DOI: 10.24425/academiaPAN.2024.152322

dr Witold Zawadzki

Pracuje w Zakładzie Fotoniki w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego. Zajmuje się plazmą i ultraszybką spektroskopią laserową. W laboratorium, jak sam mówi, „strzela z lasera w plazmę". Jego zainteresowania badawcze obejmują optykę atomową, fotonikę i technikę laserową. Angażuje się również w popularyzację fizyki – wykłady popularnonaukowe, warsztaty przyrodnicze, konkursy dla uczniów, np. Ogólnopolski Konkurs Fizyczny „Lwiątko", Ogólnopolski Konkurs Nauk Przyrodniczych „Świetlik". Jest współredaktorem czasopism „Foton" i „Neutrino" oraz aktywnym członkiem Polskiego Towarzystwa Fizycznego.

witold.zawadzki@uj.edu.pl

Pierwszy, a nie czwarty

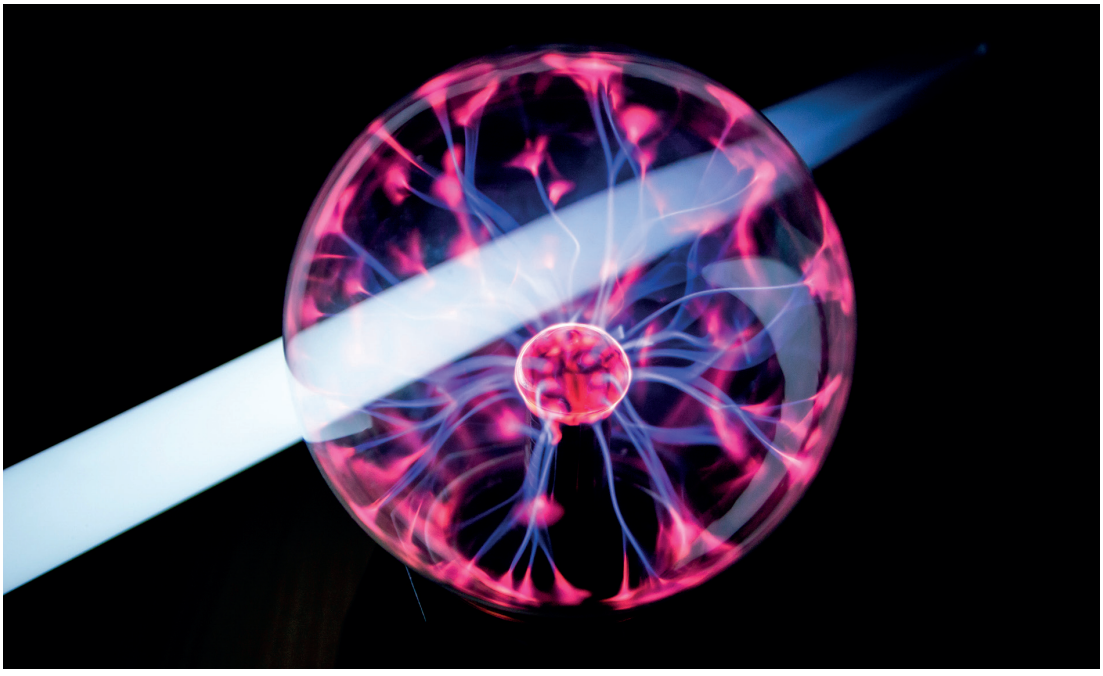
Gdy podczas wieczornego spaceru podziwiamy nieboskłon usiany tysiącami gwiazd, nie zdajemy sobie sprawy z tego, że te jasne punkciki to w rzeczywistości przeogromne kule materii znajdującej się w stanie plazmy.

