

## DR LEJBA: TRAJEKTORIĘ SATELITY OKREŚLAMY Z DOKŁADNOŚCIĄ CENTYMETROWĄ [WYWIAD]

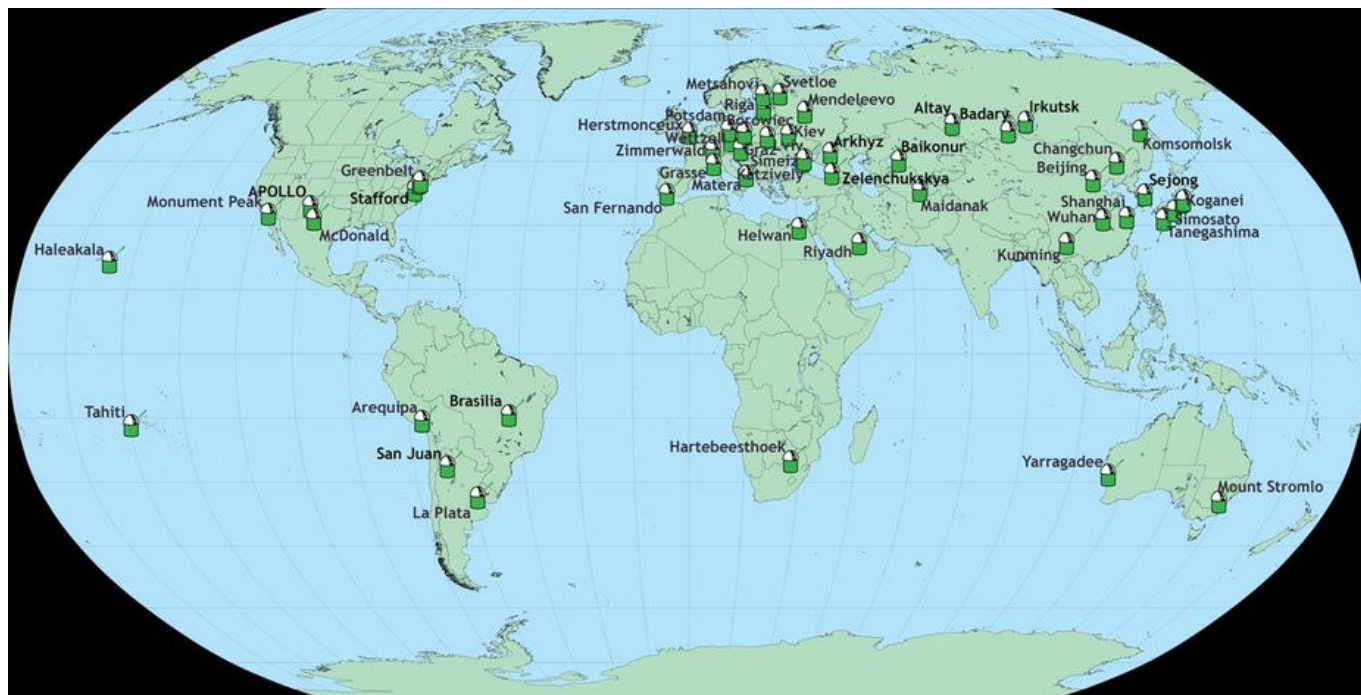
---

Dr Paweł Lejba, kierownik Obserwatorium Astrogeodynamicznego Centrum Badań Kosmicznych PAN w Borówcu, opowiada o laserowej technice mierzenia odległości do satelitów krążących wokół Ziemi. Tego typu obserwacje pozwalają niezwykle precyzyjnie wyznaczać orbity tych obiektów. *"Siłom zbrojnym może być przydatna przede wszystkim zdolność wyznaczania trajektorii danego obiektu - np. wrogiego satelity szpiegowskiego. [...] W połączeniu z innymi technikami można nawet ustalić, co konkretnie taki obiekt robi - czy np. ustawią się przelatując nad jakimś miastem, obszarem specjalnie pod kątem zrobienia zdjęć"* - podkreśla rozmówca Space24

