

# Absolutny Grawimetr Kwantowy w Instytucie Geodezji i Kartografii

– zimne atomy w służbie pomiarów  
przyśpieszenia siły ciężkości



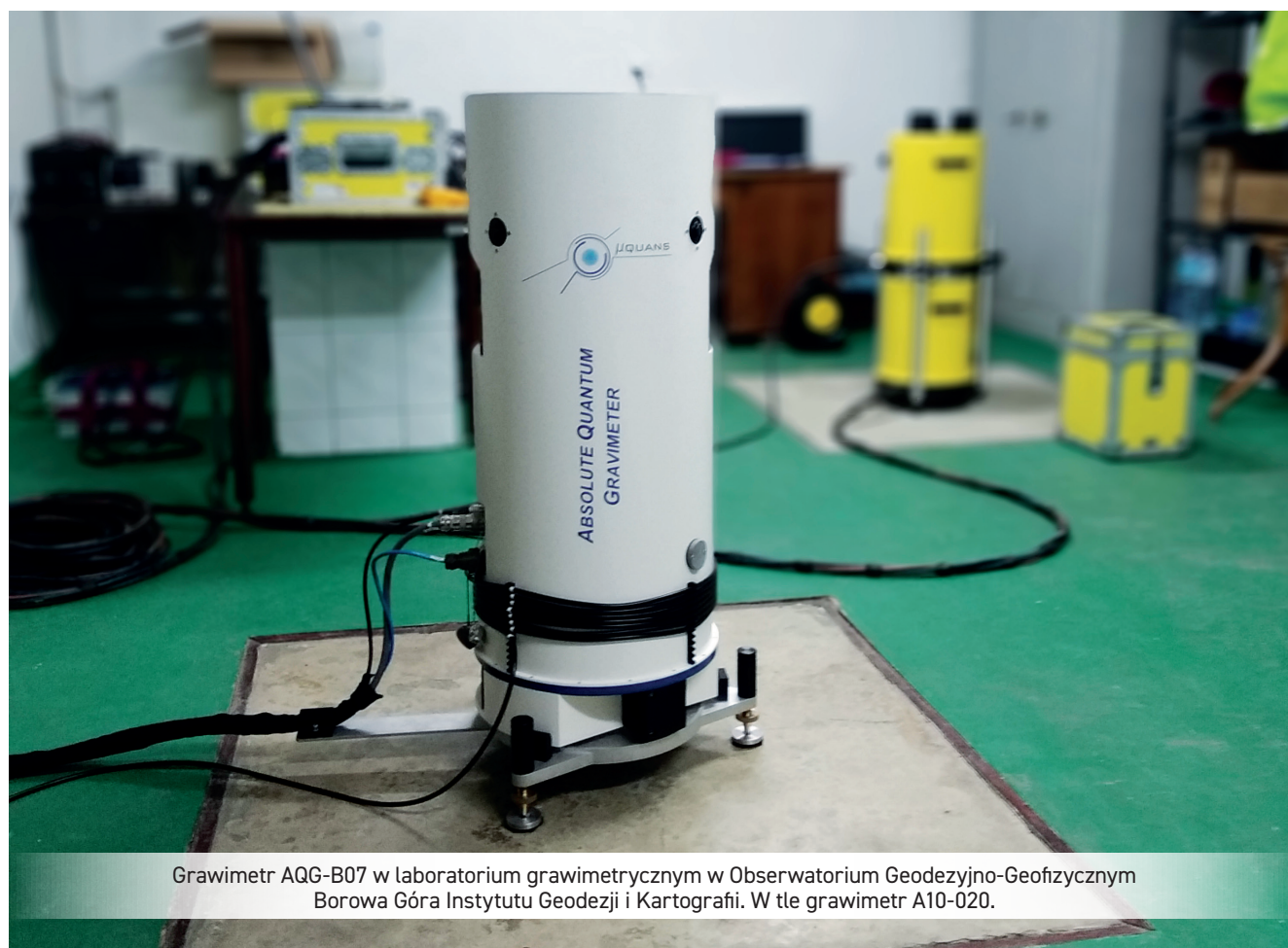
Technologie pomiarów przyśpieszenia siły ciężkości nieustająco się rozwijają. Na przełomie XIX i XX wieku pierwsze grawimetry absolutne bazowały na ruchu wahadła. W drugiej połowie XX wieku zaczęły się rozwijać metody wykorzystujące swobodny spadek ciała próbnego w próżni, a od początku XXI wieku potrafimy obserwować swobodny spadek chmury zimnych atomów. Choć ta metoda pomiaru jest znacznie bardziej skomplikowana niż w metodach klasycznych, to ta innowacyjna technologia pomiarowa stwarza nowe, do tej pory nieosiągalne możliwości.