Witold Zawadzki

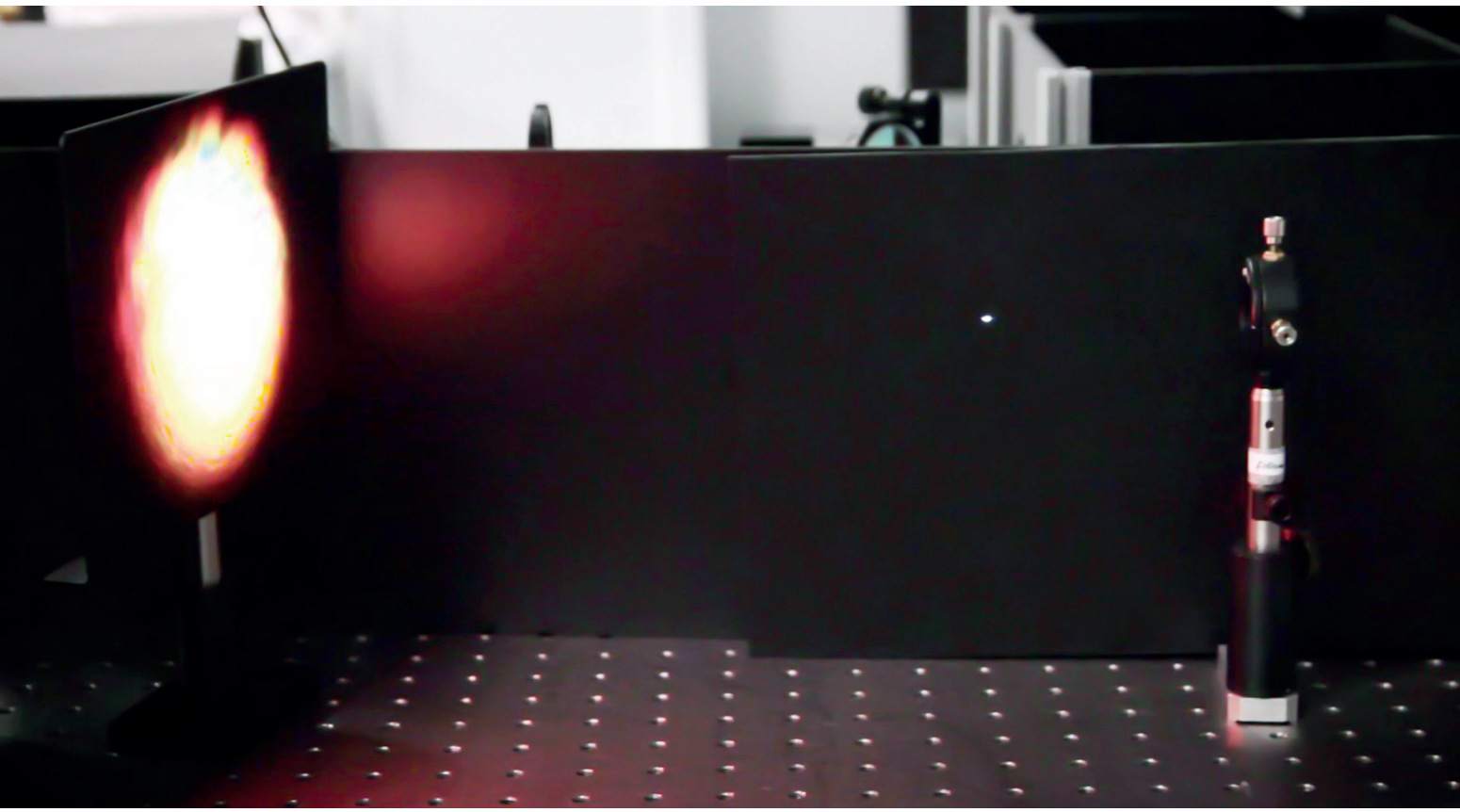
Zakład Fotoniki, Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

Plazma jest nazywana czwartym stanem skupienia materii, ponieważ istotnie różni się od trzech pozostałych: ciała stałego, cieczy i gazu. Plazma składa się z naładowanych cząstek, takich jak jony i swobodne elektrony. Elektrony oddzielają się od atomów, gdy gaz jest podgrzewany do wysokich temperatur lub poddany działaniu silnego pola elektrycznego. To właśnie obecność naładowanych cząstek sprawia, że plazma ma inne właściwości niż gaz. W odróżnieniu od zwykłego gazu plazma przewodzi prąd elektryczny i jest też bardziej reaktywna chemicznie. Z powodu tych unikatowych cech plazma jest klasyfikowana jako odrębny stan materii.