### **Paweł Ziernicki: Cemu służą laserowe obserwacje czynnych satelitów i kosmicznych śmieci?**

Dr Paweł Lejba: Umożliwiają bardzo dokładne określenie gdzie śledzony obiekt znajduje się w danym momencie na niebie. Technika laserowa SLR (Satellite Laser Ranging) jest techniką absolutną. To znaczy, że jeżeli strzelamy laserem w kierunku obiektu i dostajemy od niego odbicia, to jesteśmy w stanie dokładnie i precyzyjnie określić, gdzie on się znajduje. Dokładność tej informacji jest dzisiaj na poziomie 1-2 cm, precyzja na poziomie kilku milimetrów. A trzeba przecież pamiętać, że te obiekty poruszają się bardzo szybko. Czyli głównym celem stosowania techniki laserowej jest wyznaczanie odległości do orbitujących wokół Ziemi satelitów. Wyznaczając ten dystans i mając wiele takich pomiarów możemy z dokładnością centymetrową określić trajektorię, po jakiej porusza się dany obiekt wokół Ziemi.

Warto przy tej okazji wspomnieć profesora Stanisława Schillaka, pioniera satelitarnej techniki laserowej w Polsce oraz profesora Jana Łatkę. To oni zaczęli zajmować się tym w CBK, w ogóle w Polsce, jeszcze w latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia. My jesteśmy nowym pokoleniem, które kontynuuje ich prace. Ważną nowością są laserowe obserwacje śmieci kosmicznych. Nasza stacja w Borówcu to jedyna polska stacja, która od 1988 r. należy do ILRS - International Laser Ranging Service. Ta organizacja koordynuje i nadzoruje pracę wszystkich stacji laserowych na całym świecie.



Rozkład sieci stacji laserowych na Ziemi (ILRS). Źródło: <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/network/stations/>

### Na czym polega sama technika laserowej obserwacji satelitów?

W technice laserowej mierzy się czas przelotu zielonego impulsu laserowego (dł. fali światła 532 nm) na drodze stacja-satelita-stacja. Impuls wysyłany jest z określoną częstością, najczęściej 10Hz. To właśnie na tej podstawie można wyliczyć dokładną odległość do obserwowanego obiektu. Oczywiście trzeba przy tym uwzględnić pewne fizyczne efekty, jak choćby refrakcję atmosferyczną, czyli ugięcie promienia lasera przy przejściu przez atmosferę. Aparaturę trzeba też kalibrować zarówno przed, jak i po obserwacjach śledzonego obiektu. Kalibracja polega na strzelaniu do umieszczonej w określonej odległości tarczy naziemnej. Wykonujemy serię strzałów, uśredniamy wyniki pomiarów i to pozwala nam obliczyć tzw. poprawkę kalibracyjną, czyli błąd systemu pomiarowego, który musimy uwzględnić w naszych wynikach. Bez przeprowadzenia kalibracji uzyskane przez nas wyniki nadawałyby się właściwie do wyrzucenia.

Trzeba też uwzględnić poprawkę na centrum masy satelity. Orbitę satelity liczymy przecież dla środka masy danego obiektu. Laserem strzelamy natomiast do specjalnego odbłyśnika (tzw. retroreflektora), umieszczonego w określonym miejscu na jego powierzchni. Znając konstrukcję danego satelity, wiemy w jakiej odległości od odbłyśnika znajduje się owo centrum masy.



