kasperczuk A, Kralikova B, Krousky E, Limpouch J, Masek K, Pisarczyk T, Pisarczyk P, Pfeifer M, Rohlena K, Skala J, Ullschmied J: Generation of shock waves and formation of craters in a solid material irradiated by a short laser pulse *Quantum Electronics* 34 (11) 989-1003, NOV 2004.
- B6. M. Kalal, J. Limpouch, **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, N.N. Demchenko, S.Yu. Gus'kov, V.B. Rozanov, K. Rohlena, J. Skala, J. Ullschmied, V.N. Kondrashov, P. Pisarczyk: Investigation of the wavelength influence of the efficiency of macroparticles acceleration and craters creation in the PALS double targets experiment. *Czechoslovak Journal of Physics* 54, suppl. C, 415-420 (2004).
- B7. **S. Borodziuk**, N.N. Demchenko, S.Y. Gus'kov, K. Jungwirth, M. Kalal, A. Kasperczuk, V.N. Kondrashov, B. Kralikova, E. Krousky, J. Limpouch, K. Masek, P. Pisarczyk, T. Pisarczyk, M. Pfeifer, K. Rohlena, V.B. Rozanov, J. Skala, J. Ullschmied; High power laser interaction with single and double layer targets; *Optica Applicata* 35 (2):241-262 2005.
- B8. S. Y. Gus'kov, **S. Borodziuk**, M. Kalal, A. Kasperczuk, V. N. Kondrashov, J. Limpouch, P. Pisarczyk, T. Pisarczyk, K. Rohlena, J. Skala, J. Ullschmied; Investigation of shock wave loading and crater creation by means of single and double targets in the PALS-laser experiment;. *Journal of Russian Laser Research*, 26 (3), 228-244, 2005.
- B9. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, S.Yu. Gus'kov, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, M. Kalal, J. Skala, J. Limpouch, and P. Pisarczyk, Study of the conditions for the effective energy transfer in a process of acceleration and collision of the thin metal disks with the massive target, *Eur. Phys. J. D* 41 2 (2007) 311-317.
- B10. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk, Reversed scheme of thin foil acceleration, *Appl. Phys. Lett.* 93, 101502 (2008). **Opublikowana również w October 2008 issue of Virtual Journal of Ultrafast Science.**
- B11. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, T. Chodukowski, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk,

Cavity pressure acceleration: An efficient laser-based method of production of high-velocity macroparticles, Appl. Phys. Lett. 95, 231501 (2009). **Opublikowana również w January 2010 issue of Virtual Journal of Ultrafast Science.**

- B12. **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, Z. Kalinowska, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Ullschmied, E. Krousky, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk Forward and backward cavity pressure acceleration of macroparticles, Appl. Phys. Lett. **99**, 231501 (2011).

Zawarte w tytule cyklu określenie „zimne strumienie plazmowe” ma związek z faktem, że prace cyklu koncentrowały się na tej części tarcz stałociałowych, która w procesie akceleracji zachowuje wysoką gęstość i relatywnie niską temperaturę (w porównaniu z temperaturą ekspandującej w wyniku akcji lasera plazmy).

Powyższe publikacje, wraz z oświadczeniami współautorów, są dołączone do niniejszego autoreferatu, jako Załączniki Nr 4 i 5.

Pierwszy etap obejmuje zrealizowane eksperymenty i prace opublikowane w latach 2003 – 2007. Ich głównym celem było przygotowanie odpowiednich diagnostyk, wszechstronne badania i optymalizacja eksperymentów laserowej akceleracji makrocząstek/strumieni plazmowych dla szerokiego spektrum parametrów i geometrii badanych układów. Badano układy jedno- i dwuelementowe, tarcze płaskie i stożkowe; folie i dyski, stosowano różne materiały i różne sposoby konstrukcji tarcz; w szerokim zakresie zmieniano parametry tarcz (wymiały) i lasera (energię, intensywność, wybór pierwszej bądź trzeciej harmonicznej). Aby lepiej zrozumieć fizykę zjawisk badania eksperymentalne były uzupełnione modelowaniem numerycznym wykonywanym za pomocą dwuwymiarowego kodu hydrodynamicznego ATLANT-He⁶ i analizami teoretycznymi. Badania były realizowane przez międzynarodowy zespół. Oprócz fizyków z IFPiLM (grupa kierowana przez prof. Tadeusza Pisarczyka) i strony czeskiej (PALS Research Center i Czech Technical University in Prague) brali w nich udział również fizycy rosyjscy z FIAN Moskwa (grupa prof. Sergeya Guskova). Wszystkie te eksperymenty akceleracyjne realizowane były w tradycyjny, powszechnie stosowany sposób, czyli wykorzystując klasyczną metodę ablacyjną. Cienkie tarcze foliowe przyspieszane ablacyjnie wiązką promieniowania laserowego o wysokiej intensywności stwarzają możliwość otrzymania bardzo szybkich (pow. 1×10^7 cm/s) makrocząstek i zastosowania ich w badaniach fuzyjnych.

Tego typu eksperymenty akceleracyjne można również wykorzystać do badania wielu istotnych problemów fizycznych plazmy laserowej takich jak: transfer energii, generacja ekstremalnie wysokich ciśnień i silnych fal uderzeniowych, produkcji kraterów itd. Niektóre z nich mogą być zastosowane do celów praktycznych (np. do modyfikacji właściwości fizycznych materiałów, produkcji diamentów itp.).

Badanie procesu akceleracji makrocząstek i wytwarzania kraterów było ważnym elementem pierwszego etapu prac realizowanych na układzie PALS. Przygotowano dwa rodzaje tarcz: pojedyncze aluminiowe tarcze masywne i tarcze podwójne składające się z 6 μ m folii Al i tarczy masywnej z tego samego materiału. Zastosowano odpowiednie metody diagnostyczne (trzykadrowa interferometria, wykonywanie replik i mikroskopowe pomiary kraterów.

⁶ Isakov A.B., Demchenko N.N., Lebo I.G., Rozanov V.B., Tishkin V.F., 2D Lagrangian code “ATLANT-HE” for simulation of plasma interaction with allowance for hot electron generation and transport, Proceedings of SPIE 5228, 143 (2003).

Zasadnicza część eksperymentu dotyczyła tarcz podwójnych. Pojedyncze tarcze masywne były potrzebne, jako punkt odniesienia. Porównując wyniki (głównie wielkość i kształt kraterów) można było optymalizować eksperyment z tarczą podwójną i wyciągać wnioski odnośnie wpływu przyjętych założeń i określonych parametrów (wymiały, zastosowane materiały i geometria tarczy podwójnej; energia i średnica ogniska wiązki laserowej) na przebieg eksperymentu.

W pracy **B1** badano proces wytwarzania kraterów w funkcji zmieniających się parametrów lasera. Wysokie energie lasera (do 600 J) pozwoliły na przeprowadzenie badań dla nowych warunków fizycznych, wykraczających poza obszar eksplorowany w badaniach wcześniejszych (np. wyjście poza obszar absorpcji klasycznej). Badania pozwoliły określić prawa skalowania (zależność objętości produkowanych kraterów od prędkości) dla prędkości „wirtualnych” makrocząstek przekraczających 1×10^7 cm/s.

Praca **B2** poświęcona jest zastosowaniu metod diagnostycznych przydatnych w badaniach problemu akceleracji cienkich tarcz foliowych. Główną diagnostyką zastosowaną do pomiaru prędkości była trzykadrowa interferometria. Jako uzupełniające stosowano pomiary mikroskopowe kraterów - odtwarzanie objętości i kształtu kraterów poprzez wykonanie ich replik. Nasze badania wykazały bardzo użyteczną rolę interferometrii, jako metody wizualizacji eksperymentu. Ta aktywna metoda diagnostyczna, pomimo swej złożoności (zarówno technicznej, jak i metodologicznej), jest bardzo użyteczna w tego typu eksperymentach. Z drugiej strony, stosunkowo prosta metoda replik do pomiarów parametrów kraterów również pozwala uzyskać wiele interesujących i ważnych informacji na temat oddziaływania wiązki laserowej i napędzonej makrocząstki z tarczą masywną. Obie te metody pozwalają lepiej zdiagnozować procesy transformacji energii impulsu laserowego w energię fali uderzeniowej generowanej w tarczy masywnej (eksperyment z tarczą pojedynczą), jak również transfer energii od napędzonej makrocząstki do tarczy masywnej (eksperyment z tarczą podwójną) a nawet, do pewnego stopnia, efektywność absorpcji promieniowania laserowego w plazmie. Połączenie tych metod diagnostycznych pozwala na uzyskanie niemal pełnego obrazu procesów badanych w eksperymencie przyspieszania cienkich folii.

Praca **B3** jest kontynuacją eksperymentów “laser jodowy – masywna tarcza Al”. Badano propagację fali uderzeniowej oraz zastosowano model teoretyczny do interpretacji procesu produkcji krateru przez wygenerowaną falę uderzeniową. Eksperymenty przeprowadzono dla szerokiego zakresu parametrów lasera (promieniowanie 1ω i 3ω o intensywnościach z zakresu 10^{13} do 10^{15} W/cm² i promieniach ogniska od 35 do 600 μ m). Wykorzystano prostą metodę analityczną, która w oparciu o utworzone kratery pozwala wyciągać wnioski odnośnie procesów fizycznych zachodzących w opisywanym eksperymencie. Istotną zaletą tej metody jest możliwość wykonania podstawowych pomiarów (objętość i wymiały kraterów) w bardzo precyzyjny sposób już po zakończeniu właściwego eksperymentu.

Uzupełnieniem publikacji (B1-B3) Były komunikaty konferencyjne:-

1. T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, K. Jungwirth, B. Kralikova, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, J. Ullschmied, M. Kalal, J. Limpouch, P. Pisarczyk; *Application of the Laser Simulation Method of Crater Creation in the Laser-Al Solid Target Experiment on the PALS Facility*, French – Polish Seminar on Plasma, Bordeaux, France (2003).
2. T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, S. Gus'kov, I.Ya. Doskach, V. Rozanov, J. Ullschmied, K. Jungwirth, B. Kralikova, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer,

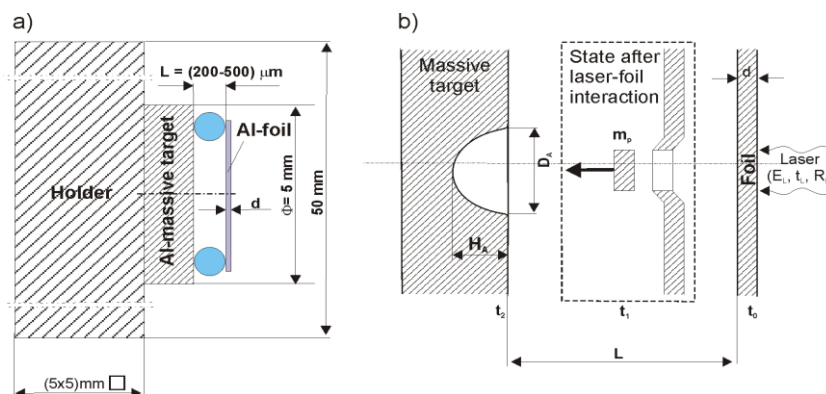
K. Rohlena, J. Skala, M. Kalal, J. Limpouch, P. Pisarczyk; *Experimental and Theoretical Investigations of Craters Formation in Solids in PALS Experiments*. CD of Proceedings, PLASMA 2003, September 9 – 12, Warsaw, Poland (2003).

Praca **B4** - kontynuacja eksperymentów "laser jodowy – masywna tarcza Al". Poświęcona jest głównie badaniom absorpcji promieniowania laserowego, przekazu energii przez napędzany element do tarczy masywnej, generacji fali uderzeniowej i kraterów wytwarzanych w procesie zderzenia z tarczą masywną. Do interpretacji procesu produkowania krateru przez wygenerowaną falę uderzeniową wykorzystano model teoretyczny. Przeprowadzono badania procesów ablacyjnych i tworzenia kraterów w szerokim przedziale zmienności intensywności promieniowania laserowego i parametru $I\lambda^2$ aby zbadać wpływ różnych mechanizmów absorpcji promieniowania laserowego na procesy generacji fali uderzeniowej i formowanie kraterów. Stwierdzono, że dla tych samych parametrów impulsu laserowego (energia, intensywność, czas trwania) – wielkość krateru, charakteryzująca wydajność przekazu energii impulsu laserowego do fali uderzeniowej silnie rośnie wraz z malejącą długością fali promieniowania laserowego. W przypadku użycia pierwszej harmonicznej lasera jodowego i intensywności zmieniającej się w obszarze od poniżej do powyżej 10^{15} W/cm² odpowiada to sytuacji zmiany dominującego mechanizmu absorpcji z klasycznego (odwrotny bremsstrahlung) na absorpcję rezonansową. Ciekawym efektem zarejestrowanym dzięki pomiarom interferometrycznym były strumienie plazmowe formujące się w późniejszej fazie ekspansji plazmy ablacyjnej. Ten wątek był rozwijany z dużymi sukcesami w późniejszych badaniach nt. generacji strumieni („jetów”) plazmowych.

Praca doświadczalno - teoretyczna **B5** poświęcona jest głównie badaniom absorpcji promieniowania laserowego, przekazu energii lasera do tarczy masywnej, generacji fali uderzeniowej i wytwarzania kraterów. Intensywność zastosowanego impulsu lasera jodowego o energii $E_l = 100$ J była zmieniana w szerokim zakresie 10^{13} to 10^{16} W/cm² poprzez zmianę promienia ogniska. Wydajność przekazu energii promieniowania laserowego do fali uderzeniowej określano, jako funkcję intensywności i długości fali impulsu laserowego ale brano pod uwagę też inne czynniki takie jak: charakterystyki ekspandującej plazmy i propagację fali uderzeniowej w tarczy masywnej – uwzględniając również bardzo istotną rolę efektów dwuwymiarowych. Pokazano również, że pomiar parametrów tworzonych kraterów może być bardzo przydatną metodą pozwalającą określać podstawowe charakterystyki oddziaływania laser – tarcza takie jak absorpcja promieniowania, wydajność procesu konwersji zaabsorbowanej energii impulsu w energię wygenerowanej fali uderzeniowej oraz ciśnienie ablacyjne.

W pracy **B6** opisano badania efektywności procesów przyspieszania makrocząstek i tworzenia kraterów w zależności od długości fali lasera. Eksperyment przeprowadzono na układzie PALS wykorzystując dwie harmoniczne (1ω i 3ω) światła lasera jodowego i różne rodzaje tarcz Al. Stosowano pojedyncze tarcze masywne oraz tarcze podwójne składające się z folii lub dysku (o grubości 6 μ m) umieszczonych z przodu tarczy masywnej w odległości 200 albo 500 μ m. Tarcze były oświetlane impulsem laserowym ($E_l = 130$ J - dla obu harmonicznych). Prędkości przyspieszonych fragmentów folii lub dysków, rozkłady gęstości elektronowej strumieni plazmowych określano za pomocą trzykadrowej interferometrii. Dodatkowo, również kształty i wielkości kraterów uzyskano stosując technologię replik i pomiarów mikroskopowych. Badania te wykazały, że krótsza długość fali jest znacznie bardziej efektywna, to znaczy prędkość makrocząsteczek przyspieszanych za pomocą trzeciej harmonicznej jest 2-2,5 razy wyższa w porównaniu do pierwszej harmonicznej, a w przypadku wielkości kraterów różnica jest ~ pięciokrotna. Efektywność przyspieszenia makrocząstek i tworzenia krateru poprzez fragmenty folii i dyski są podobne, a w odniesieniu do objętości utworzonego krateru przez bezpośrednie działanie wiązki laserowej - do 60 % i 40 - 45% dla pierwszej i trzeciej harmonicznej, odpowiednio.