Niektórzy jednak nazywają plazmę pierwszym stanem materii. Argumentem jest fakt, że zdecydowana większość dostępnej obserwacjom części Wszechświa-



Kula plazmowa jest przykładem wyładowania elektrycznego przy niskim ciśnieniu gazu. Prąd zmienny o wysokiej częstotliwości przepływa przez gaz, jonizując go. Powstała plazma ma kształt niteczek rozchodzących się promieniście od centralnej elektrody. Umieszczona w pobliżu kuli jarzeniówka świeci się – pole elektryczne kuli jonizuje również gaz wewnątrz rury jarzeniówki



Zdjęcie plazmy laserowej (mała, jasna plamka w centrum zdjęcia). Wiązka promieniowania laserowego z zakresu bliskiej podczerwieni pada od prawej strony na soczewkę skupiającą. Plazma powstaje w ognisku soczewki. Po lewej stronie widoczne światło tzw. superkontinuum – promieniowanie laserowe, przechodząc przez bardzo gorący obszar plazmy, oddziałuje z nim, przez co zmniejszeniu ulega długość fali promieniowania. Biała poświata świadczy o generacji światła w pełnym zakresie widma widzialnego. Eksperyment wykonany za pomocą lasera generującego impulsy o czasie trwania 30 femtosekund ($1\ \mathrm{fs} = 10^{-15}\ \mathrm{s}$)

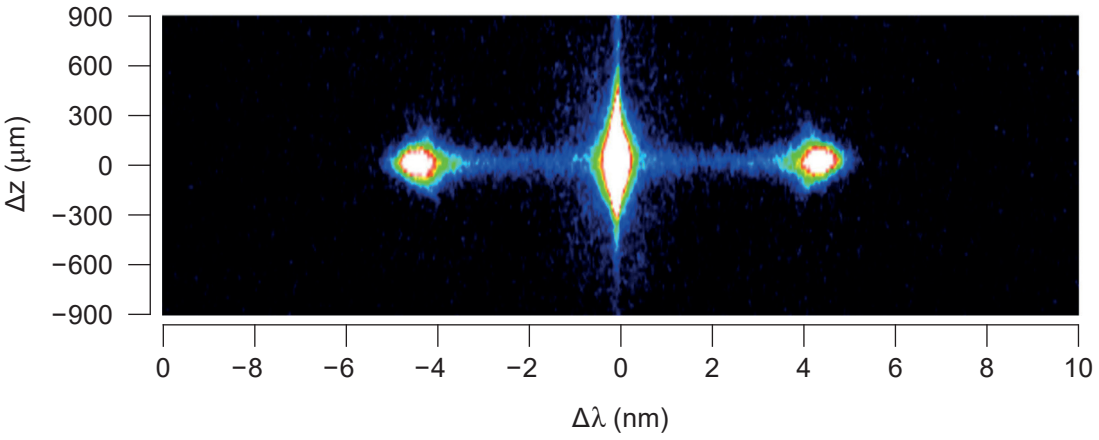
ta (szacuje się, że 99 proc.) to materia w stanie plazmy. Ponadto to właśnie plazma stanowiła materię bezpośrednio po Wielkim Wybuchu, uznawanym za początek istnienia Wszechświata.

To tylko błysk

Mimo że plazma stanowi większość widzialnej materii we Wszechświecie, to na Ziemi występuje stosunkowo rzadko – np. w postaci płomienia, błyskawicy czy iskry elektrycznej. Ludzie nauczyli się korzystać z własności plazmy zarówno tej wytworzonej przez naturę, jak i generowanej przez specjalnie skonstruowane urządzenia. Plazma odgrywa kluczową rolę w zrozumieniu procesów zachodzących w gwiazdach, w tym w naszym Słońcu, znajduje też szerokie zastosowanie w technologii i nauce. Badania nad plazmą są prowadzone w odniesieniu do różnych dziedzin nauki, duże znaczenie mają nauki medyczne, bada się zastosowanie plazmy w przypadku leczenia ran, dezynfekcji przy sterylizacji narzędzi. Ciągle rozwija się zastosowanie plazmy w produkcji półprzewodników, nanotechnologii oraz inżynierii powierzchni. Największe nadzieje są pokładane w pracach nad kontrolą plazmy w kontekście fuzji jądrowej, do produkcji czystej energii. Projekty takie jak Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termonuklearny ITER (ang. *International Thermonuclear Experimental Reactor*) badają, jak utrzymać stabilną plazmę w procesie fuzji. W pracach tych uczestniczą także Polacy, np. fizycy z Uniwersytetu Opolskiego.