Wiązka lasera emitowana przez stację w Borówcu. Fot. OA Borówiec

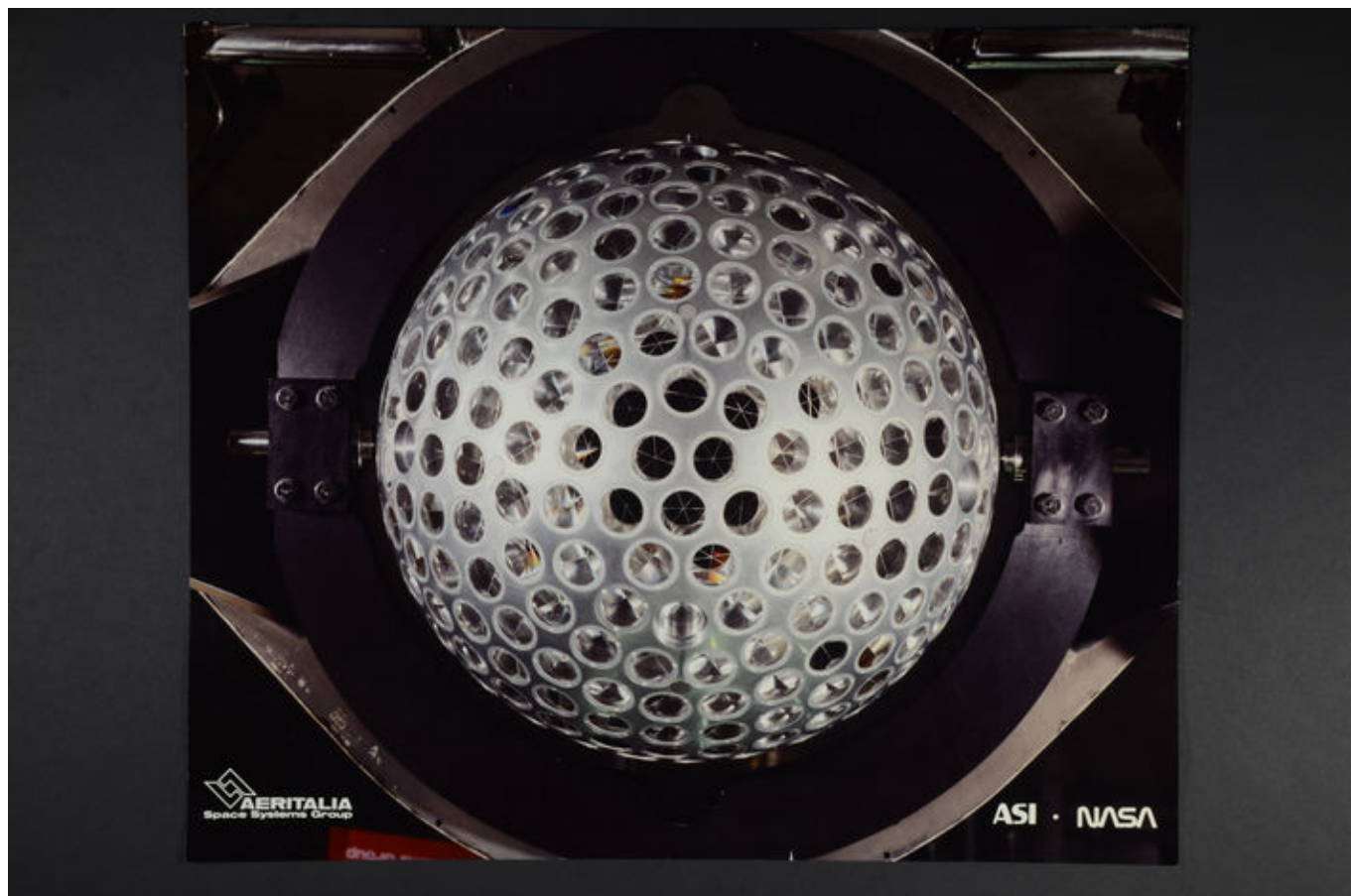
### **Czy można też wyznaczyć rotację obiektu - np. obracającego się śmiecia kosmicznego z pomiarów laserowych?**

Tak, obecnie już jest to możliwe. Jest to pewne rozszerzenie tej głównej funkcjonalności pomiarów laserowych. Jeszcze do niedawna nie byliśmy w stanie tego robić. Z pomocą przyszła laserowa technika kilohercowa. W rozwój tego zagadnienia szczególnie mocno zaangażował się nasz kolega Dr inż. Daniel Kucharski, który teraz pracuje w Australii i jest najlepszym na świecie specjalistą w tej tematyce.