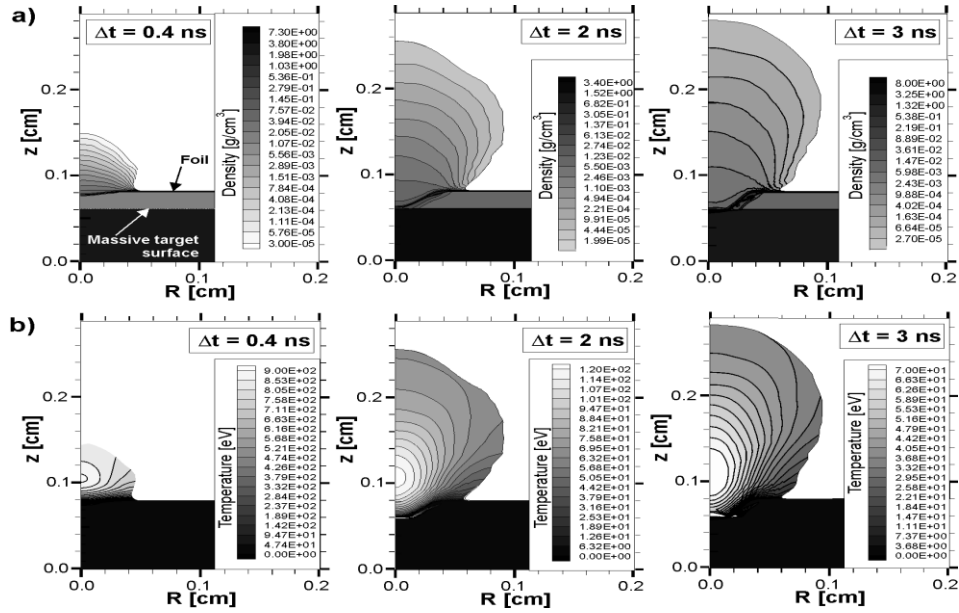
W pracy **B7** przedstawiono wyniki szerokiego zakresu badań laserowego naświetlania różnych tarcz (pojedynczych i podwójnych) i dwóch harmonicznych (1ω i 3ω). Przeprowadzono zarówno badania eksperymentalne jak i symulacje numeryczne procesów napędzania cienkich tarcz oraz wytwarzania kraterów. Modelowanie numeryczne, uzupełnione badaniami analitycznymi pozwoliły zinterpretować podstawowe procesy fizyczne takie jak absorpcja promieniowania laserowego, wydajność przekazu energii do naświetlanej tarczy, generacja fali uderzeniowej w wyniku zderzenia napędzonej makrocząstki z tarczą masywną. Eksperymenty wykonane na PALS pokazały, że proces ablacyjnego napędzania folii i formowania krateru silnie zależy od długości fali promieniowania oświetlającego tarczę podwójną – im krótsza jest długość fali tym większe uzyskuje się prędkości napędzanych folii oraz wymiary kraterów. Dla energii impulsu ~ 120 J i trzeciej harmonicznej promieniowania lasera jodowego ($\lambda=0.438 \mu\text{m}$) - maksymalne prędkości napędzanych osiągają wartość 1.5×10^7 cm/s, podczas gdy dla pierwszej harmonicznej ($\lambda = 1.31 \mu\text{m}$) są znacznie niższe i wynoszą około 6×10^6 cm/s. Natomiast objętości kraterów wytwarzane podczas oddziaływania fragmentu napędzanej folii z tarczą masywną w przypadku 3ω są około pięć razy większe w porównaniu z objętościami kraterów dla 1ω . Typowa konfiguracja eksperymentu z zastosowaniem tarczy podwójnej przedstawiona została na Rys. 2.



Rys. 2. Schemat tarczy podwójnej (a) stosowanej w eksperymentach akceleracji cienkich folii zderzających się z tarczą masywną (b).

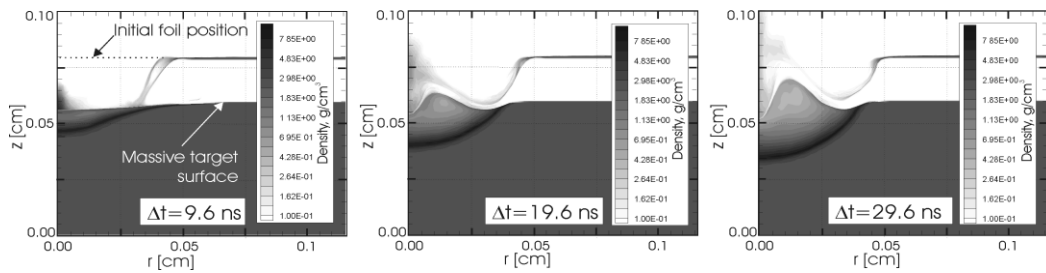
Rezultaty eksperymentów wykonanych na PALS analizowane i interpretowane były za pomocą dwuwymiarowego kodu hydrodynamicznego - ATLANT-HE. Symulacje numeryczne potwierdziły obserwowany w eksperymencie wzrost dynamiki napędzanego fragmentu folii i jego wpływ na proces formowania krateru w przypadku stosowania do oświetlania tarczy podwójnej krótszej długości fali promieniowania laserowego. Ponadto, modelowanie numeryczne dostarczyło informacji o udziale poszczególnych mechanizmów absorpcji i przekazy energii promieniowania laserowego do fali uderzeniowej w przypadku stosowania pierwszej i trzeciej harmonicznej promieniowania laserowego. O ile jakościowy obraz modelowania numerycznego procesu napędzania folii i formowania krateru można uznać za zadowalający to w szczególności obliczenia numeryczne nie pokrywają się w pełni z wynikami przeprowadzonych eksperymentów. Zasadnicze różnice dotyczą wymiarów kraterów (w szczególności ich głębokości) oraz prędkości napędzanych folii. Głębokości kraterów otrzymane drogą modelowania są około 25% mniejsze od ich wartości otrzymanych w eksperymencie. Natomiast, prędkości folii otrzymane z modelowania są ponad 50% wyższe od prędkości uzyskanych z pomiarów interferometrycznych. Mając na uwadze powyższe

różnice między modelowaniem numerycznym, a eksperymentem w ramach niniejszej pracy podjęto próbę dopasowania wyników obliczeń otrzymanych za pomocą 2D kodu do wyników uzyskanych w eksperymentach. Powyższy cel starano się zrealizować uwzględniając wpływ przewodnictwa cieplnego na procesy napędzania folii i formowania krateru. Przykładowe wyniki uzyskane drogą symulacji numerycznych pokazano na Rys. 3, który przedstawia początkową fazę eksperymentu – naświetlana impulsem lasera folia dociera do tarczy masywnej.



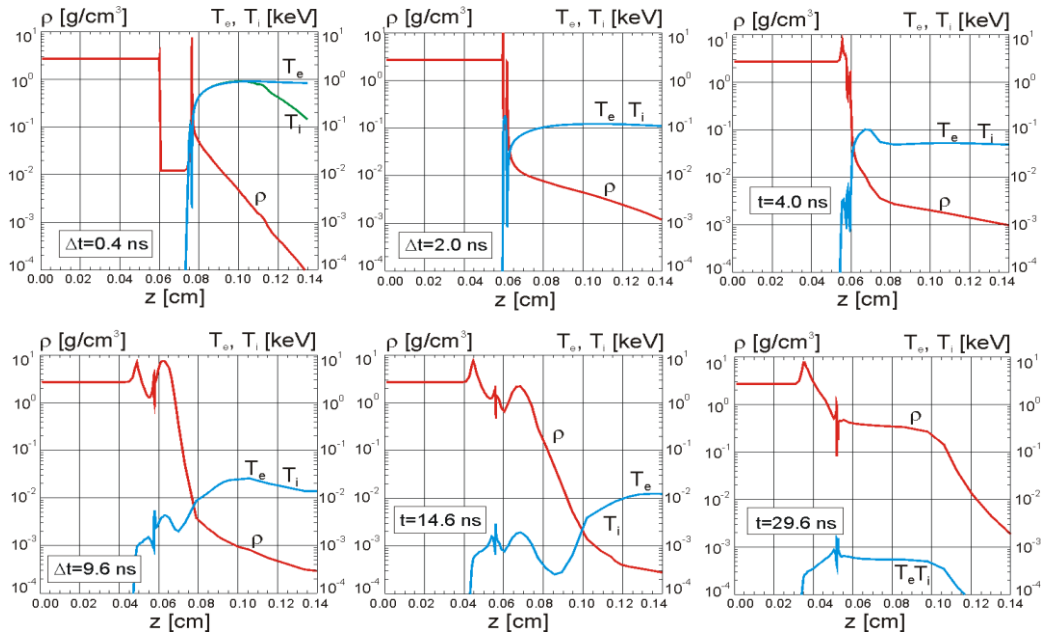
Rys. 3. Numeryczne modelowanie akceleracji 6 μm folii Al impulsem lasera jodowego o energii $E_l = 120 \text{ J}$. Folia umieszczona została w odległości 200 μm od tarczy masywnej a średnica ogniska wiązki $\phi_l = 250 \mu\text{m}$: a) gęstość, b) temperatura.

Poszczególne fazy tworzenia krateru przedstawiono na Rys. 4.



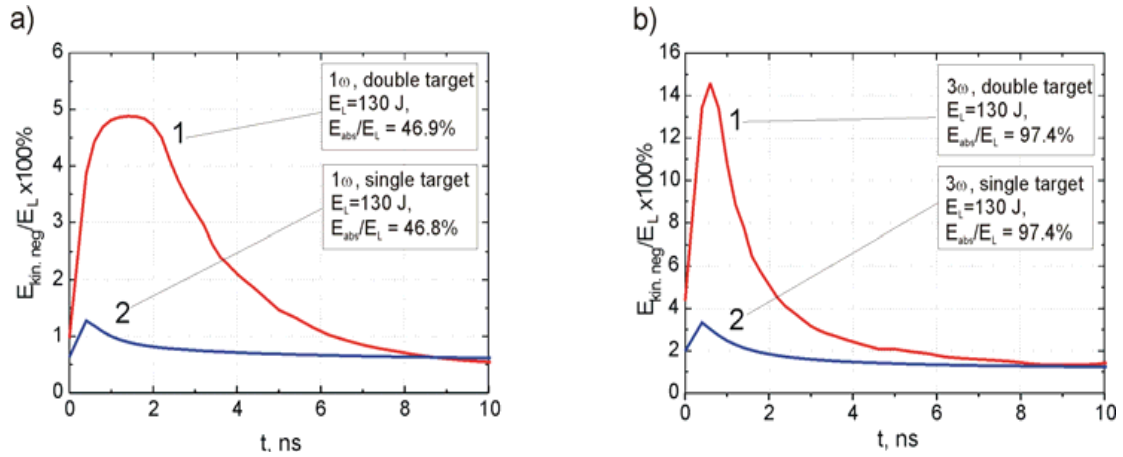
Rys. 4. Formowanie krateru po zderzeniu napędzonej 6 μm folii Al ($E_l = 120 \text{ J}$) z tarczą masywną Al. Sekwencja (a) cieniogramów pokazuje zmiany gęstości dla impulsu 1ω .

Rozkłady podstawowych parametrów plazmy (dla $r = 0$) pokazano na Rys. 5.



Rys. 5. Rozkłady podstawowych parametrów: gęstości ρ , temperatur – elektronowej T_e i jonowej T_i – otrzymanych w eksperymencie dla promieniowania 1ω i tarczy $6\ \mu\text{m}$ Al.

Porównanie wydajności hydrodynamicznych uzyskanych dla tarcz podwójnych i masywnych oraz dwóch harmoniczných lasera jodowego przedstawiono na Rys. 6.



Rys. 6. Porównanie wydajności hydrodynamicznych uzyskanych dla tarczy podwójnej w numerycznych eksperymentach akceleracji $6\ \mu\text{m}$ tarczy Al z przypadkiem bezpośredniego naświetlania tarczy masywnej.; a) – wariant 1ω , b) – 3ω .

Uzupełnieniem publikacji (B4-B7) były komunikaty konferencyjne:

1. S. Yu Gus'kov, **S. Borodziuk**, N.N. Demchenko, K. Jungwirth, M. Kalal, A. Kasperczuk, V.N. Kondrashov, J. Limpouch, T. Pisarczyk, P. Pisarczyk, K. Rohlena, V.B. Rozanov, J. Skala and J. Ullschmied. *Ablation loading efficiency and shock wave generation driven by powerful laser pulse of different wavelengths*. 28 th ECLIM, 266-270, September 6 – 10, Roma (2004).
2. M. Kalal, **S. Borodziuk**, N. N. Demchenko, S. Yu. Gus'kov, K. Jungwirth, A. Kasperczuk, V. N. Kondrashov, B. Kralikova, E. Krousky, J. Limpouch, K. Masek, P.

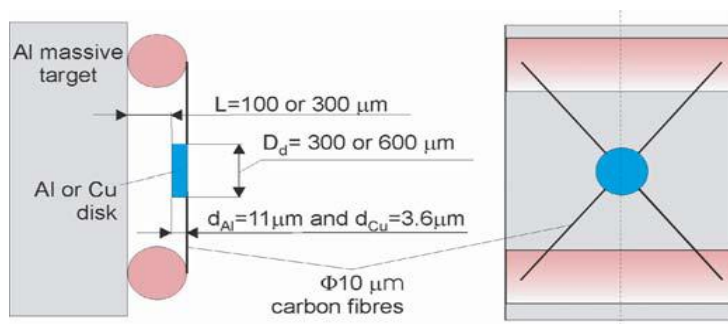
- Pisarczyk, T. Pisarczyk, M. Pfeifer, K. Rohlena, V.B. Rozanov, J. Skala, and J. Ullschmied: *High power laser interaction with single and double layer targets*. 28th ECLIM, 249-260, September 6 - 10, Roma (2004).
3. **S. Borodziuk**, N. N. Demchenko, S. Y. Gus'kov, K. Jungwirth, M. Kalal, A. Kasperczuk, B. Kralikova, E. Krousky, V. N. Kondrashov, J. Limpouch, K. Masek, M. Pfeifer, P. Pisarczyk, T. Pisarczyk, K. Rohlena, V. B. Rozanov, J. Skala, J. Ullschmied; Numerical modelling of strong shock waves and craters for the experiments using single and double solid targets irradiated by high power iodine laser (PALS); 32nd EPS Conference on Plasma Phys. Tarragona, 27 June - 1 July 2005 ECA Vol.29C, P-1.142 (2005).
 4. **S. Borodziuk**, N.N. Demchenko, S.Y. Gus'kov, K. Jungwirth, M. Kalal, A. Kasperczuk, B. Kralikova, E. Krousky, J.Limpouch, K. Masek, P. Pisarczyk, T. Pisarczyk, M. Pfeifer, K. Rohlena, V.B. Rozanov, J. Skala, J. Ullschmied; Flyer target acceleration and energy transfer at its collision with massive targets; International Conference Plasma 2005 & 3rd GPPD & 5 th FPSTP, Opole-Turawa, September 6-9, 2005, P4-08 (2005), AIP Conf. Proc.LN00A100.