Polscy naukowcy nie tylko biorą czynny udział w badaniach plazmy w zagranicznych ośrodkach, lecz także sami prowadzą prace w naszych krajowych instytutach i na uczelniach. Głównym ośrodkiem badań nad plazmą w Polsce jest Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie. IFPiLM specjalizuje się w badaniach związanych z syntezą termojądrową, fizyką plazmy oraz technologiami laserowymi. Z kolei w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku prowadzi się badania nad zastosowaniami plazmy w fizyce jądrowej i technologiach związanych z energetyką termojądrową. Fizycy z Uniwersytetu Warszawskiego i Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu zajmują się m.in. astrofizyką plazmy. Naukowcy Wydziału Fizyki oraz Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej pracują nad wykorzystaniem technologii plazmowych w przemyśle i energetyce. Plazma może być również wytwarzana w akceleratorach cząstek – zarówno ten temat, jak i zagadnienie plazmy w kontekście fizyki jądrowej są realizowane w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie.

Na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie prowadzi się badania plazmy w dziedzinie fizyki



Obraz rozpraszania Thomsona w plazmie łukowej zarejestrowany przez szybką kamerę ICCD sprzężoną ze spektrometrem. Kierunek poziomy odpowiada zmianie długości fali Δλ światła rozproszonego względem długości fali lasera (532 nm), kierunek pionowy to wymiar przestrzenny, wzdłuż próbkującej wiązki laserowej. Różne kolory odpowiadają różnym intensywnościom zarejestrowanego światła (kolor biały odpowiada największej intensywności). Jasna, pionowa linia na środku odpowiada rozproszonemu światłu wiązki lasera o niezmienionej długości fali. Jaśniejszy, poziomy pas to światło rozproszone o długości fali zmienionej w wyniku zjawiska Dopplera. Dwa skrajne białe obszary odpowiadają dużemu natężeniu światła rozproszonego związanego z kolektywnym ruchem elektronów swobodnych w plazmie.

teoretycznej i eksperymentalnej, astrofizyki, syntezy jądrowej i oddziaływań wysokoenergetycznych. W Instytucie Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego, a konkretnie w Zakładzie Fotoniki, prowadzi się badania pozwalające lepiej poznać i zrozumieć procesy zachodzące w plazmie oraz opracować zastosowania plazmy w technologiach.