Przy dzisiejszych możliwościach można też uzyskać odpowiedź na pytanie, jak szybko rotuje taki satelita, czy jak jest zorientowany. Ma to istotne znaczenie np. z punktu widzenia misji, która ma przechwycić nieczynnego satelitę, będącego kosmicznym śmieciem. Jeśli chwytak kosmicznej „śmieciarki” ma złapać taki kosmiczny odpad, konieczne są informacje na temat jego orientacji i szybkości rotacji. Trzeba dokładnie wyznaczyć moment przechwycenia, żeby nie uderzyć choćby w jakiś zbiornik z pozostałościami paliwa, co mogłoby zaowocować zniszczeniem satelity i wygenerowaniem nowej chmury śmieci na orbicie.

### **Co obserwowano, zanim skierowano wzrok ku kosmicznym śmieciom?**

Przez wiele lat skupiano się przede wszystkim na wspieraniu misji naukowych. Wokół naszej planety krążą w pewnej liczbie tzw. satelity pasywne, które nie przejawiają żadnej aktywności. Są to właściwie kule z metalu i szkła. Z metalu zrobiona jest ich konstrukcja, zaś szkło tworzy retroreflektory, które odbijają promienie lasera. Wzorcowymi satelitami tego typu są dwa bliźniacze satelity LAGEOS. Są to tzw. satelity referencyjne. Jeżeli chcemy sprawdzić jakość pracy, dokładność pomiarów danej stacji laserowej, to zawsze bierze się do analizy wyniki obserwacji tych właśnie satelitów. Krążą one na wysokości 6 tys. km nad Ziemią. Każdy z nich ma 60 cm średnicy, a na powierzchni 406 odbłyśników laserowych. Żadnych elementów aktywnych – silników, czy anten.



Satelita referencyjny LAGEOS-2. Fot. NASA/GSFC

### **Czy zawsze z góry jest wiadome do jakiego obiektu będą wysyłane laserowe impulsy?**

Tak. Kiedy planujemy mierzyć orbitę danego satelity, z odpowiedniej bazy pobieramy informację efemerydalną, czyli dane o pozycji satelity na konkretny moment. Następnie po odpowiednim przekształceniu wprowadzamy tę informację do systemu, dzięki czemu nasz teleskop wie, jak i kiedy się ustawić. Efemerydalną listę obiektów, które planujemy zaobserwować podczas danej nocy obserwacyjnej przygotowujemy z wyprzedzeniem. Zimą w warunkach Polski na jedną noc może być zaplanowany pomiar odległości do kilkudziesięciu obiektów. Latem ta liczba jest znacznie mniejsza, ze względu na dużo krótsze noce.

### **Podczas wykładu wspomniał Pan o planowanym strzelaniu do satelity Sentinel-3A. Po co kierować wiązkę lasera na takiego sprawnego satelitę?**

Chcemy dokładnie wiedzieć, gdzie on się znajduje. Chociaż właściwie wszystkie satelity teledetekcyjne są wyposażone w urządzenia do pomiaru wysokości orbity – altimetry, to jednak chcemy dobrze skalibrować te urządzenia. To właśnie umożliwiają lasery, ze względu na swoją wyjątkową dokładność. Nie da się tego zrobić techniką radarową. Określenie precyzyjnej orbity satelity obserwacyjnego ważne jest przede wszystkim z tego powodu, żebyśmy mogli właściwie interpretować dane, które od niego otrzymujemy. Jeśli satelita bada osiadanie budynku, to żeby prawidłowo zrozumieć uzyskane przez niego informacje, musimy wiedzieć pod jakim kątem, czy z jakiej dokładnie odległości prowadził on swoje obserwacje. Podobnie jest w przypadku satelitów nawigacyjnych. W trakcie trwającej 1-2 miesiące kampanii strzela się laserem do takiego urządzenia, by dokładnie i precyzyjnie określić jego pozycję. Im dokładniej i precyzyjniej ta pozycja jest znana, tym lepiej cały system GNSS pozwala na wyznaczenie pozycji użytkownika na powierzchni Ziemi. Stąd, w odbłyśniki laserowe wyposaża się wszystkie urządzenia konstelacji Galileo, GLONASS, czy satelity GPS nowej generacji.