Publikacja **B8** jest kontynuacją wcześniejszych prac związanych z akceleracją i wytwarzaniem kraterów w tarczach o różnych konstrukcjach. Eksperyment był wspomagany analizą teoretyczną wykonaną w oparciu o dwuwymiarowy model wytwarzania plazmy i generacji fali uderzeniowej pod wpływem działania ciśnienia ekspandującej plazmy. Badania potwierdziły, że bezpośrednie oświetlenie wiązką laserową tarczy masywnej jest najbardziej efektywną metodą tworzenia krateru w porównaniu z ablacyjną akceleracją fragmentów cienkiej folii zderzających się z tarczą masywną. Równocześnie jednak, metoda pośrednia akceleracji demonstruje pewne swoje użyteczne cechy, ponieważ poprzez zmianę grubości folii, ogniska wiązki laserowej, energii impulsu i odległości separacji naświetlanej folii i tarczy masywnej, możemy otrzymać szeroki zakres prędkości i rozmiarów (mas) napędzanych makrocząstek.

Zmierzone w eksperymencie prędkości dysków okazały się wyższe niż te otrzymane dla fragmentów folii, ale produkowane przez te wyrwane z folii fragmenty kraterów były większe. Co więcej, wzrost objętości kraterów produkowanych za pomocą dysków powyżej pewnego progu był mocno ograniczony a ich kształt był coraz bardziej nieregularny. Te wyniki można wyjaśnić uwzględniając dwuwymiarową ekspansję plazmy odparowanej z tarczy. Inny ważny wniosek z wykonanego eksperymentu i przeprowadzonej analizy dotyczy absorpcji, która zmieniła się w przeprowadzonym eksperymencie w granicach 40 – 60%.

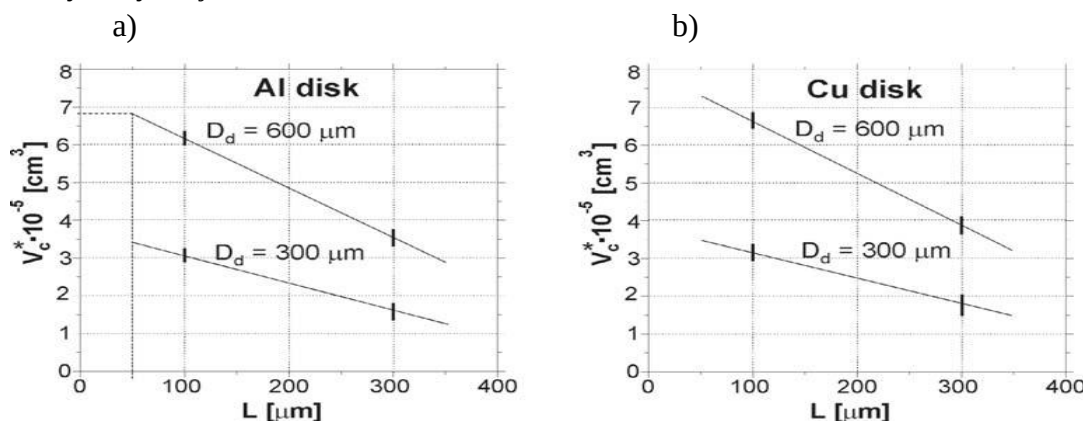
Publikacja **B9** dotyczy badań warunków efektywnego przekazu energii w procesie akceleracji i zderzenia cienkich metalowych dysków z tarczami masywnymi. Efektem takiej kolizji jest transformacja energii kinetycznej napędzonego dysku w energię termiczną, generację silnej fali uderzeniowej i ekstremalnie wysokich ciśnień w tarczy masywnej. Takie układy podwójne (napędzany mikropocisk zderzający się z tarczą masywną) mogą odgrywać znaczącą rolę w badaniach fuzji laserowej. Tego typu badania są również interesujące dla takich obszarów zastosowań jak wyznaczanie równań stanu dla materiałów w ekstremalnych warunkach (bardzo wysokie gęstości i temperatury), modyfikacja fizycznych właściwości materiałów itp.

Wcześniejsze eksperymenty były skoncentrowane na określeniu efektywności procesów akceleracji makrocząstek i tworzenia kraterów w zależności od: rodzaju makrocząstki (wyrwany fragment folii, względnie przygotowany pierwotnie dysk), zastosowana długość fali lasera (pierwsza bądź trzecia harmoniczna lasera jodowego). Brano również pod uwagę takie czynniki jak czasowy przebieg procesu akceleracji, końcowa prędkość uzyskiwana dla różnych grubości napędzanego fragmentu folii/dysku. W omawianym eksperymencie skupiono się głównie na określeniu wpływu przyjętej geometrii eksperymentu (średnica dysku, jego odległość od tarczy masywnej) i rodzaju zastosowanego materiału na efektywność procesu napędzania i zderzenia przekładającą się na wielkość wytwarzanych kraterów. W eksperymencie stosowano tarcze podwójne z dyskami Al i Cu podwieszonymi za pomocą czterech cienkich włókien węglowych (Rys. 7).



Rys. 7. Konstrukcja podwieszanych tarcz podwójnych.

Na Rys. 8. przedstawiono zależność objętości wytworzonych kraterów od dystansu separacji dysku i tarczy masywnej.



Rys.8. Zależność objętości krateru od parametru (dystansu) separacji dla dwóch dysków o różnych średnicach i wykonanych z: Al (a), względnie – Cu (b). Linie pionowe umieszczone w badanych punktach (przyjętych w eksperymencie odległościach separacji dysku i tarczy masywnej) informują o stopniu rozrzutu wielkości kraterów uzyskanych w poszczególnych strzałach.

Podstawowe wnioski:

- wielkość i kształt wytwarzanego krateru silnie zależą od średnicy napędzanego dysku
- wielkość i kształt wytwarzanego krateru są podobne dla dysków wykonanych z różnych materiałów – jeśli gęstości powierzchniowe są identyczne

- efektywność procesu wytwarzania krateru (jego objętość) silnie zależy od odległości pomiędzy dyskiem i tarczą masywną
- właściwy wybór parametrów dysku pozwala osiągnąć wielkość krateru na poziomie porównywalnym z kraterami otrzymywanymi w procesie bezpośredniego naświetlania tarczy masywnej.

Silną inspiracją dla innego spojrzenia na problem przyspieszenia mikropocisków stała się wspomniana wyżej nowa koncepcja zapłonu termojądrowego w komprymowanej laserem mikrosferze - „Impact Fast Ignition” [IFI] - czyli szybki zapłon zderzeniowy ⁵ i pierwszy eksperyment, w którym tę ideę, w pewnym zakresie, zrealizowano ⁷. W schemacie tym [IFI] w skomprymowaną mikrosferę uderza osobno napędzony mikropocisk (fragment specjalnie skonstruowanego targetu stożkowego), który spełnia rolę zapalnika inicjującego zapłon reakcji termojądrowych w całym układzie.

Zapalnik może skutecznie pełnić swoją rolę, gdy osiągnie prędkość $> 1 \times 10^8$ cm/s. W wyniku transformacji energii kinetycznej napędzonego mikropocisku w energię cieplną można osiągnąć niezbędną temperaturę plazmy > 5 keV. Stwarza to możliwość efektywnego rozwoju reakcji syntezy w komprymowanej plazmie i uzyskania pozytywnego bilansu energetycznego. Autorzy wskazywali na możliwość uzyskania współczynnika odzysku na poziomie ~ 100 już dla lasera o energii ~ 100 kJ, przy czym gęstość impaktora, która jest drugim wrażliwym parametrem tej reakcji, powinna osiągnąć w procesie zderzenia z komprymowaną mikrosferą wartość ~ 100 g/cm³. Eksperymentalne potwierdzenie tej idei miało miejsce kilka lat później, kiedy to stosując opisany wyżej schemat eksperymentu [IFI] – uzyskano 100-krotny wzrost produkcji neutronów.

Praca Murakamiego⁵ zaowocowała pomysłem, że również IFPiLM powinien spróbować dołączyć do tego nowego kierunku badań wykorzystując dostęp do układu PALS, który pomimo relatywnie słabszych parametrów w porównaniu np. do układu GEKKO w ILE Osaka (niższa dostępna energia, stosunkowo duża długość fali promieniowania lasera jodowego) stwarzał jednak możliwość przeprowadzenia ciekawych eksperymentów akceleracyjnych - pod warunkiem, że wyjdzie się poza tradycyjne schematy stosowane do tej pory.

W 2008 roku przygotowana została i zrealizowana nowa seria eksperymentów akceleracyjnych. Jej celem było

„Opracowanie i zastosowanie metody bardziej efektywnego napędzania mikropocisków/strumieni plazmowych”

Oczekiwania:

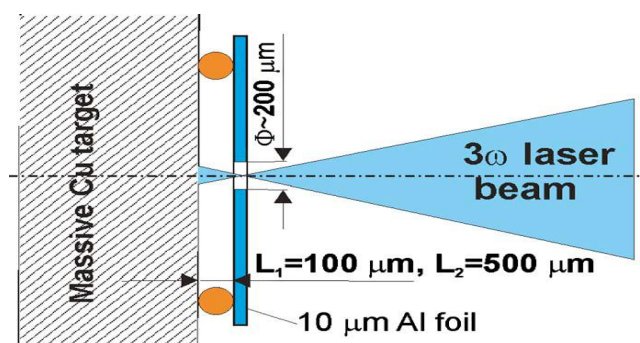
- uzyskanie, w podobnych warunkach eksperymentalnych, znacząco wyższych prędkości w porównaniu do klasycznej metody ablacyjnej, tzn. $v_p > 1 \times 10^7$ cm/s,
- wzrost gęstości napędzanych obiektów

Możliwe zastosowania: fuzja laserowa – szybki zapłon („impact fast ignition”), badania astrofizyczne, HEDP (fizyka wysokich gęstości energii), EOS (równania stanu).

⁷ H. Azechi, T. Sakaiya, T. Watari et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 235002 (2009)

Prace oznaczone jako B10 - B12 stanowią zasadniczą część cyklu habilitacyjnego. Prace te zostały wykonane zgodnie z pomysłem zaproponowanym przez habilitanta. Jego udziałem były również projekty tarcz i bezpośrednie zarządzanie eksperymentem.

W pracy B10 zaproponowano nowy schemat akceleracji cienkich tarcz foliowych (Rys. 9). Wykonany został eksperyment, w którym napędzono 10 μm folię Al. do prędkości 1.3×10^7 cm/s. Był to wynik o 60% wyższy niż osiągnięte wcześniej – w identycznych warunkach eksperymentalnych (te same parametry lasera, taka sama folia) – w tradycyjny sposób, poprzez bezpośrednie naświetlanie impulsem lasera (akceleracja ablacyjna).



Rys. 9. Schemat układu „Reversed Acceleration Scheme” (RSA – odwrócony schemat napędzania).

Istotą tego sposobu akceleracji jest to, że proces akceleracji jest dwuetapowy. Wiązka lasera przechodzi przez otwór w napędzanej folii i nagrzewa tarczę masywną. Ekspandująca z tej tarczy plazma jest „driverem” dla przyspieszanej folii. Wydajność hydrodynamiczna procesu jest znacznie wyższa niż w przypadku metody klasycznej, ponieważ to ekspandująca plazma właśnie jest głównym beneficjentem uczestniczącym w podziale energii.

Ważnym parametrem w tak skonstruowanym eksperymencie jest właściwy wybór dystansu, który oddziela napędzaną folię od tarczy masywnej. Powinien on być tak dobrany aby ta odległość umożliwiała dotarcie strumienia rzadkiej gorącej plazmy ekspandującej z tarczy masywnej do napędzanej folii w czasie nie dłuższym niż czas trwania impulsu laserowego ale równocześnie nie nadmiernie długi – ze względu na negatywne działanie tracącego swą gęstość strumienia plazmowego na wydajność hydrodynamiczną procesu akceleracyjnego.

Przewagi, jakie daje metoda odwróconego schematu napędzania (Reversed Accelerated Scheme = RAS) są następujące:

- znacząco wyższe prędkości osiągnięte (w tych samych warunkach eksperymentalnych) przez napędzany element targetu – w relacji do tych otrzymywanych w klasycznym ablacyjnym układzie akceleracji,
- napędzana masa pozostaje w przybliżeniu stała (nie zmniejsza się znacząco) – w przeciwieństwie do klasycznej metody ablacyjnej, w której wydajność hydrodynamiczna procesu zależy w bardzo istotny sposób od stopnia ablacji.

Ta przewaga metody RAS wynika z faktu, że napędzana folia ma tylko jeden wolny brzeg. Strumień ekspandującej plazmy działa jak tłok, który naciska na napędzaną folię i nie pozwala na ekspansję tego brzegu folii w próżnię. Efektem jest znacznie wyższa średnia gęstość folii, aniżeli ma to miejsce w tradycyjnym ablacyjnym układzie napędzania.

Zasadniczym celem tego eksperymentu nie było osiągnięcie rekordowych prędkości napędzanej folii. Był to raczej eksperyment demonstracyjny, który miał sprawdzić, czy poczynione założenia i przesłanki teoretyczne sprawdzają się w praktyce i czy nowa metoda w ogóle działa. Eksperyment przeprowadzono w najprostszej możliwej formie koncentrując się jedynie na samej istocie zaproponowanego schematu akceleracji. Eksperyment udowodnił, że zaproponowany mechanizm akceleracji działa – uzyskano znaczący wzrost prędkości napędzanej folii w porównaniu do wcześniejszych rezultatów osiąganych w porównywalnych warunkach klasyczną metodą ablacyjną. Ale to był tylko punkt startowy.

Kolejnym etapem była modyfikacja stosowanych targetów. Należało tak je przekonstruować, aby energia ekspandującej plazmy (driver) była jak najlepiej wykorzystana, aby zminimalizować straty (np. wypływ poprzeczny plazmy). Zgodnie z tymi założeniami opracowany został kolejny rodzaj targetu. Istotnym nowym elementem, który się pojawił była pułapka energetyczna („cavity”), która w zasadzie eliminowała poprzeczne straty energii i kierowała strumień ekspandującej plazmy bezpośrednio na napędzany element. Pierwsza z zaproponowanych konstrukcji była tak „skuteczna” (Rys. 10), że zaowocowało to eksplozją tarczy i (niestety) dość znacznymi stratami poczynionymi w układzie lasera i wykorzystywanej elektronice.



Rys. 10. Tarcza nowego typu, która eksplodowała.