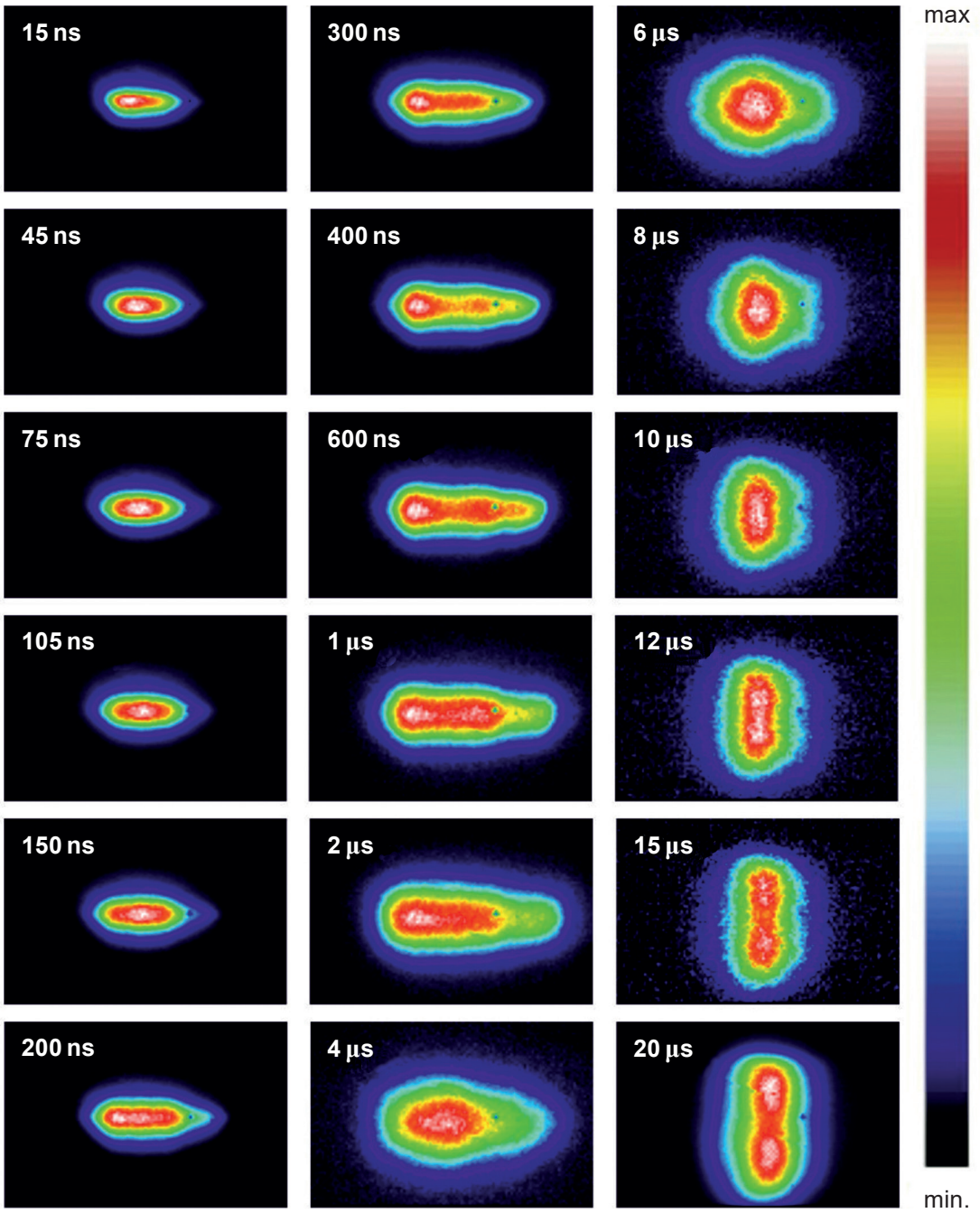
Plazmę można wytworzyć, podgrzewając materię do wysokiej temperatury. Można tego dokonać za pomocą lasera – wiązka światła z lasera jest zogniskowana na powierzchni próbki lub w gazie. Energia wiązki laserowej jest absorbowana przez elektrony w materiale, które w konsekwencji wybijają atomy z powierzchni i tworzą chmurę zjonizowanego gazu. Plazma taka emituje światło, którego widmo zależy m.in. od składu próbki. Analiza widma świecącej plazmy pozwala na identyfikację materiału badanej próbki. Laserowo wzbudzana spektroskopia emisyjna LIBS (ang. *laser-induced breakdown spectroscopy*) jest uniwersalną techniką umożliwiającą analizę składu chemicznego ciał stałych, cieczy i gazów. Jedną z głównych zalet tej metody jest to, że „odparowaniu" ulega tylko niewielka ilość materiału. Powstały w próbce krater ma mikroskopijne rozmiary (rzędu dziesiątek mikrometrów), dzięki czemu można uznać tę technikę za nieniszczącą. Metoda LIBS została z sukcesem zastosowana przez NASA w łaziku Curiosity do analizy składu chemicznego skał na Marsie. Niewątpliwe zalety metody LIBS pozwalają stosować ją również na Ziemi – np. w działaniach związanych z badaniem autentyczności dzieł sztuki.

Laserem w plazmę

Badania prowadzone przez grupę z Zakładu Fotoniki UJ mają na celu poznanie podstawowych własności plazmy generowanej laserowo. Ich znajomość jest istotna dla jej późniejszego właściwego zastosowania. Przeprowadza się eksperymenty pozwalające na jednoczesne wykorzystanie wielu komplementarnych metod diagnostycznych plazmy, czyli ustalenia parametrów plazmy, takich jak temperatura oraz koncentracja swobodnych elektronów. Stosuje się zarówno metody spektroskopowe, jak i aktywne metody rozproszeniowe. Te drugie polegają na próbkowaniu plazmy impulsem laserowym i analizie widma rozproszonego promieniowania.