W październiku 2021 r. w Obserwatorium Geodezyjno-Geofizycznym Borowa Góra Instytutu Geodezji i Kartografii (IGiK) został uruchomiony pierwszy w Polsce absolutny grawimetr kwantowy AQG (nr ser. B07). Jest to zaledwie siódmy egzemplarz tego urządzenia wyprodukowanego przez francuską firmę Muquans (obecnie Exile). Zakup został sfinansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Do czasu pozyskania grawimetru kwantowego AQG, IGiK dysponował grawimetrem absolutnym A10 (nr ser. 020) zakupionym w 2008 r. oraz grawimetrem nadprzewodnikowym iGrav (nr ser. 027) zakupionym w 2016 r. Ten drugi grawimetr jest urządzeniem nale-

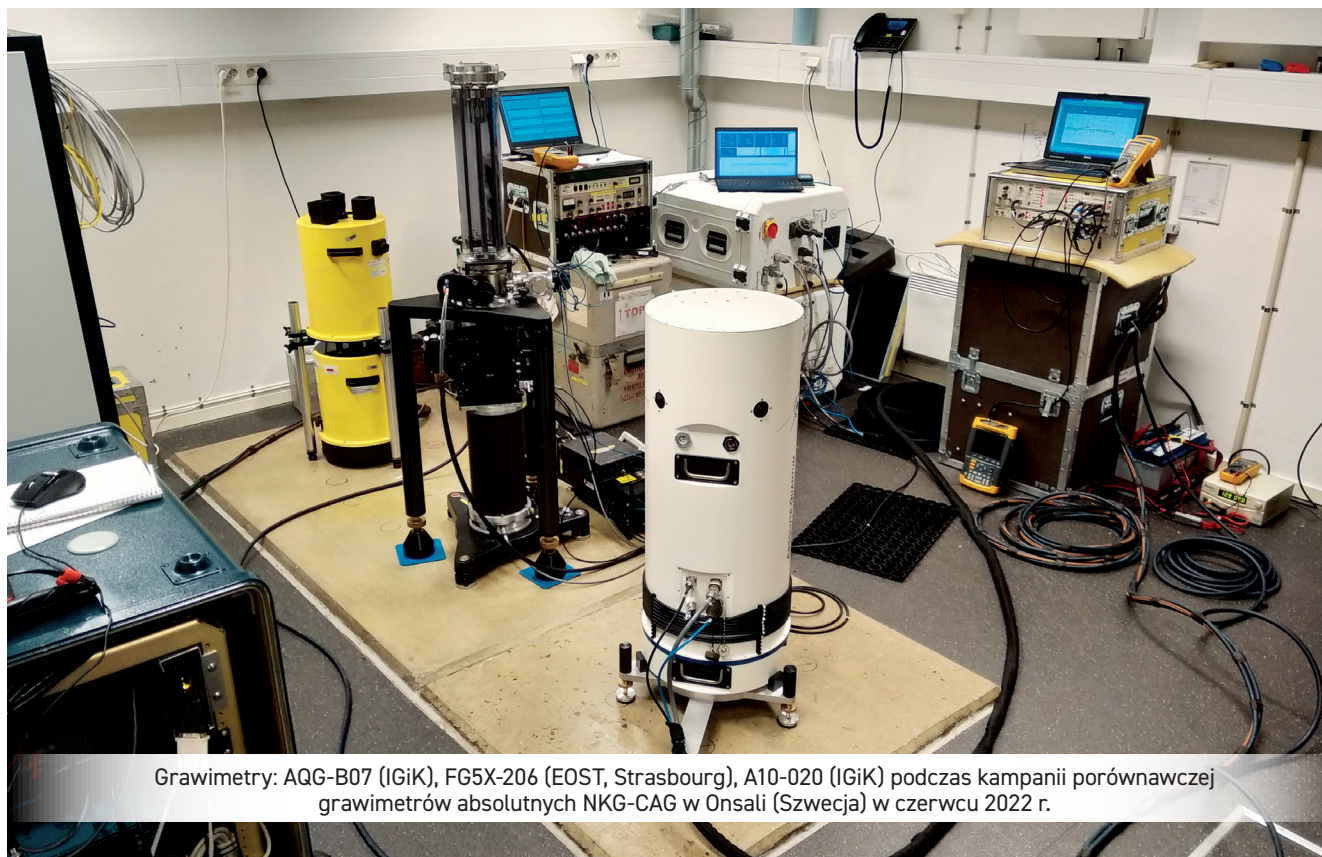
żącym do klasy instrumentów najdokładniej śledzących zmiany przyśpieszenia siły ciężkości w czasie.

Skonstruowanie grawimetru kwantowego wprowadza rewolucję w zakresie pomiarów grawimetrycznych. Technologia kwantowa jest obecnie najdynamiczniej rozwijającą się technologią pomiarową w grawimetrii. Co czyni grawimetr kwantowy tak interesującym?