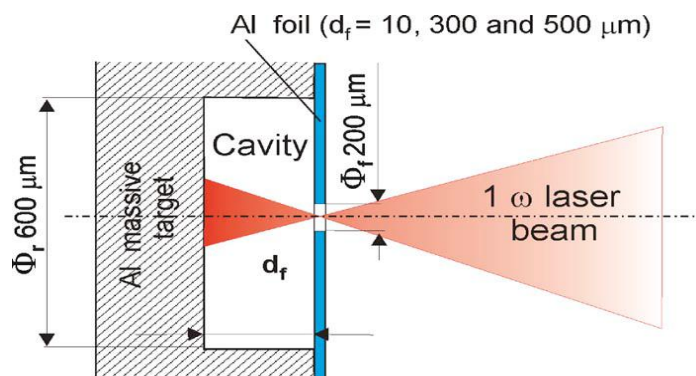
Wynikiem zdecydowanie pozytywnym zaistniałej sytuacji był natomiast wniosek, że możliwe jest skonstruowanie takiego targetu, w którym:

- **można wytworzyć bardzo wysokie ciśnienie** (zdecydowanie wyższe od generowanego w podobnych warunkach eksperymentalnych przy zastosowaniu tradycyjnej metody ablacyjnej),
- to ciśnienie może być wykorzystane do **napędzenia mikropocisku** (fragmentu folii, dysku) **w dowolnym kierunku!!!**

Oczywiście najbardziej naturalnymi wariantami są te wyznaczone przez tor wiązki laserowej, czyli „od lasera” i „w stronę lasera” ale w razie potrzeby można wybrać również inną geometrię.

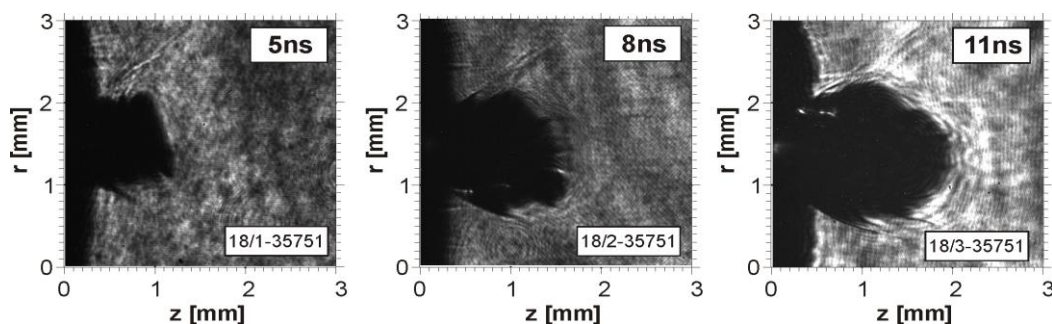
Wykonane zostały kolejne serie eksperymentalne. W oparciu o wcześniejsze doświadczenia dokonane zostały istotne zmiany. Dotyczyły one głównie konstrukcji targetu i polegały na wykorzystaniu efektu pułapki energetycznej („cavity”). Metodę nazwano „Cavity Pressure Acceleration” (CPA). Wykonano szereg strzałów lasera – zmieniając najbardziej istotne parametry (wymiary tarczy, energię lasera). Modyfikacja targetu (Rys. 11) dawała gwarancję

lepszego wykorzystania zaabsorbowanej energii, co przełożyło się na zdecydowany wzrost prędkości osiąganych przez napędzaną folię/dysk. Wyniki tej serii eksperymentów przedstawiono w pracy B11.



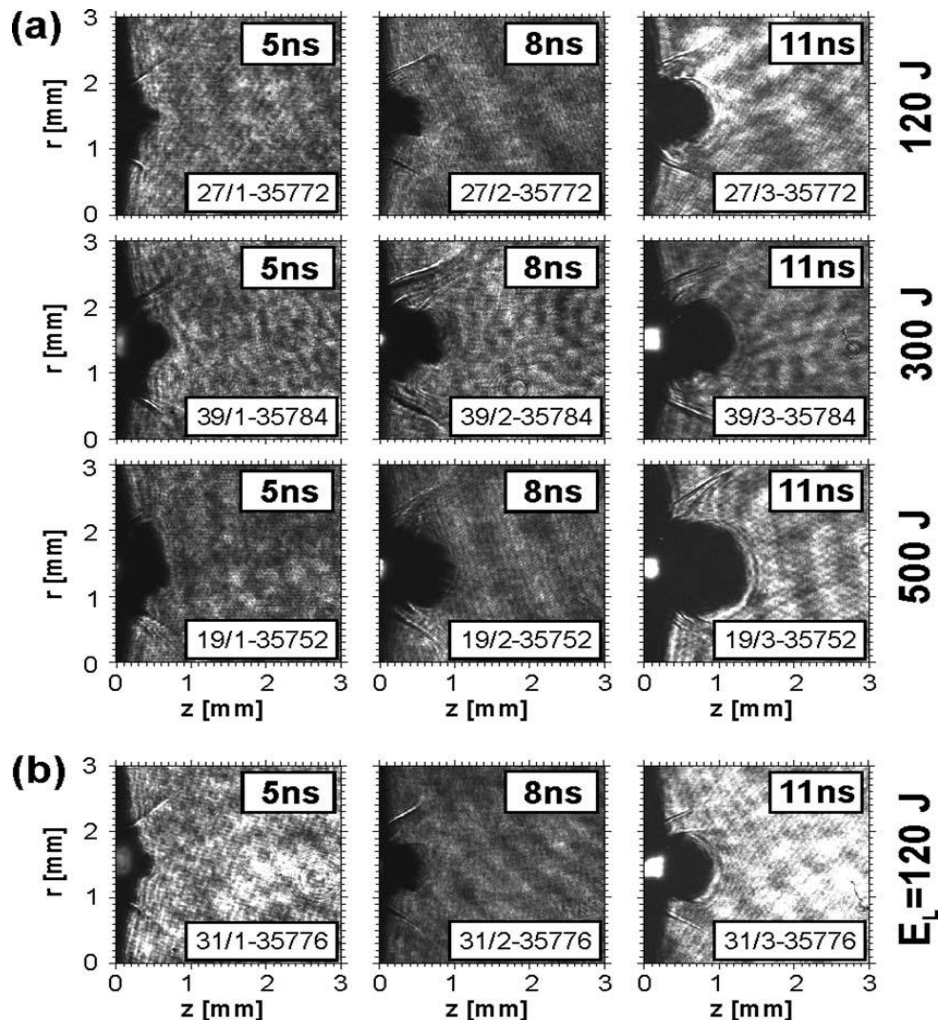
Rys. 11. Konstrukcja tarcz typu “cavity” – wykorzystanych w eksperymencie RAS.

Przykładowe rezultaty – sekwencję cieniogramów ilustrujących napędzanie 10 μm folii Al przedstawia Rys. 12.



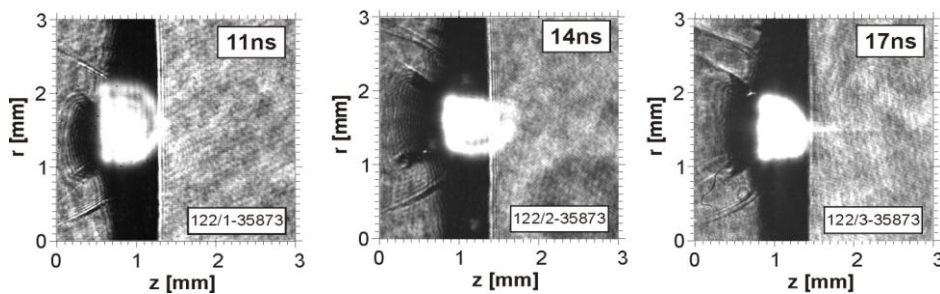
Rys. 12. Sekwencja cieniogramów dla 10 μm folii Al napędzanej impulsem lasera jodowego (pierwsza harmoniczna) o energii $E_l=500 \text{ J}$.

Analiza cieniogramów pozwalała oszacować prędkość napędzanej folii. Pamiętając o tym, że folia startuje z pewnym opóźnieniem, które można określić wybierając moment rejestracji pierwszego kadru (zależy ono oczywiście od parametrów lasera i tarczy) można było oszacować jej średnią prędkość. Dla pokazanego wyżej przypadku było to $\sim 3 \times 10^7 \text{ cm/s}$. Co więcej, początkowa prędkość była równa zero, więc prędkość maksymalna musiała być $\sim 5 \times 10^7 \text{ cm/s}$. Należy przy tym oczywiście pamiętać, że widoczne na cieniogramach przemieszczanie się granicy cienia daje faktycznie informację o prędkości warstwy o określonej gęstości a nie folii, jako całości. Ponadto, dla czasów $t \gg \tau_l$ następuje pozorne spowolnienie ruchu folii. Tak jednak nie jest a jedynie rozmywa się profil gęstości i coraz większa część napędzanej folii przestaje być widoczna dla prześwietlającej ją diagnostycznej wiązki lasera.



Rys.13. Sekwencja cieniogramów uzyskana dla 300 μm folii Al i trzech różnych energii impulsu (a) oraz dla 500 μm folii Al i energii $E_L = 120$ J (b).

Uzyskano również szereg innych interesujących rezultatów. Przykładowo - skutecznie **napędzono do prędkości $\sim 1 \times 10^7$ cm/s bardzo grube folie aluminiowe o grubości 300 i 500 μm** (Rys. 13), co wydaje się nie mieć odpowiednika w literaturze przedmiotu. Równocześnie, zastosowanie "klasycznej" metody ablacji do napędzenia folii Al. o grubości 300 μm dało wynik negatywny. Wysoka energia impulsu laserowego $E_L = 300$ J nie była w stanie spowodować jakiegokolwiek ruchu tej folii (Rys. 14).



Rys. 14. Eksperyment z wykorzystaniem „klasycznej” metody ablacji. Zestaw cieniogramów ilustruje próbę napędzenia 300 μm folii aluminiowej impulsem lasera o energii $E_L = 300$ J.

Porównanie wyników uzyskanych w eksperymencie (Rys. 13) z szacunkami teoretycznymi przedstawiono na Rys. 15.

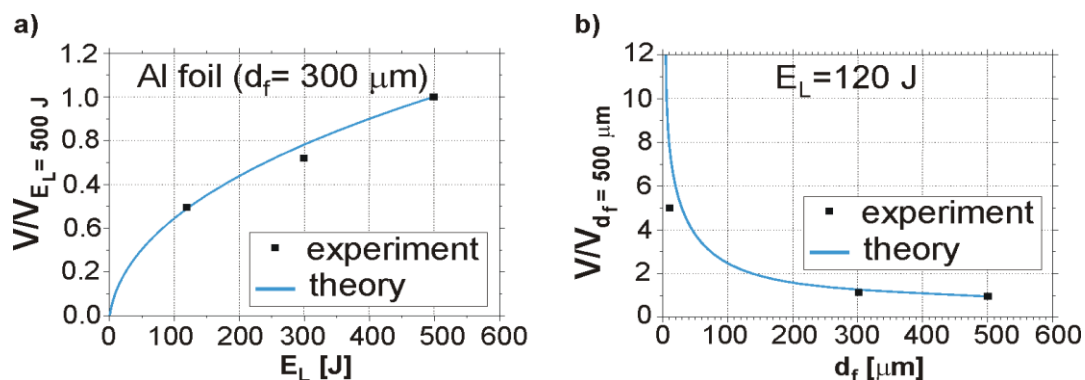
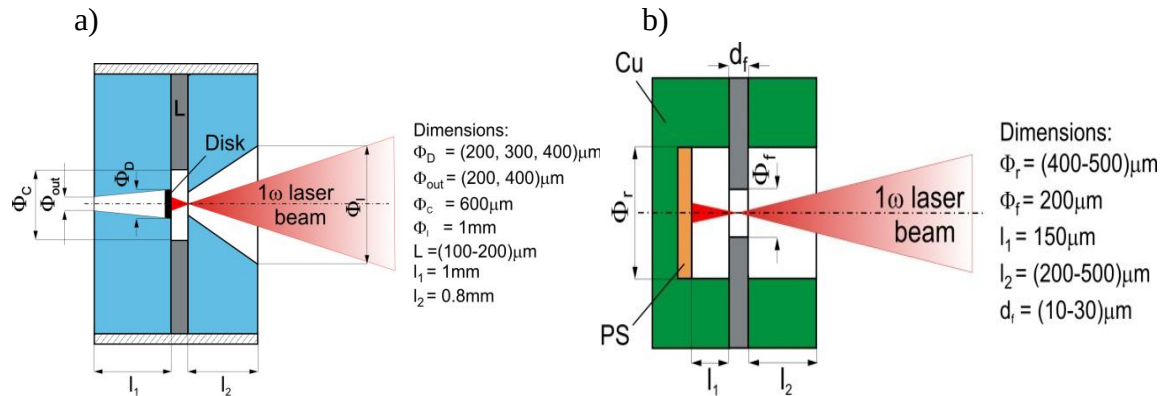


Fig. 15. Wykresy ilustrujące uzyskane wyniki eksperymentalne w relacji do przewidywań teoretycznych. Przedstawiają one zależności dla: a) prędkości (względnej) napędzanej 300- μm folii w funkcji energii impulsu laserowego, b) prędkości (względnej) folii Al napędzanej impulsem o energii 120 J w zależności od jej grubości.

Jak już wspomniano wcześniej – dwa podstawowe kierunki (schematy) napędzania, jakie wydają się oczywiste, to akceleracja „do przodu” („Forward Acceleration Scheme” – FAS) i „do tyłu” („Reversed Acceleration Scheme” – RAS) – w relacji do padającej na tarczę wiązki lasera. Wariant „do przodu” jest łatwiejszy do wykorzystania w eksperymentach typu „Impact Fast Ignition”, eksperyment „do tyłu” jest natomiast wyraźnie bardziej efektywny, na co wskazują zmierzone dla obu wariantów prędkości, jak również pewne przesłanki odnośnie osiąganych w obu przypadkach gęstościach. Ta różnica efektywności może być wytłumaczona w sposób następujący:

- w metodzie RAS akceleracja obiektu następuje w wyniku oddziaływania „tłoka” uformowanego z ekspandującej plazmy, który „zawłaszczył” zasadniczą część zaabsorbowanej energii i ponadto - nie pozwala na ucieczkę jednego brzegu napędzanego obiektu w stronę niskich gęstości i ubytek masy, który ma miejsce w klasycznym ablacyjnym mechanizmie akceleracji, co więcej – jest jego zasadniczym, nieodzownym elementem,
- metoda FAS jest raczej zmodyfikowaną metodą ablacyjną, aczkolwiek zastosowanie pułapki energetycznej znacznie poprawia absorpcję i ogólną wydajność procesu napędzania.

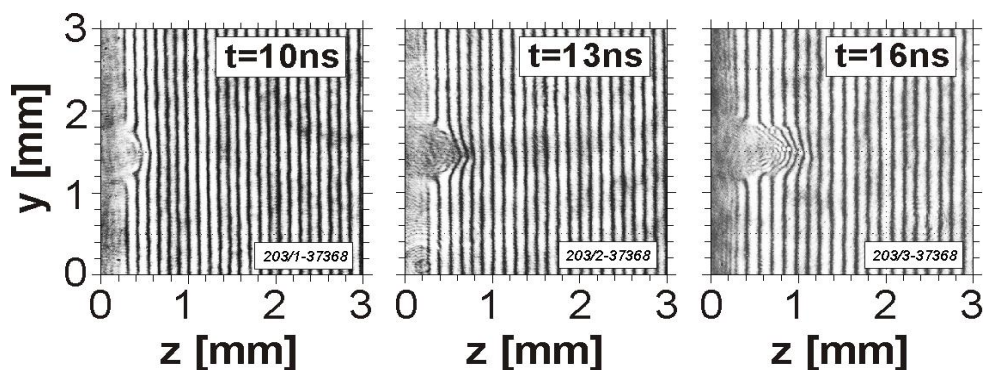
Trzeci etap realizacji programu CPA potwierdził te prawidłowości, jak również – poprzez kolejną modyfikację stosowanych tarcz – pozwolił uzyskać jeszcze lepsze wyniki. Modyfikacje te polegały m.in. na przesunięciu w głąb kanału napędzanego dysku (wariant RAS) i dodaniu umieszczonego w „cavity” lekkiego ablatora, dzięki któremu można było uzyskać jeszcze wyższe ciśnienie napędzające umieszczony w kanale obiekt. Na rys. 16 pokazane są dwie wersje stosowanych tarcz (odpowiednio FAS i RAS).