## Czy w przyszłości lasery można będzie wykorzystać do likwidowania kosmicznych śmieci?

Są takie pomysły, by wykorzystywać ciśnienie światła laserowego do spowalniania niektórych obiektów, co w efekcie spowoduje szybkie obniżenie ich orbity i w konsekwencji spalenie w atmosferze. To jednak wymaga ogromnych energii, laserów o dużej mocy na poziomie kilodżuli.

## Czy strzelanie tak mocnymi impulsami lasera nie powoduje ryzyka fragmentacji satelity zamiast jego spowolnienia?

Nie. To jeszcze nie są Gwiezdne Wojny, choć świat powoli zmierza w tę stronę.



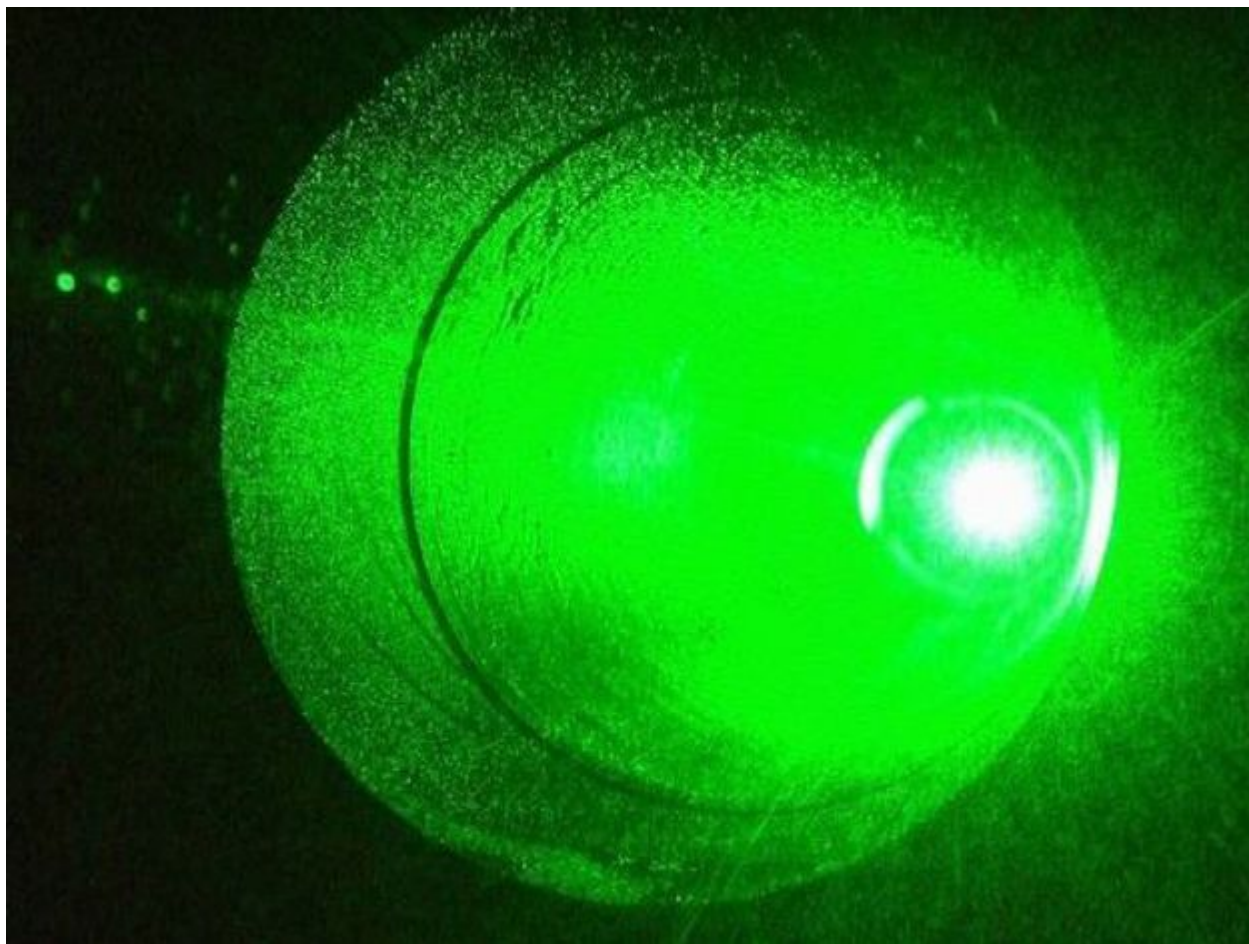
Lasery od dwóch różnych producentów, będące w dyspozycji polskiej stacji. Fot. OA Borówiec