Często stosowaną metodą wyznaczenia parametrów plazmy jest tzw. rozpraszanie Thomsona. Jest to technika oparta na rozpraszaniu światła laserowego na elektronach plazmy. W plazmę kieruje się skupioną wiązkę światła z drugiego lasera. Fale świetlne (a ściśle mówiąc – pole elektryczne fali) wprawiają swobodne elektrony w szybkie oscylacje, w wyniku czego elektrony emitują dookoła siebie promieniowanie. Można to porównać do wytwarzania fal radiowych przez prąd płynący tam i z powrotem w antenie nadającej audycję radiową. Jednak z powodu bardzo szybkiego ruchu elektronów w plazmie i zjawiska Dopplera (tego samego, dzięki któremu zmienia się wysokość tonu słyszanego, gdy przejeżdża koło nas samochód), obserwowane promieniowanie rozproszone ma inną długość fali niż światło lasera. Analiza widma promieniowania rozproszonego pozwala na wyznaczenie rozkładu prędkości elektronów, co z kolei umożliwia wyznaczenie temperatury plazmy. Poważnym problemem techniki rozpraszania Thomsona jest zaburzenie stanu plazmy impulsem sondującym. Żeby światło rozproszone miało natężenie wystarczające do zarejestrowania, impuls światła musi mieć wystarczająco dużą energię, a to skutkuje dodatkowym podgrzewaniem plazmy. Żeby otrzymać wiarygodny wynik pomiaru temperatury niezaburzonej plazmy, należy zastosować pewne techniki, które wymagają znajomości jej zachowania się oraz stałych fizycznych, charakteryzujących zachodzące procesy.

Należy mieć na uwadze, że plazma wytwarzana impulsami światła nie jest tworem statycznym. Powstaje podczas impulsu lasera (o czasie trwania rzędu od femtosekund do nanosekund). Jeszcze przez sam impuls laserowy może być ona dodatkowo podgrzewana – jest do niej dostarczana energia. Sama



Sekwencja zarejestrowanego świecenia plazmy argonowej w zależności od opóźnienia względem impulsu wytwarzającego plazmę. Każda klatka odpowiada wymiarom 3 na 2 mm. Plazma była wytwarzana impulsami światła o czasie trwania około 8 ns, a gęstość energii wynosiła 2 kJ/cm^2. Kolory oznaczają różne poziomy intensywności promieniowania plazmy (skala względna po prawej stronie) (Mendys et al., 2011)

plazma emituje promieniowanie – „oddaje energię". Plazma ewoluuje, i to bardzo szybko, bo w skali nanosekund. Problem rozwiązania bilansu energii jest dość skomplikowany. Plazma nie jest przecież jednorodna przestrzennie – w środku „obłoczka" ma najwyższą temperaturę, im dalej od środka, tym temperatura jest niższa. Z pomocą przychodzą obliczenia numeryczne i tworzone różne modele uwzględniające takie zjawiska, jak przepływ ciepła, emisja i pochłanianie promieniowania, oddziaływanie elektronów i jonów, ciśnienie, pole elektryczne i magnetyczne oraz inne procesy fizyczne, zachodzące w plazmie.

Badania plazmy wytwarzanej laserem to fascynujący obszar fizyki wymagający połączenia zaawansowanych technologii laserowych, precyzyjnych metod diagnostycznych oraz modelowania numerycznego. Pozwalają one na dokładne monitorowanie procesu powstawania, ewolucji i rozprzestrzeniania się plazmy. Poznanie zachodzących zjawisk i procesów jest kluczowe w kontekście takich technologii jak synteza termojądrowa czy obróbka materiałów. Jednym z kierunków prac prowadzonych na Uniwersytecie Jagiellońskim jest wdrożenie metody LIBS do badań nad dziełami sztuki, które wymagają zastosowania stosunkowo nieinwazyjnej metody. ■

Further reading:

Celiński Z., *Plazma*, seria Biblioteka Problemów, 1980.

Bolshakov A., "LIBS At Work On Mars," www.appliedspectra.com/mars-libs.html

Mendys A., Dzierżęga K., Grabiec M., Pellerin S., Pokrzywka B., Travaillé G., Bousquet B., *Investigations of laser-induced plasma in argon by Thomson scattering*, „Spectrochimica Acta Part B" 2011.