Rys.16. Rodzaje tarcz stosowanych w eksperymencie akceleryjnym – a) wariant „do przodu” (metoda FAS), b) wariant „do tyłu”(metoda RAS).

W pracy B12 przedstawiono nowe wyniki uzyskane w trakcie eksperymentu wykonanego na PALS. Została zastosowana metoda CPA i dwa różne sposoby przyspieszania mikropocisków („do przodu” i „do tyłu”). Najlepsze wyniki dla prędkości – $v_{\text{max}} \sim 1.0 \times 10^8 \text{ cm/s}$ uzyskano w eksperymencie akceleracji $20 \mu\text{m}$ folii polistyrenowej. Wynik ten świadczy również o osiągnięciu w tym eksperymencie bardzo wysokiej wydajności hydrodynamicznej, zdecydowanie przewyższającej wartości uzyskiwane w konwencjonalnych eksperymentach ablacyjnych. Dodatkowo, zastosowanie tarcz z „zakrytym kanałem” daje wyraźny wzrost gęstości przyspieszonej makrocząstki/strumienia plazmy wychodzących z kanału, co ma kluczowe znaczenie, z punktu widzenia możliwych zastosowań fuzyjnych (zderzeniowy wariant szybkiego zapłonu).

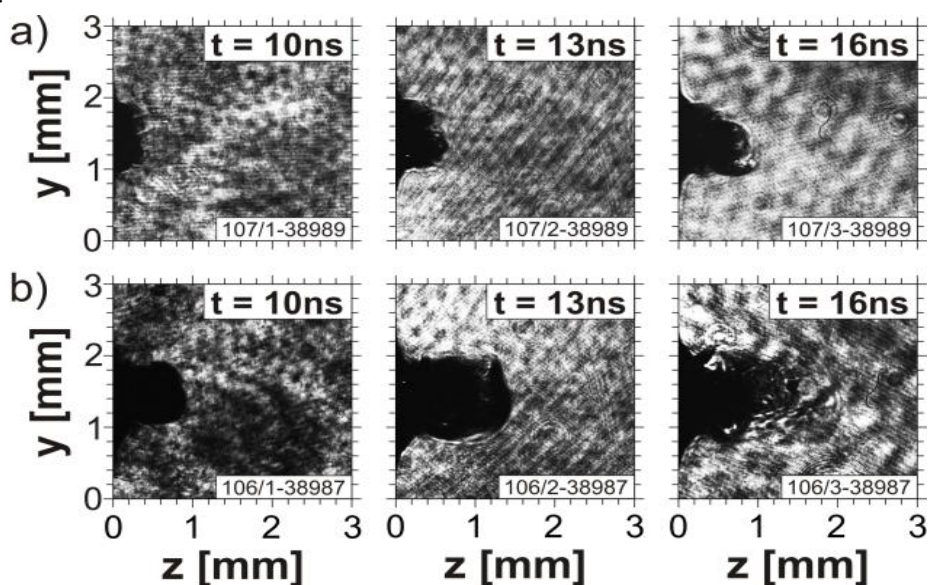
Jednym z bardziej interesujących wyników uzyskanych dla wariantu „do przodu” (FAS) była akceleracja grubego $50 \mu\text{m}$ dysku Al w kanale cylindrycznym, który to przypadek przedstawiono na Rys. 17. Po upływie niespełna 10 ns przyspieszona makrocząstka (gęsta zimna plazma) opuszcza kanał, co oznacza, że osiągnięta średnia prędkość jest rzędu $1.2 \times 10^7 \text{ cm/s}$.



Rys. 17. Sekwencja interferogramów dla 50- μm dysku Al przyspieszanego w cylindrycznym kanale o długości 1 mm przez pierwszą harmoniczną lasera jodowego ($E_1 = 300 \text{ J}$).

Prędkość uzyskana w eksperymencie akcelerycyjnym jest niewątpliwie najbardziej spektakularnym mierzonym parametrem, ale aby uzyskać duży przekaz energii w do nagrzewanej i komprimowanej mikrosfery w eksperymencie fuzyjnym również masa "impaktora" i jego gęstość muszą mieć jak najwyższe wartości. I ten aspekt eksperymentów typu IFI jest często pomijany i generalnie mało dopracowany.

Rys. 18. Ilustruje przypadek akceleracji 10 μ m dysku Al. Pokazane są dwie sekwencje cieniogramów uzyskane w dwóch różnych strzałach, ale wykonanych dla bardzo zbliżonych parametrów eksperymentalnych (takie same dyski Al. i energie impulsów $E_1 = 500$ J oraz bardzo podobna konstrukcja użytych tarcz). Jedyna istotna różnica jest taka, że dolna sekwencja cieniogramów została uzyskana dla tarczy z kanałem przykrytym cienką 1 μ m folią Al.



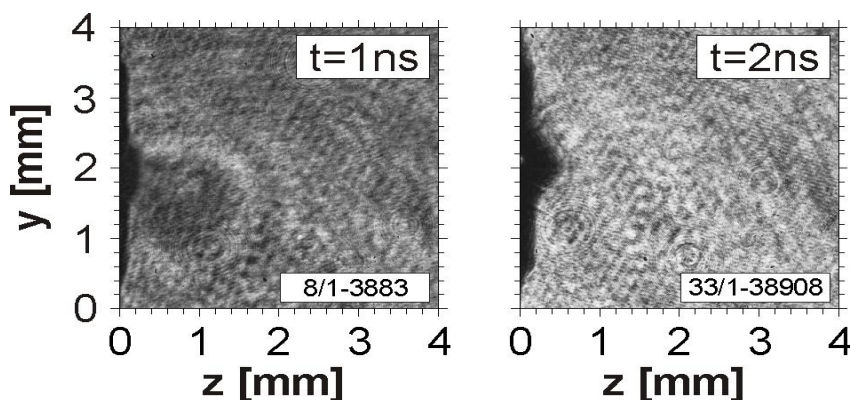
Rys. 18. Dwa zestawy cieniogramów dla 10- μ m dysku Al przyspieszanego impulsem lasera jodowego (1ω) o energii $E_1 = 500$ J. Cieniogramy w części a) odnoszą się do tarczy z "otwartym kanałem" i b) tarcza z "zakrytym kanałem".

Porównanie tych sekwencji cieniogramów pokazuje, że przykrycie kanału odpowiednio dobraną cienką folią daje bardzo pozytywny efekt. Dysk opuszczający zakryty kanał wydaje się mieć większą prędkość, co może wydawać się dziwne, ponieważ nie ma żadnych fizycznych przesłanek, aby prędkość napędzonej makrocząstki w zakrytym kanale mogła wzrosnąć. Wyjaśnienie tego zjawiska jest dość proste. Zimna plazma opuszczając otwarty kanał gwałtownie traci swoją gęstość na skutek ekspansji w półprzestrzeń. Wiązka laserowa interferometru „nie widzi” szybko rosnącej części plazmy o niskiej gęstości. W przypadku kanału zakrytego ta ekspansja jest spowolniona, energia plazmy przekazywana jest do zakrywającej kanał folii (o stałej gęstości), a to oznacza większą gęstość plazmy i większą gęstość energii makrocząstki.

Cienka folia zakrywająca kanał powoduje lokalną kompresję ekspandującej plazmy, co skutkuje, do pewnego stopnia, zmniejszeniem prędkości środka masy poruszającej się plazmy. Ruch granicy cienia obserwowany na cieniogramach daje informację o prędkości określonej gęstości warstwy, a nie przyspieszanego dysku (makrocząstki), jako całości. Mamy dwa efekty, które konkurują ze sobą. Prędkość makrocząstki (jej środka masy) jest nieco niższa, ale jej gęstość zdecydowanie rośnie. Gradient gęstości jest bardziej stromy (to jest ważne z punktu widzenia rejestrowanych cieniogramów) i sprawia wrażenie, że przyspieszona folia porusza się szybciej niż poprzednio (w otwartym kanale). I jeszcze jedną zaletą tej konfiguracji jest to, że folia ta nie jest przegrzewana i że podczas zderzenia może być generowana w niej bardzo silna fala uderzeniowa^{8,9}. Wszystkie te elementy oraz wysoka wydajność hydrodynamiczna osiągnięta w tego typu układzie z pułapką energetyczną stwarzają też unikalną możliwość uzyskiwania ekstremalnie wysokich ciśnień w folii przykrywającej kanał.

Druga sesja eksperymentalna została wykonana ze zmodyfikowanymi tarczami typu RAS (Rys. 16b). Impuls lasera jest wprowadzany do krótkiego kanału (200 – 500) μm , przechodzi przez otwór wykonany w folii i naświetla lekki ablator umieszczony na dnie komory wewnętrznej („cavity”). Ekspandująca z ablatora i ścianek bocznych plazma oddziałuje z folią i powoduje jej akcelerację. Taka konstrukcja tarczy powoduje uzyskanie wysokich ciśnień i w konsekwencji - wysokich prędkości napędzanych obiektów plazmowych.

Typowe wyniki uzyskane za pomocą zmodyfikowanej tarczy RAS pokazano na Rys. 19, w którym sekwencja dwóch cieniogramów (wykonanych dla dwóch różnych strzałów) przedstawia przemieszczanie 20 μm folii PS w dwóch wybranych momentach czasowych (1 i 2 ns - w relacji do maksimum impulsu laserowego). Wiązka laserowa ($E_l = 500 \text{ J}$) pada od prawej strony. Głębokość kanału jest równa 500 μm . Średnia prędkość może być oszacowana na poziomie $\sim (6-7) \times 10^7 \text{ cm/s}$.

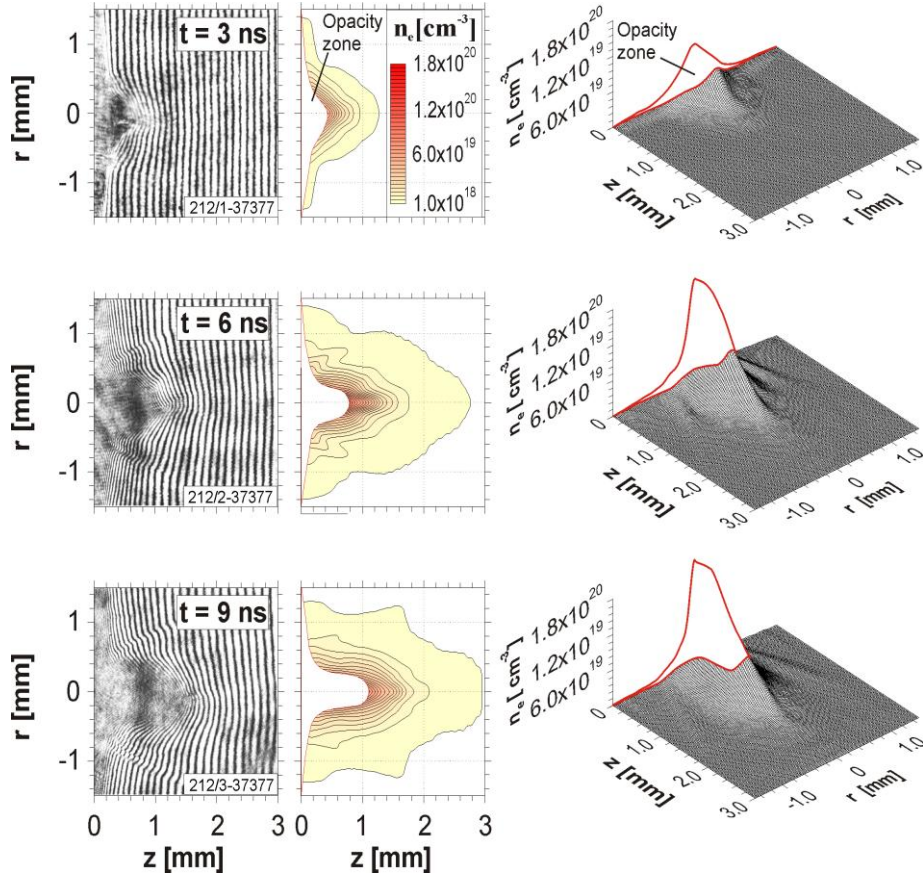


Rys. 19. Cieniogramy uzyskane dla przypadku akceleracji 20- μm folii PS naświetlanej impulsem lasera jodowego o energii $E_l = 500 \text{ J}$.

⁸ R. Fabbro, B. Faral, J. Virmont, and J. P. Romain, Phys. Fluids B 1(3), 644 (1989).

⁹ S. Borodziuk and J. Kostecki, J. Tech. Phys. 36(2), 173 (1995).

Porównywalne wyniki uzyskano dla 10 μm folii Al i podobnej konstrukcji tarczy. Sekwencja interferogramów przedstawiona na Rys. 20 jest z kolei dowodem nie tylko wysokich prędkości uzyskiwanych w procesie akceleracji, ale również wysokiej koncentracji elektronowej wypływającej z kanału plazmy.



Rys. 20. Sekwencje interferogramów i rozkładów gęstości elektronowej strumienia plazmy napędzanego metodą RAS dla 20 μm dysku PS i energią impulsu lasera $E_l = 500 \text{ J}$.

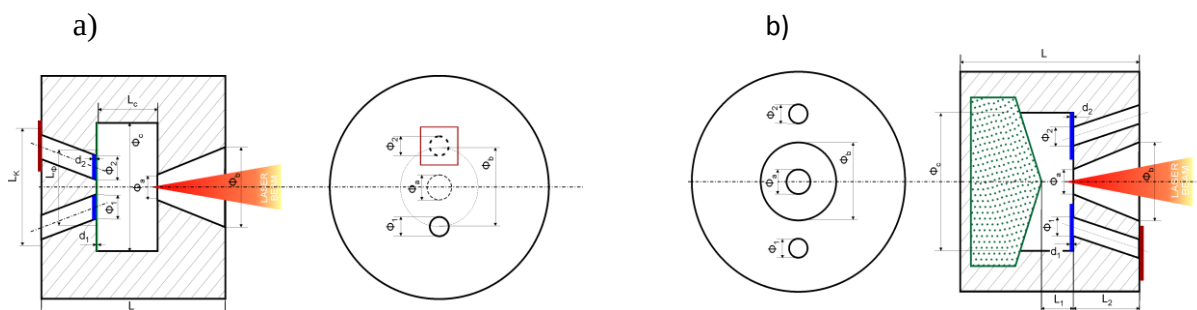
Koncentracja elektronowa tej plazmy była $\sim 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ i miała wyraźnie zarysowany ostry profil. Może to być uznane za dodatkowy pośredni dowód świadczący o wysokiej wydajności procesu akceleracyjnego. Pokazują to wyraźnie - sekwencja interferogramów jak również rozkłady koncentracji elektronowej, obliczone na podstawie tych interferogramów.