We wspomnianym wyżej grawimetrze absolutnym A10 próbnikiem spadającym w próżni jest pryzmat, który jest „śledzony” cyklicznie, z interwałem 1 sekundy. Mierzone są pary dystans- czas z wykorzystaniem precyzyjnego lasera i zegara rubido-



Grawimetr AQG-B07 w laboratorium grawimetrycznym w Obserwatorium Geodezyjno-Geofizycznym Borowa Góra Instytutu Geodezji i Kartografii. W tle grawimetr A10-020.



Grawimetry: AQG-B07 (IGiK), FG5X-206 (EOST, Strasbourg), A10-020 (IGiK) podczas kampanii porównawczej grawimetrów absolutnych NKG-CAG w Onsali (Szwecja) w czerwcu 2022 r.

Fot. Przemysław Dykowski

wego (odpowiednio z dokładnością nanometrów i nanosekund), wymagających zewnętrznej kalibracji, np. względem wzorców państwowych długości i czasu w Głównym Urzędzie Miar. Wadą tego rozwiązania jest to, że urządzenie jest mechaniczne, a przez to ma żywotność ograniczoną do 1 mln spadków lub do kilku lat, zakładając, że wyznaczenie przyspieszenia siły ciężkości w jednej lokalizacji wymaga pomiaru co najmniej 2500 spadków. Konieczny w takim przypadku serwis oznacza utratę metrologicznej stabilności wskazań instrumentu.

W grawimetrze kwantowym AQG masą testową opadającą w próżni jest chmura atomów Rb87, schłodzona do temperatury  $\sim 1 \mu\text{K}$ , o średnicy  $\sim 1 \text{ mm}$ . Do wyznaczania absolutnej wartości przyspieszenia siły ciężkości wykorzystane jest w nim zjawisko interferometrii zimnych atomów poprzez zastosowanie dwufotonowego rozpraszania Ramana. W dużym uproszczeniu, w czasie swobodnego spadku wykonywana jest sekwencja 3 pulsów lasera o specjalnej konstrukcji. Każdy z pulsów lasera pozwala manipulować właściwościami atomów, a detekcja fluorescencyjna na końcu swobodnego spadku pozwala na uzyskanie informacji o przyspieszeniu siły ciężkości Ziemi. Oznacza to, że urządzenie jest w zasadzie pozbawione elementów mechanicznych, a co za tym idzie – ogranicza to potrzebę jego inwazyjnego serwisowania.

Dzięki braku części mechanicznych grawimetr kwantowy może pracować w zasadzie w trybie ciągłym z częstotliwością około 2 Hz. Dla prostego przykładu, rozsądnie racjonowane użytkowanie grawimetru mechanicznego A10 pozwala na wykonanie 1 mln spadków w okresie 3–4 lat, podczas gdy grawimetr kwantowy AQG bez większego wysiłku w okresie jednego miesiąca ciągłej pracy wykonuje około 4 mln spadków.

Dodatkowo grawimetr kwantowy wykonuje cyklicznie proces samokalibracji, w którym długość fali lasera i wzorca częstotliwości wykorzystywanych w grawimetrze są odnoszone do właściwości atomów Rb87, co w zasadzie eliminuje potrzebę zewnętrznej kontroli tych parametrów.

Poziom dokładności współczesnych grawimetrów absolutnych, zarówno mechanicznych, jak i kwantowych to pojedyncze  $\mu\text{Gal}$  ( $1 \mu\text{Gal} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}^2 = 10 \text{ nm/s}^2$ ). Na tym poziomie dokładności jedyny sposób, żeby zweryfikować wskazania grawimetru, to udział w kampaniach porównawczych grawimetrów absolutnych, tj. sesjach pomiarowych, podczas których od kilku do kilkunastu grawimetrów wykonuje w okresie 2–3 miesięcy obserwacje w jednym pomieszczeniu, a wyniki tych obserwacji są wspólnie opracowywane. W czerwcu 2022 r. grawimetr kwantowy AQG-B07 wraz z grawimetrem A10-020 brały udział w kampanii porównawczej grawimetrów absolutnych NKG-CAG 2022 zorganizowanej przez Nordycką Komisję Geodezyjną (NKG) w Obserwatorium Kosmicznym w Onsali, w Szwecji. Opracowanie wyników jest w toku, a wyniki są spodziewane w połowie 2023 r.

Wspomniane właściwości grawimetru kwantowego AQG-B07 stwarzają unikalne możliwości odnośnie utrzymania stałości jednostki przyspieszenia siły ciężkości w czasie, a to z kolei są kluczowe zagadnienia leżące w zakresie zainteresowania geodezji i metrologii grawimetrycznej. W przypadku geodezji jest to szczególnie istotne ze względu na nowo tworzoną definicję Międzynarodowego Ziemijskiego Układu Odniesienia Grawimetrycznego (ITGRF). W przypadku metrologii są to zagadnienia związane z utrzymywaniem Państwowych Wzorców Miar, gdzie znajomość przyspieszenia siły ciężkości jest bardzo ważna, m.in. przy określaniu wzorców masy, siły czy ciśnienia.