## Jakie względy bezpieczeństwa należy zachować kierując światło lasera na obiekty krążące po orbicie?

To jest bardzo ważne. Strzelając laserami w przestrzeń kosmiczną trzeba przestrzegać szeregu zaleceń i procedur. Nadzór nad nami w tej kwestii sprawuje ILRS. Przykładem misji wrażliwej, dla której trzeba dokładnie zdefiniować warunki obserwacji jest właśnie Sentinel-3A. Nie możemy sobie w tym przypadku pozwolić na używanie 100% mocy naszego lasera, bo to mogłoby uszkodzić pewne elementy jego optyki. Podobnie jest ze stacją kosmiczną ISS.

Bezpieczeństwo nie dotyczy tylko obserwowanych obiektów, ale w równej mierze także ruchu lotniczego, samolotów tak cywilnych, jak i wojskowych. Musimy dbać o stały monitoring nieba nad naszą stacją, by laser nie trafił w jakiś samolot, który przelatuje nad nami w czasie obserwacji. Oczywiście, moc lasera którym dysponujemy, nie jest wystarczająca do tego, by w jakikolwiek sposób uszkodzić przelatujący samolot. Natomiast niezmiernie istotny jest tu aspekt psychologiczny. Chodzi o to, żeby nie wystraszyć pilota, żeby nie dostrzegł on niespodziewanie przed sobą zagadkowej wiązki lasera lub żeby nie trafić w kokpit samolotu. Stąd konieczny jest sprawnie działający system, który wyłącza laser w momencie, gdy coś przemierza powietrze nad nami i zbliża się do wiązki laserowej - nawet jeśli jest to zaledwie ptak. Wiązka lasera podczas strzelania do konkretnego satelity nie

pozostaje nieruchoma, lecz porusza się, śledząc jego ruch na niebie. Im niższa orbita satelity, tym ruch wiązki po niebie jest szybszy.



Wiązka lasera na wyjściu z teleskopu. Fot. OA Borówiec.

### **Dlaczego czasami strzelając do jakiegoś obiektu nie jest otrzymywane świetlne odbicie?**

W pierwszej kolejności może to wynikać z za słabej mocy lasera. Może się jednak zdarzyć i tak, że moc lasera jest w porządku, ale pomiary utrudniają warunki pogodowe - choćby mgła czy chmury, których obecność czasami trudno stwierdzić gołym okiem. Mniejsza przejrzystość powietrza powoduje, że do satelity dociera już nieco mniej fotonów, a żebyśmy mogli zarejestrować odbicie, muszą one jeszcze do nas powrócić. Liczba fotonów maleje z kwadratem odległości.

Druga sprawa to orientacja satelity. Jeśli nie ma na nim dedykowanych elementów odbijających, a dodatkowo on rotuje, to może być w chwili pomiarów tak zwrócony do Ziemi, że nie dostajemy odbić nawet strzelając ze 100-procentową mocą. Znaczenie ma też materiał, którym wykończone są zewnętrzne elementy satelity - na ile dobrze odbija on światło.