Podsumowując, CPA prowadzi (szczególnie w wersji RSA) do znacznie wyższych prędkości napędzanych folii, aniżeli te uzyskane w tradycyjny sposób (klasyczna metoda ablacyjna) w podobnych warunkach doświadczalnych. Najlepsze wyniki prędkości uzyskane na PALS są na poziomie najlepszych wyników światowych (NRL Waszyngton¹⁰, ILE Osaka⁷).

¹⁰ M. Karasik, J. L. Weaver, Y. Aglitskiy, T. Watari, Y. Arikawa, T. Sakaiya, J. Oh, A. L. Velikovich, S. T. Zalesak, J. W. Bates, S. P. Obenschain, M. Murakami, and H. Azechi, Phys. Plasmas 17, 056317 (2010).

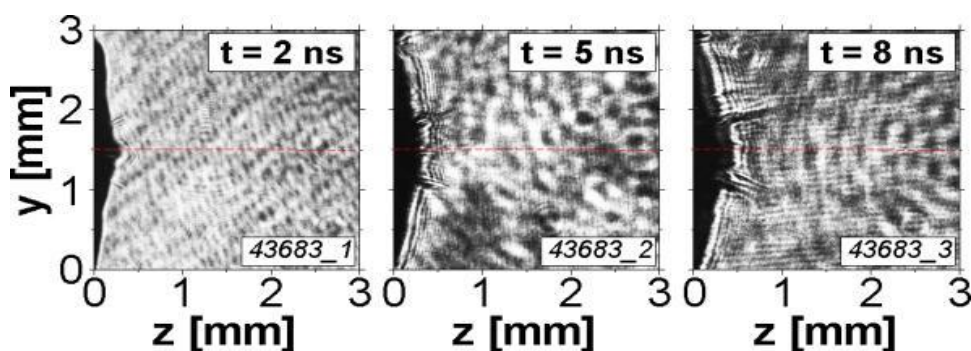
Jaka kontynuacja?

Skonstruowanie odpowiedniego zapalnika, który byłby w stanie skutecznie, z dużą wydajnością zainicjować reakcje termojądrowe w komprimowanej mikrosferze z paliwem DT jest ciągle na wczesnym etapie rozwoju. Co więcej, jak się wydaje, we wiodących laboratoriach plazmowych zajmujących się tym tematem (NRL Washington, ILE Osaka) dotychczasowe wysiłki zmierzały głównie w kierunku stosowania potężnych układów laserowych o jak najkrótszej długości fali generowanego promieniowania i uzyskania jak najwyższej prędkości przyspieszanych obiektów. Zdecydowanie mniej uwagi przykładano do problemu uzyskania wysokich gęstości „impaktorów”, bez których nie da się zrealizować wydajnie tej koncepcji. W eksperymentach wykonanych we wspomnianych laboratoriach uzyskane gęstości były $\sim 0.1 - 0.2 \text{ g/cm}^3$, - co najmniej o dwa - trzy rzędy wielkości za mało. Pewną próbą zbadania możliwości uzyskania znaczącego wzrostu uzyskiwanych gęstości akcelеровanych obiektów było wykorzystanie tarczy z zakrytym kanałem (Rys. 18). Kontynuacją tego eksperymentu było przygotowanie i zastosowanie tarcz nowego typu z dwoma kanałami. Tego rodzaju tarcza pozwala wyeliminować problem związany z nieco jednak innymi warunkami eksperymentu, jakie mają miejsce w przypadku dwóch strzałów lasera, co niewątpliwie utrudnia obiektywne porównanie uzyskanych wyników. I taką testową próbę z nowymi dwukanałowymi tarczami przeprowadzono na PALS. Przygotowane zostały dwa rodzaje konstrukcji tarcz dwukanałowych. Równolegle przyspieszone są dyski/strumienie plazmy w dwóch różnych kierunkach w stosunku do wiązki laserowej. Kąt pomiędzy osią wiązki laserowej i kanałem został wybrany, jako równy 30 stopni. Schematy dwukanałowych tarcz zostały przedstawione w dwóch wariantach na Rys. 21; a) - przyspieszenie „do przodu” (FAS) i b) - przyspieszenie „do tyłu” (RAS).



Rys. 21. Tarcza dwukanałowa; a) wariant „do przodu” (FAS), b) wariant „do tyłu” (RAS)

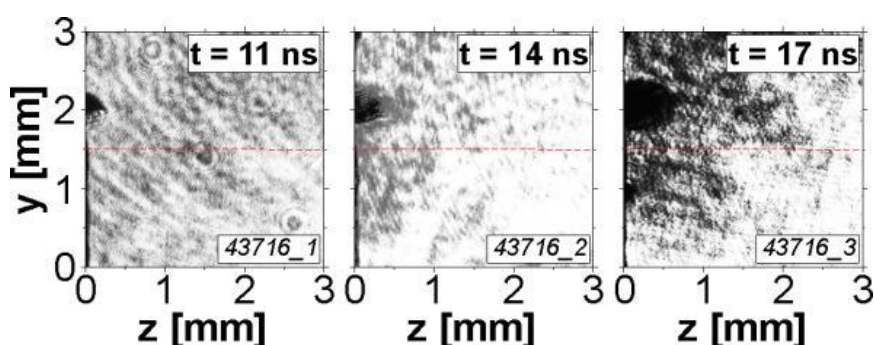
Tarcze te umożliwiają porównywanie dwóch różnych przypadków, w jednym strzale laserowym, a dodatkowo stwarzają możliwość przyspieszenia strumieni plazmy w dowolnych kierunkach. Tarcze dwukanałowe zastosowano do zbadania procesu przyspieszania cienkich $20 \mu\text{m}$ dysków PS – głównie pod kątem możliwości zwiększenia gęstości przyspieszonych obiektów. Sekwencja cieniogramów przedstawiona na Rys. 22 pokazuje proces przyspieszania dwóch $20 \mu\text{m}$ dysków PS (wariant „do tyłu”). Dolny kanał jest zakryty $2 \mu\text{m}$ folią Cu. Po 2 ns (Rys. 22) można zauważyć, że dominującą cechą tego procesu jest plazma ekspandująca wzdłuż osi impulsu laserowego. Nie ma wpływu plazmy ze skośnych kanałów.



Rys. 22. Zestaw cieniogramów ilustrujących przyspieszenie dwóch 20 μm dysków PS w targcie dwukanałowym (wariant RAS) naświetlany impulsem 3 ω lasera jodowego o energii $E_l = 161$ J.

Ten obraz zmienia się na drugim cieniogramie i bardziej wyraźnie na trzecim. Nie widać już wypływu plazmy z centralnego otworu. Oznacza to, że został on już zamknięty i ewentualna niewielka ilość ekspandującej plazmy jest już zbyt rzadka, aby mogła być rejestrowana. Obserwujemy ruch przyspieszonych mikropocisków/strumieni plazmy niezakłócony przez inne procesy. Inny wniosek, który może być sformułowany w tym przypadku: folia przykrywająca dolny kanał jest zbyt masywna i wyraźnie spowalnia poruszający się mikropocisk - oznacza to, że odpowiedni dobór grubości i gęstości folii zakrywającej kanał jest istotnym problemem.

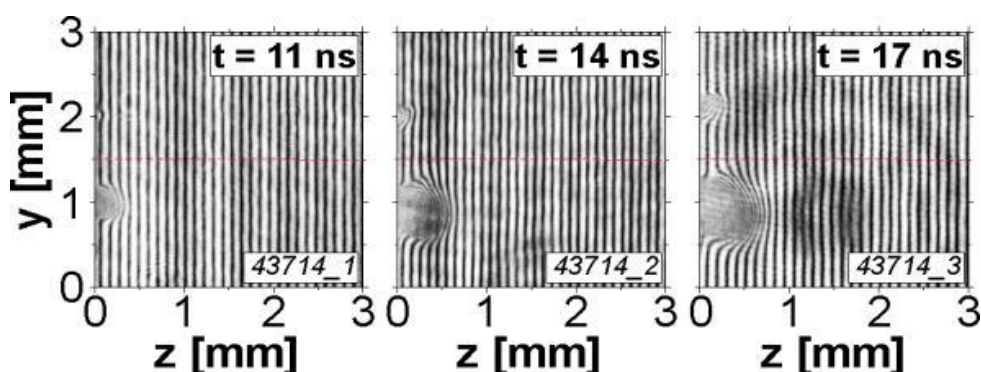
Głównym zadaniem eksperymentu było znalezienie prostej metody, która umożliwia zwiększenie gęstości mikropocisku bez znaczącego zmniejszenia jego prędkości. Wykonany został eksperyment, którego celem było sprawdzenie wyniku uzyskanego wcześniej za pomocą tarcz jednokanałowych i w dwóch różnych strzałach, ale bardzo podobnych parametrach. Uzyskano pełne potwierdzenie efektu znacznego wzrostu gęstości w kanale zakrytym cieką folią (o znacznie mniejszej gęstości powierzchniowej od tej, którą miał napędzany dysk). Na Rys. 23 przedstawiona została sekwencja trzech cieniogramów uzyskanych dla tarczy dwukanałowej.



Rys. 23. Zestaw cieniogramów ilustrujących wyniki przyspieszenia strumienia plazmy w tarczy dwukanałowej ($E_l = 276$ J).

Pokazują one przyspieszenie 20 μm dysku PS. Górny kanał został zakryty cieką 2 μm folią PS. Dysk (gęsta zimna plazma) opuszczający ten kanał wydaje się mieć większą prędkość, ale w rzeczywistości – tak jak to już wyjaśniono wcześniej - mamy do czynienia ze znacznym wzrostem gęstości. Szacunkowa ocena pokazuje, że ten wzrost gęstości w tym przypadku jest rzędu stu.

Zupełnie inny obraz procesu przyspieszenia wynika z Rys. 24.



Rys. 24. Zestaw interferogramów ilustrujących wyniki przyspieszenia strumienia plazmy w tarcie dwukanałowym ($E_1 = 280$ J).

Teraz, z punktu widzenia rozkładu gęstości elektronowej strumienia plazmy, bardziej interesujący wydaje się być przypadek "otwartego kanału". Nie ma interakcji mikropocisku/strumienia plazmy z folią - w przeciwieństwie do wariantu "zakrytego kanału". Wniosek jest taki, że temperatura plazmy, jej stopień jonizacji a więc i koncentracja elektronowa napędzonego obiektu są znacznie niższe w przypadku "zakrytego kanału". Grubość folii zakrywającej kanał musi być właściwie wybrana, tzn. powinna zapobiec szybkiemu rozrzedzeniu strumienia plazmy, ale jednocześnie folia ta nie może znacząco spowolnić przyspieszanego dysku pochłaniając zbyt dużo jego energii kinetycznej.

Wnioski

Zastosowano układ wykorzystujący pułapkę energetyczną, który pozwala napędzać obiekty w dowolnym kierunku w stosunku do padającej na target wiązki lasera, bardziej efektywne wykorzystanie zaabsorbowanej energii impulsu laserowego i zdecydowanie zwiększający ciśnienie przyspieszające folię. W rezultacie – uzyskuje się również znacznie wyższe wartości podstawowych parametrów przyspieszonego mikropocisku. Rośnie jego prędkość, gęstość, ciśnienie jak również współczynnik wydajności hydrodynamicznej. Metoda ta eliminuje, w dużym stopniu, podstawową sprzeczność występującą w klasycznym procesie przyspieszenia ablacyjnego, w którym uzyskanie wysokiej prędkości mikropocisku okupione jest utratą masy i spadkiem gęstości. Zastosowana metoda potwierdza możliwość uzyskania znaczącego wzrostu gęstości obiektu plazmowego opuszczającego kanał. Cienka folia zakrywająca kanał powoduje lokalną kompresję wychodzącej plazmy. Podczas kolizji, w folii zakrywającej kanał generowane jest ekstremalnie wysokie ciśnienie fali uderzeniowej (co można wykorzystać jako niezależny problem badawczy o wielorakich zastosowaniach). W efekcie można uzyskać prawie równie szybki, ale dużo bardziej gęsty obiekt plazmowy niż w przypadku otwartego kanału. Tarcze dwukanałowe umożliwiają uzyskanie wyników dla dwóch różnych przypadków doświadczalnych w jednym strzale lasera, co zmniejsza liczbę strzałów i koszty eksperymentu oraz sprawia, że wyniki są bardziej porównywalne.

Uzyskane w tym cyklu badań wyniki (opublikowane w pracach (B10 – B12) **pokazują, że zastosowanie metody CPA pozwala uzyskać prędkości napędzanych obiektów plazmowych $v_{\max} \sim 1.0 \times 10^8$ cm/s, porównywalnych z topowymi rezultatami światowymi (NRL Washington).** Co więcej, dotyczy to akceleracji grubszej folii 20 μm PS na PALS vs. 10.5 μm PS w NRL i zdecydowanie mniej korzystnych parametrów lasera (PALS energia E_1 :

~ 600 J vs. 1.0 kJ laser KrF) i przede wszystkim długość fali lasera (PALS $\lambda_{\text{iodine}} = 1.31 \mu\text{m}$ vs. $\lambda_{\text{KrF}} = 0.26 \mu\text{m}$ laser KrF w NRL). Wyniki te świadczą o bardzo wysokiej efektywności (wydajności hydrodynamicznej) zaproponowanej metody akceleracji (CPA) i potwierdzają możliwość wykonania ważnych i interesujących – również w aspekcie fuzyjnym – eksperymentów na układach laserowych o niższej energii i mniej korzystnych - z punktu widzenia tradycyjnej metody napędzania ablacyjnego - parametrach (zbyt duża długość fali promieniowania laserowego). Uzyskano też cały szereg innych istotnych wyników, które wskazują na duży potencjał tej nowej oryginalnej metody akceleracji makrocząstek/strumieni plazmowych. Można tutaj wymienić:

- **udaną próbę napędzenia bardzo grubych folii (500 μm Al) do prędkości $\sim 1.0 \times 10^7$ cm/s; wynik, który nie ma swojego odpowiednika w literaturze,**
- **wskazanie prostej skutecznej metody na znaczne podwyższenie gęstości napędzanych obiektów bez istotnego obniżenia ich prędkości poprzez zastosowanie tarcz z „zakrytym kanałem”, co prowadzi do znacznie wyższej gęstości energii przenoszonej przez napędzane obiekty i bardzo wysokiego generowanego przez nie ciśnienia, co z kolei jest bardzo ważnym atutem w aspekcie ewentualnego wykorzystania w eksperymentach fuzyjnych typu IFI.**

Testowe badania z nowymi tarczami dwukanałowymi pokazują, że **możliwe jest laserowe napędzanie obiektów plazmowych w dowolnym kierunku i ponadto, takie tarcze stwarzają możliwość porównania dwóch różnych przypadków w jednym strzale laserowym. Czyni to takie porównania bardziej obiektywnymi, a ponadto skraca czas wykonania zaplanowanej sesji eksperymentalnej, jak również obniża koszty jej przeprowadzenia.**

Wyniki zawarte w publikacjach B10 – B12 były też prezentowane na konferencjach:

1. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, T. Chodukowski, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk: *Indirect two-step method of acceleration, applied to metallic foils of different thickness*, 36th EPS Conference on Plasma Phys., Sofia, June 28 - July 3, P1-004 (2009).
2. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, T. Chodukowski, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk. *Metoda efektywnego napędzania makrocząstek do prędkości powyżej 1×10^7 cm/s*, XL Zjazd Fizyków Polskich, 6 – 11.09.2009, Kraków.
3. **S. Borodziuk**, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, T. Chodukowski, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk. *Cavity Pressure Acceleration – an efficient laser-based method of production of high-velocity macroparticles*. 31st European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM 2010), P97, September 6-10, Budapest (2010).
4. **S. Borodziuk**, J. Badziak, T. Chodukowski, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, Z. Kalinowska, J. Ullschmied, E. Krousky, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk: *Forward and Backward Cavity Pressure Acceleration of Macroparticles*, *Proc. of 7th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications*, Bordeaux, France, September 12-16, PTu-3 (2011).