### **Jak Wasze badania mogą się w dłuższej perspektywie przyczynić do sprzątania orbity wokół Ziemi?**

Po pierwsze, to, co robimy, prowadzi do nieustannego rozwoju technologii w dziedzinie budowy i konstrukcji laserów. Z czasem będą one coraz mocniejsze i rzeczywiście możliwe będzie wykorzystanie ciśnienia ich światła do deorbitacji śmieci. Coś takiego najpierw można by robić z poziomu orbity, wyposażając w lasery dedykowane satelity. Po wyprodukowaniu jeszcze silniejszych laserów kosmiczne śmieci można będzie wyhamowywać strzelając do nich bezpośrednio z powierzchni Ziemi. No a dalej, to już prawdziwe Gwiezdne Wojny. Choć do tego trzeba rzecz jasna podchodzić z

dużym dystansem. Jeśli strzelimy w kosmicznego śmiecia laserem o naprawdę potężnej mocy, a śmieć ten nie wyparuje, to rozpadnie się na kawałki zwiększając tylko liczbę kłopotliwych odpadów na orbicie.

Bierzemy udział w dużych programach obserwacyjnych, koordynowanych przez Komisję Europejską i ESA, nastawionych na obserwację możliwie wielu obiektów w ramach programu Space Surveillance and Tracking (SST). Należy podkreślić, że nasze działania przynoszą najlepsze efekty, kiedy łączymy jak największą liczbę sensorów – rezultaty pomiarów laserowych konfrontujemy z wynikami badań radarowych i obserwacji optycznych.



Budynek stacji laserowej w Borówcu. Fot. OA Borówiec

### **Jakie zastosowanie militarne mogłaby mieć technologia, którą rozwijacie?**

Siłom zbrojnym może być przydatna przede wszystkim zdolność wyznaczania trajektorii danego obiektu - np. wrogiego satelity szpiegowskiego. Wykorzystując nasze metody można łatwo wyliczyć czas pojawiania się takiego obiektu nad Polską. W połączeniu z innymi technikami można nawet ustalić, co konkretnie taki obiekt robi - czy np. ustawia się przelatując nad jakimś miastem, obszarem specjalnie pod kątem zrobienia zdjęć. Możliwa jest też identyfikacja materiałowa - stwierdzenie z czego zbudowany jest podejrzany satelita, który nas niepokoi.

### **Wspomniał Pan, że stacje laserowe będą zaangażowane w badania związane z porównywaniem zegarów atomowych za pośrednictwem międzynarodowej stacji kosmicznej ISS?**

Tak, chodzi o misję ACES (Atomic Clock Ensemble in Space). Krótko mówiąc, chodzi o zbudowanie kosmicznej skali czasu. Nikt nie wie, jaki będzie wynik tego eksperymentu. Wchodzimy tu w obszar



badań podstawowych i zagadnienia związane z teorią względności Einsteina. Dokładne zegary atomowe, konkretnie masery wodorowe, które znajdują się na Ziemi i na pokładzie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej ISS będą porównywane ze sobą za pomocą technik mikrofalowej i laserowej. Zgodnie z ogólną teorią względności Einsteina czas płynie szybciej na orbicie, gdzie grawitacja Ziemi jest nieco słabsza w stosunku do czasu mierzonego na powierzchni naszej planety. To ma potwierdzić misja ACES.

**Dziękuję za rozmowę**

---

**Dr Paweł Lejba** – adiunkt w Centrum Badań Kosmicznych PAN, kierownik Obserwatorium Astrogeodynamicznego CBK PAN w Borówcu. Absolwent Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, specjalność: fizyka Ziemi i atmosfery. Specjalista w dziedzinie satelitarnej techniki laserowej SLR oraz wyznaczaniu orbit sztucznych satelitów Ziemi. Kieruje pracami satelitarnej stacji laserowej CBK PAN w Borówcu.