5. **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, Z. Kalinowska, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Ullschmied, E. Krousky, J. Skala, P. Pisarczyk. *Fast and dense macroparticles accelerated by iodine laser radiation of PALS*. ECLIM, Warsaw, September 10 – 14, P2 (2012),

podczas Festiwalu Nauki Polskiej - wykład:

S. Borodziuk, *Laserowa akceleracja makrocząstek*, 27.09.2012 r., Warszawa

oraz na seminariach:

S. Borodziuk, *Hydrodynamiczna laserowa akceleracja gęstej materii i możliwości wykorzystania w "Impact Fast Ignition"*, IFPiLM, 23.04.2013, Warszawa,

S. Borodziuk. *Laserowe napędzanie mikropocisków/strumieni plazmowych - historia i stan obecny*, Sekcja Fizyki Plazmy PTF, 21.05.2013, Warszawa.

Prace dot. nowej metody akceleracji makrocząstek były podstawą do przyznania w 2010 roku **Nagrody Dyrektora IFPiLM za prace nt:**

„LASEROWA AKCELERACJA MATERII”

Ocena wkładu habilitanta w autorstwo prac ujętych w cyklu habilitacyjnym

Wszystkie publikacje wchodzące w skład cyklu habilitacyjnego powstały w wyniku prac prowadzonych przez duże zespoły badawcze. Oprócz fizyków z IFPiLM była to grupa czeska z PALS Research Center i Czech Technical University w Pradze oraz grupa prof. Sergeya Guskova z FIAN w Moskwie. Generalnie, fizycy z Czech zapewniali techniczną obsługę układu PALS i byli partnerami w licznych dyskusjach odnośnie uzyskanych wyników. Ponadto, w jednej z prac (B6) ujętych w cyklu, głównym autorem był prof. Milan Kalal. Grupa prof. Sergeya Guskova dawała nam (w wybranych pracach) wsparcie teoretyczne, dokonując interpretacji uzyskanych wyników poprzez analizy teoretyczne i modelowanie numeryczne. Prace B5 i B8 mają charakter głównie teoretyczny i ich głównym autorem jest prof. Sergey Guskov. Pozostałe prace: B1 – B4, B7, B9 – B12 powstały z inspiracji i przy głównym udziale habilitanta.

Mój wkład w autorstwo prac z cyklu habilitacyjnego oceniam następująco:

Publikacja B1: 60% (zaproponowanie koncepcji pracy, wykonanie obliczeń, analiza i interpretacja wyników, napisanie tekstu publikacji).

Publikacja B2: 40% (koncepcja pracy, przygotowanie projektów tarcz użytych w eksperymencie, analiza i dyskusja uzyskanych wyników, współautorstwo w pisaniu tekstu publikacji).

Publikacja B3: 40% (koncepcja pracy, przygotowanie projektów tarcz użytych w eksperymencie, analiza i dyskusja uzyskanych wyników, współautorstwo w pisaniu tekstu publikacji).

Publikacja B4: 40% (koncepcja pracy, analiza i dyskusja uzyskanych wyników, współautorstwo w pisaniu tekstu publikacji).

Publikacja B5: 20% (koncepcja pracy, analiza i dyskusja uzyskanych wyników, współautorstwo w pisaniu tekstu publikacji).

Publikacja B6: 30% (koncepcja pracy, analiza i dyskusja uzyskanych wyników, współautorstwo w pisaniu tekstu publikacji).

Publikacja B7: 50% (koncepcja pracy, przygotowanie projektów tarcz użytych w eksperymencie, analiza i dyskusja uzyskanych wyników, napisanie tekstu publikacji).

Publikacja B8: 30% (koncepcja pracy, przygotowanie projektów tarcz użytych w eksperymencie, analiza i dyskusja uzyskanych wyników, współautorstwo w pisaniu tekstu publikacji).

Publikacja B9: 60% (koncepcja pracy, przygotowanie projektów tarcz użytych w eksperymencie, analiza i dyskusja uzyskanych wyników, napisanie tekstu publikacji).

Publikacja B10: 70%

Publikacja B11: 70%

Publikacja B12: 70%

Publikacje B10 – B12 zajmują w omawianym cyklu pozycję szczególną. Powstały one dzięki zaproponowaniu całkowicie nowej koncepcji akceleracji laserowej. Mojego autorstwa jest również zaprojektowany do tych eksperymentów cały szereg oryginalnych tarcz. Byłem kierownikiem eksperymentów realizowanych według tej koncepcji. Dokonałem analizy i interpretacji uzyskanych wyników. Napisałem teksty publikacji.

Sumaryczny impact factor dla cyklu publikacji B1 – B12: IF = 16.06

Publikacje B1 – B12 wraz z oświadczeniami współautorów są dołączone do niniejszego referatu, jako Załączniki nr 4 i 5.

12. Inne osiągnięcia naukowo - badawcze

12.1. Generacja strumieni plazmowych

Jest to w dużym stopniu tematyka pokrewna do omawianej wyżej w cyklu habilitacyjnym. Podobnie, jak miało to miejsce w problemie akceleracji makrocząstek, zasadniczym celem tych eksperymentów była generacja skolimowanych obiektów (strumieni) plazmowych poruszających się z bardzo wysoką prędkością. Podstawowa różnica to znacząco inne parametry tego typu obiektów („jets”) - stosunkowo niska gęstość ale wysoka temperatura, a także sposób i warunki ich otrzymywania.

- J1. **S. Borodziuk**, A Kasperczuk, T Pisarczyk, S Gus'kov, J Ullschmied, B Kralikova, K. Rohlena, J. Skala, M. Kalal, P. Pisarczyk: *Investigation of plasma ablation and crater formation processes in the Prague Asterix Laser System laser facility*. Optica Applicata 34 (1), 31-42, 2004
- J2. A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, K. Rohlena, and J. Skala, H. Hora: *Stable dense plasma jets produced at laser power densities around 10^{14} W/cm²*. Physics of Plasma **13**, 062704 (2006).
- J3. Ph. Nicolai, V. T. Tikhonchuk, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, K. Rohlena, and J. Ullschmied: *Plasma jets produced in a single laser beam interaction with a planar target*. Physics of Plasma **13**, 062701 (2006).
- J4. Ph. Nicolai, V. T. Tikhonchuk, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, K. Rohlena, J. Ullschmied: *How produce a plasma jet using a single and low energy laser beam*. Astrophysics and Space Science, 307, 87-91 (2007).
- J5. A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, and **S. Borodziuk**, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, P. Pisarczyk: *The influence of target irradiation conditions on the parameters of laser-produced plasma jets*. Physics of Plasmas **14**, 032701 (2007).

- J6. A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, S. Yu. Gus'kov, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, M. Kalal, J. Limpouch, P. Pisarczyk: *Plasma jet generation by flyer disk collision with massive target*. Optica Applicata **XXXVII**, No. 1-2 (2007).
- J7. A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, **S. Borodziuk**, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk: *Interferometric investigations of influence of target irradiation on the parameters of laser-produced plasma jets*. Laser and Particle Beams **25**, 425-433 (2007).
- J8. A.Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, P. Parys J.Ullschmied. E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, and P. Pisarczyk: *Interaction of two plasma jets produced successively from Cu target*, Laser and Particle Beams **28**, 497-504 (2010).
- J9. A.Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, S. Yu. Gus'kov, N. N. Demchenko, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala and P. Pisarczyk: *Influence of low atomic number plasma component on the formation of laser-produced plasma jets*. Physics of Plasmas **17** 114505, (2010).
- J10. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, S. Yu. Gus'Kov, N. N. Demchenko, D Klir, J Kravarik, P Kubes, K Rezac, J Ullschmied, E Krousky, K Masek, M Pfeifer, K Rohlena, J Skala and P Pisarczyk: *Interaction of a laser-produced copper plasma jet with ambient plastic plasma*. Plasma Phys. Control. Fusion **53**, 095003 (2011).

Skolimowane wypływy i strumienie plazmy są przedmiotem dużego zainteresowania w badaniu zjawisk astrofizycznych i obserwowano je również w eksperymentach "laser – tarcza". Próby wygenerowania strumieni plazmowych, które byłyby podobne do tych znanych z astrofizyki przedstawiono w pracach ^{11, 12}.

Tarcze stożkowe wykonane z różnych materiałów naświetlano pięcioma wiązkami lasera Nova o czasie trwania impulsu 100 ps i energii każdej wiązki 225 J oraz sześcioma wiązkami lasera GEKKO - XII z tym samym czasem trwania impulsu i całkowitej energii $E_1 = 500$ J. Struktury typu „jet” powstawały na osi stożka w wyniku kolizji strumieni wypływających ze ścian tarczy. Ponieważ średnica generowanego strumienia rośnie wraz ze zmniejszającą się liczbą atomową materiału naświetlanej tarczy, autorzy zasugerowali, że powstanie struktur typu „jet” związane jest z tzw. ochłodzeniem radiacyjnym („radiative cooling”). Podobny eksperyment, przy użyciu dwóch wiązek laserowych, na początku tego wieku zrealizowano też na NIF w Livermore ¹³.

Struktury typu „jet” były również obserwowane w eksperymentach wykonywanych w IFPiLM i na PALS. Jak to już wcześniej wspomniano w pracy [B4], zostały one zarejestrowane za pomocą pomiarów interferometrycznych w późniejszym etapie rozszerzania plazmy ablacyjnej. W pracy tej, oznaczonej obecnie jako [J1] zaobserwowano, że pewne cechy wiązki lasera jodowego sprzyjają powstaniu strumienia plazmowego. To zjawisko może służyć badaniu fundamentalnych procesów zachodzących w gorącej gęstej plazmie. Co więcej, wydłużony strumień plazmowy może być brany pod uwagę, jako

¹¹ H. T. Powell, J. A. Caird, J. E. Murray, and C. E. Thompson, 1991 ICF Annual Report UCRL-LR-105820-91, 163 (1991).

¹² C. Yamanaka, Y. Kato, Y. Izawa, K. Yoshida, T. Yamanaka, T. Sasaki, T. Nakatsuka, J. Kuroda, and S. Nakai, IEEE J. Quantum Electron. **QE-17** (1981).

¹³ W. J. Hogan, E. I. Moses, B. E. Werner, M. S. Sorem, Nucl. Fusion **41**, 567 (2001).

dogodna konfiguracja dla propagacji i wzmocnienia spójnego promieniowania lasera rentgenowskiego. Pierwszy zaplanowany eksperyment generowania strumienia plazmowego na PALS [J2] wykonano w układzie „laser – masywna tarcza metaliczna” stosując impuls lasera o relatywnie niskiej energii ($E_l = 100 \text{ J}$). Stwierdzono, że pomyślny przebieg eksperymentu (generacja strumienia plazmowego) ma miejsce, jeśli zastosuje się promieniowanie o małej długości fali (np. 3 ω lasera jodowego), materiał tarczy o wysokim Z i duży promień ogniska wiązki lasera. Pokazano, że zmieniając ogniskowanie wiązki na tarczy można uzyskać strumień ponaddźwiękowy. W oparciu o doświadczenia uzyskane we wcześniejszych eksperymentach, można było stwierdzić, że sposób ekspansji plazmy zależy od poprzecznego rozkładu intensywności w ognisku wiązki promieniowania laserowego. Generalnie, konkluzja była taka, że można wyprodukować w prosty sposób stabilny, gęsty i szybki strumień plazmowy poprzez oddziaływanie impulsu laserowego z płaską tarczą wykonaną z odpowiedniego materiału. Podstawowe parametry strumienia plazmowego wytwarzanego w omawianym eksperymencie: prędkość równa $7 \times 10^7 \text{ cm/s}$ (odniesiona do koncentracji elektronowej $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), jego długość $\sim 2 \text{ mm}$ i promień równy $200 \text{ }\mu\text{m}$.

W kolejnych latach prace związane z generacją strumieni plazmowych były rozwijane. Podobnie, jak to miało miejsce w przypadku eksperymentów akceleracyjnych, również badania problemu generacji strumieni plazmowych były prowadzone przez międzynarodową grupę fizyków (grupa prof. Tadeusza Pisarczyka - IFPiLM, czeska grupa z Pragi, rosyjska grupa kierowana przez prof. Siergieja Guskova z FIAN w Moskwie i francuska grupa prof. Władimira Tikhonchuka z Uniwersytetu w Bordeaux (Centre Lasers Intenses et Applications – CELIA). W pracy [J3] przedstawiono laserowe eksperymenty tworzenia strumieni plazmowych i ich analizę numeryczną. Przy odpowiednio dobranych warunkach eksperymentu (intensywność promieniowania laserowego, średnica ogniska, liczba atomowa materiału tarczy) – można wygenerować strumień plazmowy z płaskiej tarczy o prostej konstrukcji. Czas życia takiego strumienia jest rzędu 10 ns , jego długość wynosi kilka milimetrów i prędkość około 500 km/s . Liczba Macha jest większa niż 10 a gęstość wynosi ponad $10^{18}/\text{cm}^3$. Wykonano symulacje numeryczne, które uwzględniały szereg czynników mających istotny wpływ na proces generacji strumieni plazmowych; uwzględniono m.in. wpływ ochłodzenia radiacyjnego, pola magnetycznego, jak również zmian sposobu ogniskowania. Przeprowadzona analiza wyników eksperymentu i symulacje numeryczne pozwalają stwierdzić, że dominujący wpływ na formowanie i kolimację strumienia plazmowego ma emisja promieniowania rentgenowskiego. Zweryfikowane zostały kryteria podobieństwa skalowania eksperymentu lasera do większych systemów. Za pomocą impulsu laserowego o stosunkowo niskiej energii (poniżej 500 J) można wyprodukować w laboratorium strumień plazmowy, który jest podobny do obiektów astrofizycznych, takich jak np. „protostellar jet” (wysokoskolimowany strumień plazmy produkowany przez młode gwiazdy). W omawianym eksperymencie wygenerowany strumień plazmowy przemieszcza się w próżni. W ten sposób kontrast pomiędzy strumieniem i gęstością materiału otoczenia jest znacznie większy niż jeden. Spadek tego wskaźnika jest interesujący dla zastosowań astrofizycznych oraz w kontekście ICF. To pozwala na zbadanie interakcji między astrofizycznym „jetem” i otaczającą go materią lub też modelować oddziaływanie pomiędzy komprimowaną mikrosferą DT i plazmy ablacyjnej emitowanej ze ścianek wykonanej ze złota kapsuły typu „hohlraum” w eksperymencie fuzyjnym ICF. Prostota i elastyczność tworzenia strumieni plazmowych w eksperymentach ablacyjnych rozszerza zakres

eksperymentu laboratoryjnego do większej gamy istniejących laserów. Stosując odpowiednią intensywność i długość fali lasera, odpowiedni skład materiału tarczy można realizować eksperymenty dostarczające istotnych informacji zarówno o ICF, ale też z obszaru astrofizyki. [J4]. Przy odpowiednio dobranych parametrach eksperymentu: intensywność promienia laserowego, promień ogniska i liczba atomowa materiału tarczy można wyprodukować intensywny strumień plazmowy nagrzewając płaską tarczę masywną impulsem promieniowania laserowego. Eksperyment wykonano na układzie PALS; wykorzystano pierwszą i trzecią harmoniczną lasera jodowego a energia impulsu była równa 100 J. Uzyskane w eksperymencie sekwencje interferogramów pokazywały generację „jetów” dla różnych zastosowanych tarcz. Wyniki eksperymentalne zinterpretowano za pomocą symulacji numerycznych, które wykonano używając do tego celu kodu hydrodynamicznego. Skoncentrowano się na przypadku tarczy miedzianej, parametry lasera odpowiadały tym użytym w eksperymencie. Symulacje numeryczne uzupełniono stosując analizę wymiarową. Tego rodzaju badania problemu generacji strumieni plazmowych można łatwo skalować do warunków astrofizycznych i badać zjawiska zachodzące w skali kosmicznej. Wyniki doświadczalne uzyskane we wcześniejszych pracach pozwalały stwierdzić, że formowanie strumieni plazmowych jest podstawowym procesem towarzyszącym ekspansji plazmy wytwarzanej w eksperymencie naświetlania płaskiej masywnej tarczy o relatywnie wysokim Z i częściowo rozogniskowaną wiązką lasera.

W kolejnym eksperymencie wykonanym na układzie PALS [J5] zastosowano masywne tarcze wykonane z miedzi, które naświetlano impulsem 3ω lasera jodowego o energii od 13 do 160 J i czasie trwania impulsu równym 250 ps. Do pomiarów rozkładów koncentracji elektronowej wykorzystano trzykadrowy układ interferometryczny. Formowanie strumieni plazmowych obserwowano w całym zakresie energii stosowanych w eksperymencie. To otwiera możliwość wytwarzania strumieni plazmowych i ich badania na układach laserowych o różnej wielkości. Stwierdzono, że efektywność produkcji strumieni plazmowych spada wraz ze wzrostem energii lasera. Zaobserwowano również, że wartości podstawowych parametrów strumienia plazmowego: jego prędkość, średnica, koncentracja elektronowa nie różnią się zbyt wiele nawet dla minimalnych i maksymalnych wartości energii stosowanej w eksperymencie.

W pracy [J6] badano problem generacji strumieni plazmowych w eksperymencie zderzeniowym przyspieszanego cienkiego ($6\text{ }\mu\text{m}$) dysku Al o średnicy $300\text{ }\mu\text{m}$ z tarczą masywną również wykonaną z aluminium. Zastosowane diagnostyki to trzykadrowa interferometria oraz technika replik i mikroskopowe pomiary kraterów. Wykonane pomiary wskazują, że podczas takiego zderzenia wytwarzany jest strumień plazmowy skorelowany z płaską falą uderzeniową propagującą się w tarczy masywnej. Taka forma fali uderzeniowej została wydedukowana na podstawie trapezoidalnego kształtu krateru powstałego w wyniku kolizji dysku z tarczą i odtworzonego po wykonaniu eksperymentu techniką replik. Możliwe wykorzystanie tego typu badań: problemy związane z fuzją termojądrową oraz symulacja wybranych zjawisk astrofizycznych.

W pracy [J7] badano wpływ sposobu oświetlenia tarczy na parametry generowanych strumieni plazmowych. Wykorzystano trzecią harmoniczną promieniowania lasera jodowego o energii zawartej w szerokim przedziale wartości 13 – 160 J. Promień ogniska wiązki laserowej zmieniano w granicach $35 - 600\text{ }\mu\text{m}$. W eksperymencie zastosowano płaskie tarcze

masywne wykonane z materiałów o wysokim Z , takich jak: miedź, srebro, tantal. Do pomiarów użyty został trzy-kadrowy układ interferometryczny. Obserwowano powstawanie strumieni plazmowych w całym zakresie użytych energii promieniowania laserowego. Prędkości generowanych „jetów” osiągały wartości do 7×10^7 cm/s a ich długość (wraz z podstawą) była rzędu 4 mm, przy średnicy wynoszącej 400 μm . Obliczenia wydajności produkcji strumieni plazmowych pokazały, że zmniejsza się ona wraz ze zwiększeniem energii lasera.

Wcześniejsze prace z omawianego cyklu wykonano w oparciu o prosty schemat generacji strumieni, polegający na naświetlaniu płaskiej tarczy masywnej o stosunkowo dużej liczbie atomowej przez częściowo nieostre wiązki laserowe. Praca [J8] ma na celu badanie oddziaływania dwóch strumieni plazmowych wygenerowanych kolejno z tarczy Cu. Główną uwagę zwrócono na rolę chłodzenia radiacyjnego w procesie powstawania strumienia plazmowego. W eksperymencie wykorzystano płaskie tarcze miedziane wyposażone w cylindryczny kanał o długości 5 mm i średnicy 400 μm , które były naświetlane impulsem lasera jodowego o energii 130 J (trzecią harmoniczną). Obserwowano dwa następujące po sobie strumienie plazmowe, z których pierwszy był wynikiem oddziaływania impulsu laserowego z powierzchnią tarczy a drugi był generowany w kanale przez centralną część wiązki, której średnica w ognisku wynosiła 800 μm . Do wykonania pomiarów zastosowano trzy różne diagnostyki, a mianowicie: trzykadrową interferometrię, smugową kamerę rentgenowską i zestaw kolektorów jonów.

W krótkim komunikacie [J9] przedstawiono metodę wytwarzania strumieni plazmowych za pomocą naświetlania tarczy masywnej wykonanej z materiału o wysokim Z za pomocą częściowo rozogniskowanej wiązki promieniowania laserowego. Badano oddziaływanie osiowo symetrycznej plazmy CH z plazmą wytworzoną ze znacznie cięższego materiału tj. miedzi. Zademonstrowano efekt kompresji plazmy Cu przez otaczającą ją lekką plazmę CH. Patrząc na problem bardziej ogólnie, tarcze skonstruowane w postaci osiowo-symetrycznych kombinacji elementów wykonanych z materiałów o różnych liczbach atomowych pozwalają uzyskać różne konfiguracje plazmy, takie jak: bardzo wąskie strumienie plazmowe, strumienie o przekroju rurowym oraz struktury w kształcie stożka.

Praca [J10] zajmuje się badaniem problem wzajemnego oddziaływania dwóch rodzajów osiowo-symetrycznych plazm: wytworzonej z plastiku (CH) i miedzianej, oraz wpływem na to oddziaływanie stosunku ich mas ablacyjnych. Z tego względu oświetlano tarczę wykonaną z plastiku i umieszczoną w niej cylindryczną wkładkę o średnicy 400 μm wykonaną z miedzi wiązką laserową o promieniu większym niż promień wkładki Cu. Przy takim ustawieniu eksperymentu możliwa była kontrola wzajemnych relacji mas i objętości obu rodzajów oddziałujących ze sobą plazm – poprzez zmianę średnicy wiązki laserowej. Eksperyment, podobnie jak wszystkie wcześniej omawiane, był realizowany na układzie PALS. Zastosowano trzecią harmoniczną lasera a impuls miał energię 130 J. Jako diagnostyki użyte zostały trzykadrowa interferometria i czterokadrowa kamera typu pinhole. Modelowanie numeryczne eksperymentu wykonano za pomocą programu ATLANT-HE. Zademonstrowano prosty sposób poprawiania własności generowanych strumieni plazmowych. Pokazano, że już dość cienka otoczka wykonana z lekkiego materiału, obejmująca wewnętrzną cylindryczną część z miedzi jest w stanie skompresować plazmę miedzianą i kontrolować wyprodukowany strumień plazmowy. Dzieje się tak z uwagi na wyższe ciśnienie generowane w lekkiej plazmie, która zaciska formujący się jet. Wykonane dodatkowo modelowanie

numeryczne i analizy teoretyczne tłumaczą te różnice ciśnień, jako efekt zasadniczo odmiennego sposobu ekspansji obu rodzajów plazmy.

W omawianym eksperymencie zastosowano trzy różne średnice ogniska naświetlającej je wiązki laserowej: 600, 800 i 1000 μm . Pierwsza z wymienionych wartości, przy której naświetlane powierzchnie obu elementów składowych tarczy były podobne okazała się być bardzo skuteczna, jeśli chodzi o kompresję plazmy Cu. Badania wykonane za pomocą wiązek laserowych o większej średnicy ogniska pozwoliły stwierdzić, że powoduje to akcelerację wygenerowanego strumienia plazmowego do prędkości o $\sim 50\%$ większych w porównaniu z prędkością konwencjonalnego strumienia oraz generację cylindrycznych fal uderzeniowych rozchodzących się radialnie w otaczającej plazmie.

Wyniki uzyskane za pomocą modelowania numerycznego pokazały, że ww. procesy wynikają ze złożonego charakteru ruchu oddziałujących plazm. Generalnie, konkluzja jest taka, że za pomocą odpowiednio skonstruowanych i wykonanych z różnych materiałów tarcz można modelować różne konfiguracje generowanych strumieni plazmowych i te strumienie mogą mieć wielorakie zastosowania, w tym np. w ICF i astrofizyce.

Mój wkład w realizację ww. prac z cyklu J1 – J10 oceniam następująco:

Publikacja J1: 40%. (koncepcja pracy, analiza i interpretacja wyników, uczestnictwo w pisaniu tekstu)

J2, J5 – J7 - 25% (współautorstwo w opracowaniu koncepcji pracy, przygotowaniu tarcz do eksperymentu, analiza i dyskusja otrzymanych wyników, współudział w pisaniu tekstu publikacji).

Papers J3, J4 – 10% (współautorstwo w opracowaniu koncepcji pracy, analiza i dyskusja otrzymanych wyników).

Papers J8 – J10 – 15% (współudział w opracowaniu koncepcji pracy i przygotowaniu tarcz do eksperymentu, analiza i dyskusja otrzymanych wyników). Wyniki badań generacji strumieni plazmowych były również prezentowane na konferencjach:

1. T. Pisarczyk, A. Kasperczuk, **S. Borodziuk**, Ph. Nicolai, V. Tikhonchuk, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, H. Hora, and P. Pisarczyk: *Investigations of plasma jets produced by action of a defocused laser beam on planar Metallic targets*. Proc. of 29th ECLIM, 441-446, June 11-16. Madrid, Spain (2006).
2. T. Pisarczyk, A. Kasperczuk, **S. Borodziuk**, Ph. Nicolai, V. Tikhonchuk, J. Ullschmied, E. Krousky, , M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, H. Hora, and P. Pisarczyk: *Investigations of plasma jets produced by action of a defocused laser beam on planar metallic targets*. 5th Kudowa Summer School, September 18-22 Kudowa Zdroj (2006).
3. T. Pisarczyk, A. Kasperczuk, S. Borodziuk, Ph. Nicolai, V. Tikhonchuk, , E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, J. Ullschmied, P. Pisarczyk: *Laser driven jet*, 34th EPS'2007, Warsaw, July 02-06, Warsaw, Poland (2007).
4. T. Pisarczyk, A. Kasperczuk, **S. Borodziuk**, Ph. Nicolai, X. Ribeyre, C. Stenz, V. Tikhonchuk, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, M. Kalal, D. Klir, J. Kravarik, P. Kubes, and P. Pisarczyk: *Formation of plasma jets and their interaction with ambient media*. 6th Kudowa Summer School, September 18-20, Kudowa Zdroj (2007).
5. J. Badziak, **S. Borodziuk**, T. Chodukowski, A. Kasperczuk, P. Parys, T. Pisarczyk, M. Rosiński, J. Wołowski, E. Krousky, , M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, J. Ullschmied,

- M. Kalal, Ph. Nikolai, V.T. Tikhonchuk, Ch. Stenz, P. Pisarczyk: *Investigations of laser-produced plasma jet formation and laser driven macroparticles acceleration for ICF and laboratory astrophysics applications*. LaserLab User Meeting, February 22 – 23, Paris (2010).
6. T. Chodukowski, A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, J. Badziak, **S. Borodziuk**, S.Yu. Gus'kov, N. N. Demchenko, D. Klir, J. Kravarik, P. Kubes, K. Rezac, J. Ullschmied, E. Krousky, K. Masek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, P. Pisarczyk: *Investigations of interaction of axially symmetrical light plastic plasma with heavy copper plasma*, Proc. of 7th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, PMo-9, Bordeaux, France, September 12-16, PMo-9 (2011).
 7. T. Pisarczyk, A. Kasperczuk, J. Badziak, T. Chodukowski, **S. Borodziuk**, Z. Kalinowska, P. Parys, M. Rosiński, J. Wołowski, O. Renner, E. Krousky, M. Pfeifer, J. Skala, J. Ullschmied, S. Yu. Gus'kov, N.N. Demchenko, P. Pisarczyk: *Recent investigations of laser-produced plasma jet formation and laser driven macroparticle acceleration for ICF and laboratory astrophysics applications*. LaserLab User Meeting, February 16–17, Szeged (2012).
 8. A. Kasperczuk, T. Pisarczyk, T. Chodukowski, Z. Kalinowska, **S. Borodziuk**, S. Yu. Gus'kov, N.N. Demchenko, D. Klir, J. Kravarik, P. Kubes, J. Ullschmied, E. Krousky, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, P. Pisarczyk: *Interactions of plastic plasma with different atomic number plasmas*. 8th IFSA 2013, Nara, Japan (2013).

Podziękowanie

Prace, o których jest mowa w przedstawionym wyżej autoreferacie powstały dzięki wiedzy, zaangażowaniu i dużemu wkładowi pracy wielu osób. W szczególności chciałbym podziękować moim kolegom z IFPiLM, którzy stanowili trzon zespołu realizacyjnego i z którymi ściśle współpracuję od wielu już lat: Tadeuszowi Pisarczykowi za wielki wysiłek organizacyjny i wkład naukowy w powstanie wszystkich prac wykonanych w oparciu o eksperymenty na układzie PALS i Andrzejowi Kasperczukowi – współautorowi wszystkich prac ujętych w cyklu habilitacyjnym, jak również współautorom - Janowi Badziakowi, Tomaszowi Chodukowskiemu i Zofii Kalinowskiej. Duży udział w powstaniu omawianych prac mają również: Sergey Guskov z FIAN Moskwa oraz grupa z Pragi: Jiri Ullschmied (ogromna życzliwość i nieoceniona pomoc w organizacji eksperymentów na układzie PALS), Eduard Krousky (aktywny uczestnik większości realizowanych eksperymentów), ekipa zabezpieczająca sprawne działanie układu laserowego (Jiri Skala, Miroslav Pfeifer) i jeszcze wiele innych osób, których praca i życzliwość były motorem napędzającym realizację prac zgodnie z zaplanowanym programem.

Stefan Borodziuk